

기상드론 바람관측자료의 정확도 확보를 통한 대기하층 시공간 관측공백 해소 연구

이승협 · 박미은* · 전해림 · 박미르

국립기상과학원 예보연구부

(접수일: 2023년 7월 4일, 수정일: 2023년 10월 10일, 게재확정일: 2023년 10월 18일)

A Study on Filling the Spatio-temporal Observation Gaps in the Lower Atmosphere by Guaranteeing the Accuracy of Wind Observation Data from a Meteorological Drone

Seung-Hyeop Lee, Mi Eun Park*, Hye-Rim Jeon, and Mir Park

Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 4 July 2023; revised 10 October 2023; accepted 18 October 2023)

Abstract The mobile observation method, in which a meteorological drone observes while ascending, can observe the vertical profile of wind at 1 m-interval. In addition, since continuous flights are possible at time intervals of less than 30 minutes, high-resolution observation data can be obtained both spatially and temporally. In this study, we verify the accuracy of mobile observation data from meteorological drone (drone) and fill the spatio-temporal observation gaps in the lower atmosphere. To verify the accuracy of mobile observation data observed by drone, it was compared with rawinsonde observation data. The correlation coefficients between two equipment for a wind speed and direction were 0.89 and 0.91, and the root mean square errors were 0.7 m s^{-1} and 20.93° . Therefore, it was judged that the drone was suitable for observing vertical profile of the wind using mobile observation method. In addition, we attempted to resolve the observation gaps in the lower atmosphere. First, the vertical observation gaps of the wind profiler between the ground and the 150 m altitude could be resolved by wind observation data using the drone. Secondly, the temporal observation gaps between 3-hour interval in the rawinsonde was resolved through a drone observation case conducted in Taean-gun, Chungcheongnam-do on October 13, 2022. In this case, the drone mobile observation data every 30-minute intervals could observe the low-level jet more detail than the rawinsonde observation data. These results show that the mobile observation data of the drone can be used to fill the spatio-temporal observation gaps in the lower atmosphere.

Key words: Meteorological Drone, Vertical Profile Observation, Lower Atmosphere, Observation Gap

*Corresponding Author: Mi Eun Park, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6572, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: mepmep@korea.kr

1. 서 론

일반적으로 대기하층은 대기경계층이 나타나는 2~3 km 고도 이하를 의미한다. 대기하층 바람의 연직구조는 안개의 유입, 산불의 확산, 도시 내 오염물질 분포, 항공 운항 등 다양한 분야에 영향을 미친다(Kwak et al., 2011; Cho et al., 2015; Ye et al., 2015; Oude Nijhuis et al., 2018). 따라서 이를 정확히 파악한다면 대기하층의 기상현상을 예측하고 그로 인한 인명, 재산 피해를 최소화할 수 있다. 그러나 대기하층에서의 바람의 연직 분포는 지표 마찰과 가열 등에 의해 시공간적으로 복잡하게 나타나기 때문에 정확한 관측자료를 얻는 것이 어렵다(Ng et al., 2011).

이에, 보다 정확한 바람 관측자료 확보를 위해 레윈존데, 윈드프로파일러 등 다양한 장비들이 활용되고 있다. 연직 바람관측에 가장 많이 활용되는 레윈존데는 일반적으로 12시간 간격으로 관측되고 반복관측에 많은 비용이 발생하기 때문에 시간해상도를 높이기 어렵다(WMO, 2015). 반면, 시간해상도가 10분 간격으로 높은 윈드프로파일러는 150 m 고도까지 관측 공백이 있으며, 50 m 간격의 관측자료 생산으로 연직 공간해상도가 낮다(Jo, 2020). 또한 위와 같은 장비들은 필요한 지점으로 이동하여 관측이 어렵고 설치 장소에 제약이 크기 때문에, 전국적으로 약 20개소에서만 관측이 수행되고 수평 해상도가 낮다.

이러한 대기하층의 시간적, 공간적 관측 공백을 보완하기 위해 최근 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 활용한 기상관측 연구가 수행되고 있다(Hemingway et al., 2017; Greene et al., 2019; Adkins et al., 2020; Samad et al., 2022). 특히, 드론(drone)으로 알려진 회전익 UAV는 1 km 고도 이내에서 안정적으로 이동(상승·하강) 및 정지(호버링)비행이 가능하고, 필요한 현장에 이동하여 관측할 수 있기 때문에 관측공백지역에서 연직 바람관측에 적합하다.

드론의 연직 바람관측 방법으로는 간접적 방법과 직접적 방법이 있다. 간접적 관측방법은 드론의 비행 정보 중 기체의 기울어진 정도(Pitch, Roll, Yaw)를 활용하여 바람벡터를 산출(Schiano et al., 2014; Neumann and Bartholmai, 2015; Segales et al., 2020)하며, 별도의 기상센서가 필요하지 않기 때문에 기체의 구성이 간단해지고 어떤 드론이든 적용이 가능하다. 그러나 드론마다 풍동 실험을 통해 기체정보와 풍속·풍향 간의 상관식을 얻어야 하며, 상승 및 하강 기류에 따라 모터의 회전이 변화하면 오차가 발생한다(Wetz et al., 2021). 직접적 관측방법은 드론에 초음파 풍속·풍향 센서를 부착하여 관측하는 방법이며, 간접적 관측방법보다 비교적 쉽게 관측자료를 확보할 수 있어 연직 바람관측 연구에 활용되고 있다(Palomaki et al., 2017;

Shimura et al., 2018).

위와 같이 직접적 관측방법을 사용하는 연구는 주로 관측하고자 하는 특정 고도에서 정지하여 관측하는 방식(정지관측)으로 수행되었다. 정지관측 방식은 기체의 자세가 안정적이기 때문에 특정고도에서 비교적 정확한 관측자료를 확보할 수 있다. 우리나라에서는 이러한 정지관측 방식을 활용하여 해안지역의 국지풍을 관측하고 낮 시간의 해풍이 일몰 이후 300 m 고도 이상에서부터 육풍으로 바뀌는 특징을 확인한 바 있다(Chong et al., 2020). 그러나 기상관측에 활용되고 있는 드론의 1회 최대 비행시간은 30분 이내로 한정적이기 때문에 관측을 위해 정지하는 고도의 수가 많아질수록 비행 소요시간이 길어진다. 따라서 많은 고도에 정지할수록 한정된 시간 내에서 관측 가능한 최대고도를 높이기 어려우며, 관측 최대고도를 높이는 경우 정지 관측하는 고도의 수를 줄여야 하기 때문에 연직 해상도를 높이기 어렵다. 이에 따라, 보다 고해상도 바람관측자료를 확보하기 위해서 정지관측방법 대신 연직 상승·하강하는 이동관측이 필요하다. 그러나 선행연구에 따르면 이동관측 연구는 대부분 간접적 관측방법을 사용하였으며, 직접적 관측방법의 경우 정지관측으로 정확도를 검증한 후 이동 관측이 수행되었다(Chong et al., 2019; Bell et al., 2020; Varentsov et al., 2021).

본 연구에서는 직접적 관측방식을 적용한 기상드론의 이동관측 자료를 레윈존데와 비교하여 연직 바람관측자료의 정확도를 확보하고자 하였다. 이를 바탕으로 기상드론의 안정적 운영이 가능한 1 km 이내 대기하층에서 기존의 연직 관측장비의 시공간적 관측공백을 해소하는 것이 목적이다. 먼저, 기상드론 이동관측자료의 정확도 확보를 위하여 레윈존데와 특별비교관측을 수행하였다. 레윈존데는 세계기상기구에서 지구대기감시를 위해 사용하는 표준 관측장비로, 풍선을 이용해 기상센서를 비양하며 대기의 연직구조를 직접적으로 관측할 수 있다. 따라서 직접적 관측 방법을 사용하는 기상드론과 레윈존데와 비교를 통해 기상드론의 연직 바람관측자료의 정확도 검증이 가능하다. 이러한 결과를 바탕으로 기상드론을 윈드프로파일러 관측 지점에서 비행하여 윈드프로파일러가 갖는 관측공백(150 m 이내)을 해소하고자 하였다. 마지막으로, 이른 오전시간(일출 후 2~3시간)에 수행한 기상드론과 레윈존데의 공동 관측 사례에서 기상드론이 레윈존데의 시간적 관측공백을 해소할 수 있음을 보이고자 하였다.

2. 방 법

2.1 기상드론과 레윈존데의 비교관측

본 연구에서는 기상드론을 이용한 이동관측자료의 정확도 검증을 위하여 레윈존데와의 비교관측을 수행

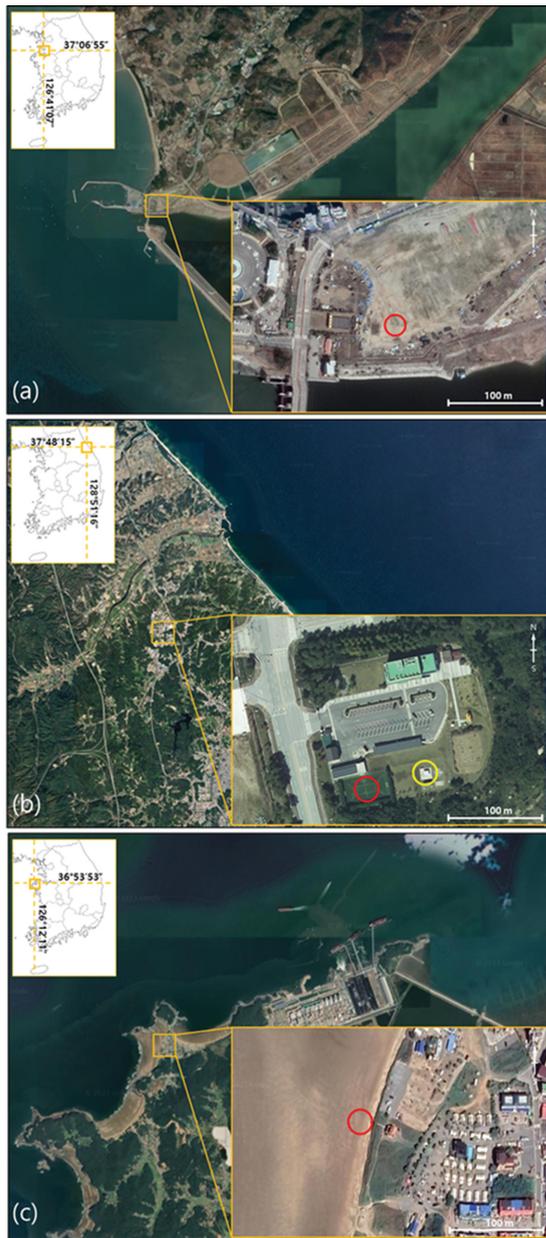


Fig. 1. Meteorological drone (red circle), rawinsonde (red circle) and wind profiler (yellow circle) observation sites. (a) Gungpyeong port, (b) Bukgangneung, (c) Hagampo.

하였다. 관측 지점은 경기도 화성시 궁평항 일대로, 해안에 위치해 있으며 기상드론과 레윈존데의 안전한 관측에 적합한 넓은 공터이다(Fig. 1a). 드론은 중국 DJI사의 Matrice 600 pro (Fig. 2a)를 사용하였으며 최대 비행 시간은 32분(정지관측 기준)이지만, 기상센서 및 송수신 장비 등을 탑재 후 관측 가능한 시간은 20

분이다. 최대 수평 이동속도는 18 m s^{-1} , 최대 상승속도는 5 m s^{-1} 로 500 m 고도까지 비행이 가능하다. 기상드론의 내풍풍속(Maximum wind resistance)은 8 m s^{-1} 로 제시되어 있으나(Table 1), 돌풍이 불지 않는 조건에서는 경험적으로 비교적 강한 바람($10\sim 12 \text{ m s}^{-1}$)에서도 안정적으로 비행이 가능하였다(Watkins et al., 2010). 기상드론에 탑재한 기상센서는 기온, 습도, 풍속, 풍향 측정이 가능한 Vaisala사의 WXT536을 사용하였다. 기상센서의 설치 위치는 비행 안정성을 유지하는 조건에서 프로펠러에 영향에 의한 풍속 변화가 『기상측기의 검정기준에 대한 검사방법 및 공차』 별표 2에서 명시된 실외측기검정기준 공차범위($\pm 1 \text{ m s}^{-1}$) 이하가 되는 드론 상부에서 30 cm 높이에 설치되었다(Kim et al., 2018). 기상자료는 1초 간격으로 지상 수신기(노트북)로 전송되어 저장 및 표출된다. 기상센서는 풍향의 북쪽 기준이 센서의 회전 방향과 상관없이 고정되어 있어 기상드론의 방향이 북쪽을 향하지 않는 경우 풍향 관측값에 오차가 발생한다. 따라서 기상드론에 컴퍼스 센서를 부착하여 기체가 바라보는 각도를 측정하고 이를 통해 풍향관측 자료를 보정하였다.

레윈존데는 프랑스 M10 (Metemodem, 프랑스)을 활용하였으며, 기온, 습도, 풍속, 풍향을 1초 간격으로 관측하였다. 레윈존데는 비양 후 바람에 따라 수평으로 이동하기 때문에 이에 따른 편차가 발생할 수 있다. 그러나 Laroche and Sarrazin (2013)의 연구에서 미국 내 20개 지점의 레윈존데 관측자료에서 1000-850 hPa 고도 이내 풍속과 수치모델 결과의 풍속간 표준편차는 0.1 m s^{-1} 로 매우 작았다. 따라서 레윈존데 관측자료는 기상드론 최대 관측 고도(500 m) 내에서 수평이동에 따른 편차를 고려하지 않고 두 장비간 비교분석에 사용되었다.

비교관측일은 2021년 10월 8일, 11월 16일, 17일로 각 관측일의 오전[0700~1100 LST (Local standard time)] 시간에 관측이 수행되었다. 두 장비의 비교관측 횟수는 일자별로 각각 4회, 10회, 10회로 총 24회이다. 10월 8일의 관측횟수는 강수로 인해 기상드론 비행이 제한되어 다른 관측일에 비해 적었다(Table 2). 최대 관측고도는 안전한 비행을 위해 임시공역(항공교통본부 공역관리규정) 허가사항에 따라 사전에 허가 받은 500 m로 설정하였다. 기상드론은 최대 관측 고도까지 연직 상승하였으며, 연직 관측해상도를 높이기 위해 상승속도는 1 m s^{-1} 를 유지하여 1 m 간격으로 관측하였다. 관측자료는 기체와 프로펠러의 영향을 최소화하기 위해 상승자료만 사용하였다(Hedworth et al., 2022). 또한 관측자료의 무선 송수신 과정에서 지형, 전파 간섭에 의해 일시적으로 통신이 두절되었을 때 기록된 관측자료(43%)는 모두 제외하였다. 레윈존데는 1 m 간격의 기상드론 관측자료와 비교를 위

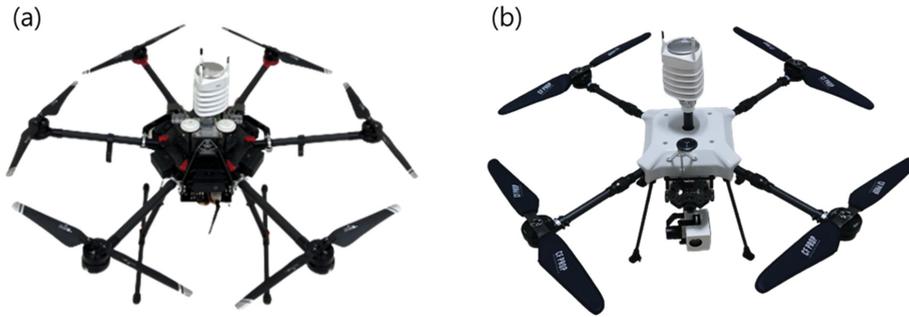


Fig. 2. Meteorological drones used for observation. (a) Matrice 600 pro, (b) QW-MQ-21.

Table 1. Specifications of the meteorological drone (Matrice 600 pro).

Specifications		
	Maximum speed	18 m s ⁻¹
	Ascent speed	5 m s ⁻¹
	Maximum height	500 m
	Dimensions	1,668 × 1,518 × 727 mm
	Maximum flight time	20 min
	Weight	10 kg
	Battery	4,280 mAh, 22.8 V (× 6)
	Maximum takeoff weight	15.5 kg
	Maximum wind resistance	8 m s ⁻¹
Meteorological variables (WXT536, Vaisala)	Temperature	±0.3°C
	Relative humidity	± 3% (0~90%), ± 5% (90~100%)
	Wind direction	± 3° at 10 m s ⁻¹
	Wind speed	± 3% at 10 m s ⁻¹
	Pressure	± 0.5 hPa (0~30°C), ± 1 hPa (-52~60°C)

Table 2. Overview of observations for comparison between meteorological drone and rawinsonde.

Flight no.	Takeoff time [LST]										Location
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
Oct. 8	0750	0820	0840	0940							
Nov. 16	0720	0740	0800	0820	0840	0900	0920	0940	1000	1020	Gungpyeong port
Nov. 17	0710	0720	0730	0750	0810	0830	0900	0920	0940	1000	

해 풍선에 들어가는 헬륨 가스량을 조절하여 비양 가능한 최소 속도(2~3 m s⁻¹)로 기상드론 이륙 시점에 비양하였다.

2.2 윈드프로파일러 관측지점에서 기상드론의 특별 관측 수행

기상드론 이동관측자료를 활용하여 연직 바람관측

장비의 관측공백을 해소하기 위해 윈드프로파일러가 설치된 북강릉(강원지방기상청) 지점에서 특별관측을 수행하였다(Fig. 1b). 윈드프로파일러(LAP3000, Scintec, 독일)는 연직 바람을 상시 관측하고 있다. 관측자료는 10분 간격으로 생산되어 레원존데에 비해 시간해상도가 높으나, 150 m 고도부터 50 m 간격으로 관측자료가 생산되기 때문에 연직 공간해상도는 낮다. 기상드

Table 3. Overview of special observations by meteorological drone in April and May 2021.

Flight no.	Takeoff time [LST]										Location
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
Apr. 23	0820	0900	0940	1000	1020	1100	1420	1440	1500		Bukgangneung
May. 7	0800	0810	0820	0850							

Table 4. Specifications of the meteorological drone (QW-MQ-21).

Specifications		
	Maximum speed	10 m s ⁻¹
	Ascent speed	4 m s ⁻¹
	Maximum height	1,000 m
	Dimensions	1,360 × 1,360 × 710 mm
	Maximum flight time	30 min
	Weight	11.4 kg
	Battery	22,000 mAh, 22.8 V (× 2)
	Maximum takeoff weight	11.4 kg
	Maximum wind resistance	12 m s ⁻¹
Meteorological variables (WXT536, Vaisala)	Temperature	± 0.3°C
	Relative humidity	± 3% (0~90%), ± 5% (90~100%)
	Wind direction	± 3° at 10 m s ⁻¹
	Wind speed	± 3% at 10 m s ⁻¹
	Pressure	± 0.5 hPa (0~30°C), ± 1 hPa (-52~60°C)

론 관측일은 2021년 4월 23일(0830~1500 LST)과 5월 7일(0800~0900 LST)로 2일간 총 13회 비행하였다(Table 3).

기상드론은 안전한 관측거리 확보를 위해 윈드프로파일러로부터 약 50 m 이격된 지점에서 비행하였다. 최대 관측고도는 해당지역의 임시공역 허가사항에 따라 300 m로 제한되었다. 또한 5월 7일은 상층에서 12 m s⁻¹ 이상의 강풍이 관측되어 기상드론의 안전한 비행을 위해 최대 관측고도를 200 m로 제한하였다. 상승속도는 1 m s⁻¹로 유지하였으며 최고 고도까지 연직 상승하며 관측하였다.

2.3 기상드론과 레윈존데의 대기하층 공동 관측

기상드론과 레윈존데의 공동 관측은 이른 오전시간의 대기 연직구조 변화 파악을 위해 수행되었다. 관측 장소는 충청남도 태안군 학암포이며, 해안가에 위치하여 복잡한 지형에 의한 국지적 특성 없이 맑은 날 바람의 연직구조의 변화 관측이 가능하다(Fig. 1c). 또한 주변에 연직 바람관측 지점이 없는 관측 공백 지역이다. 공동 관측에 사용된 기상드론은 국립기상

과학원에서 개발한 QW-MQ-21이다(Table 4, Fig. 2b). 기존에 사용 중이던 Matrice 600 pro에 비해 소형화, 경량화 되어 비행시간은 30분, 최대 비행고도는 1 km 로 비행성능이 향상되어 연직 기상 관측을 더 효율적으로 수행할 수 있다. 기상드론의 기상센서와 레윈존데는 각각 2.1절의 비교관측과 동일한 센서인 WXT536 과 M10을 사용하였다. 공동 관측에서는 연직바람 분포의 변화를 설명하기 위해 기상센서에서 관측된 기온을 추가로 활용하였다.

공동 관측기간은 2022년 10월 13일이며, 공동 관측 시간은 0600 LST부터 1100 LST이다. 기상드론 관측 횟수는 약 30분 간격으로 7회, 레윈존데 관측횟수는 3시간 간격으로 2회이다(Table 5). 레윈존데의 관측간격인 3시간은 1개의 수신기로 약 20 km 고도까지 관측하는데 소요되는 시간을 고려한 최소 관측 간격이다. 기상드론의 최대 관측고도는 임시공역을 준수하여 900 m로 설정하였으며, 상승속도는 1.5 m s⁻¹이다. 공동 관측 목적은 기상현상 관측이므로 짧은 시간 간격으로 더 높은 고도까지 관측하기 위해 상승속도를 앞선 특별관측에 비해 빠르게 설정하였다.

Table 5. Overview of meteorological drone and rawinsonde observations on October 13, 2022.

Flight no.	Takeoff time [LST]								Location
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Meteorological drone	0643	0712	0744	0812	0848	0914	0944	1014	Hagampo
Rawinsonde	0643						0944		

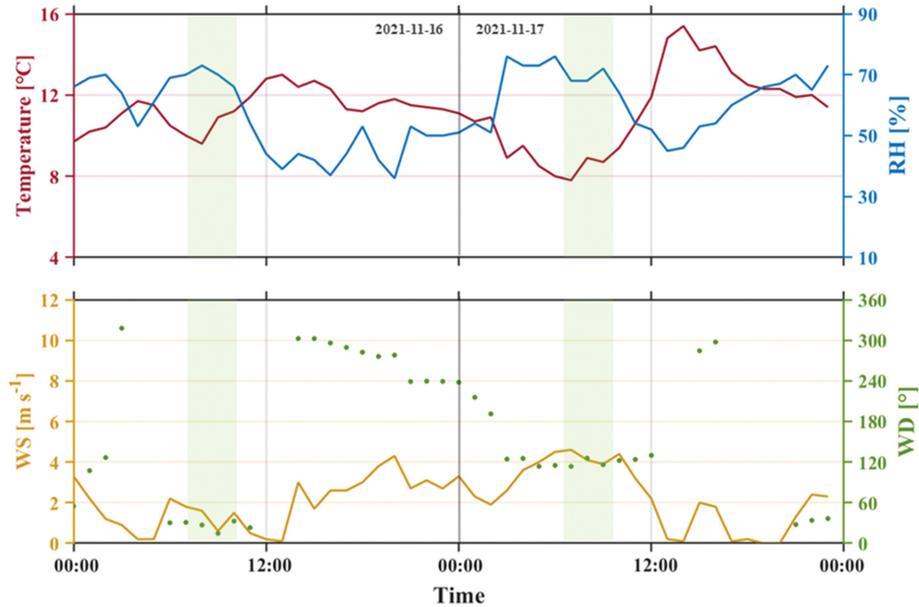


Fig. 3. Weather overview for Dorido AWS on November 16-17, 2021. (Green shading: observation time of the meteorological drone).

3. 결 과

3.1 레윈존데 비교관측을 통한 기상드론의 바람관측 정확도 검증

기상드론 이동관측 정확도를 검증하기 위해 궁평항에서 5 km 떨어진 도리도 AWS (Automatic weather station)의 2021년 11월 16일에서 17일까지의 기상개황을 확인하였다(Fig. 3). 두 관측일은 모두 구름이 없는 맑은 조건이었다. 비교 관측 시간인 0700~1000 LST 사이의 바람은 16일에 풍속 0~2 m s⁻¹, 풍향 0~60°, 17일에 풍속 4~5 m s⁻¹, 풍향 120°로 관측시간 동안 변화가 적었다. 반면 기온은 일출(0700 LST) 이후 지표가열로 1~2°C 상승하고 있으며, 이는 대기연직구조의 일변화가 나타나는 조건으로 다양한 연직구조를 통해 기상드론의 이동관측 정확도를 검증하기에 적합하였다.

Figure 4에는 기상드론과 레윈존데의 11월 16일과 17일의 연직관측 결과를 직접적으로 비교할 수 있는 연직분포 그래프를 나타냈다. 11월 16일의 0720~0820

LST 관측에서 기상드론의 풍속은 50 m 고도 이내에서 0~2 m s⁻¹로 나타났으며, 고도에 따라 증가하여 약 100 m 고도부터 5 m s⁻¹의 풍속이 관측되었다(Fig. 4a). 레윈존데는 지상 약 2 m s⁻¹의 풍속이 고도에 따라 증가하여 100 m 고도 이후로는 5 m s⁻¹ 이상으로 증가하여 기상드론과 동일한 분포를 보였다(Fig. 4b). 0840~1020 LST 관측에서 지상부근의 2 m s⁻¹ 이하의 약한 풍속 구간이 200~300 m 고도까지 증가하였으며, 풍향은 모든 관측 회차와 고도에서 북풍계열로 나타났다. 이러한 주요 관측 특징은 두 장비에서 동일하게 관측되었다.

11월 17일의 0710 LST 관측에서 기상드론과 존데의 풍속은 지상에서 약 3 m s⁻¹로 나타났으며 100 m 고도까지 감소하였다(Figs. 4c, d). 이후 풍속이 증가하여 500 m 고도에서는 다시 3 m s⁻¹의 풍속이 나타나 두 장비의 관측 경향과 값이 유사함을 확인할 수 있다. 풍향은 100 m 고도 이하에서 북동풍, 100~200 m 고도에서 북풍, 200~300 m 고도에서 북서풍, 300 m 고도 이상에서 서풍이 나타났다. 이는 고도에 따라 시

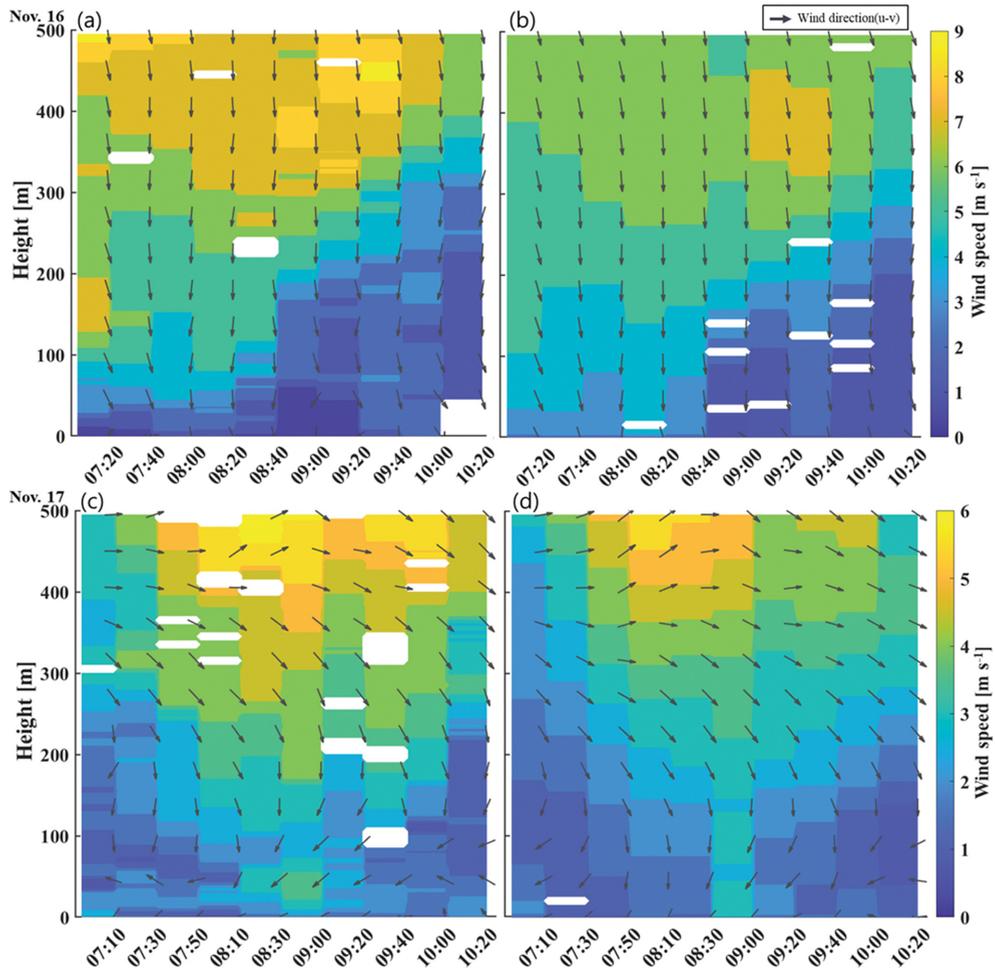


Fig. 4. Vertical profile of wind speed (color) and horizontal wind direction (arrow) for each flight of the meteorological drone (a, c) and rawinsonde (b, d) on November 16 and 17, 2021.

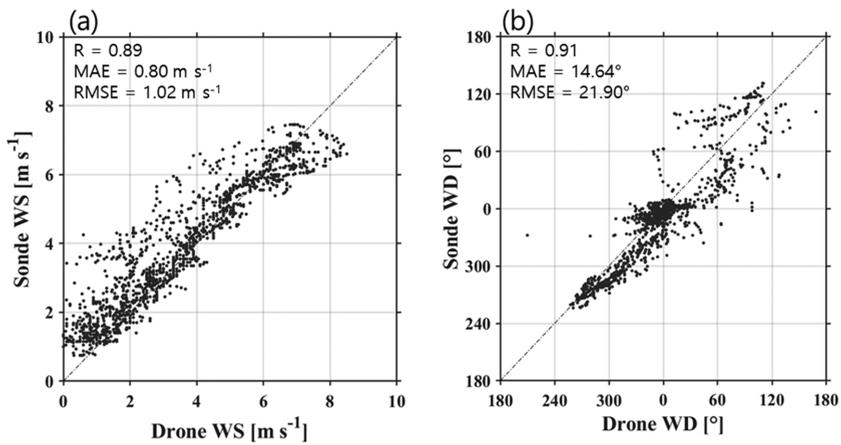


Fig. 5. Comparison of wind data observed by meteorological drone and rawinsonde. (a) Wind speed, (b) Wind direction.

계 반대방향으로 반전하는 풍향 분포이며 두 장비에서 동일하게 관측하였다.

종합적으로 11월 16일과 17일의 연직분포 관측결과에서 기상드론과 레윈존데는 시간에 따른 연직구조의 변화를 유사하게 관측하였다. 다만 16일 0720 LST 관측의 150 m 부근의 풍속 증가와 17일의 전체 관측시간 동안 50 m 이하의 풍속 증가 구간이 레윈존데에서는 명확히 나타나지 않아 기상드론을 통해 더 세밀한 풍속변화 관측이 가능하였다.

기상드론이 연직관측에 적합한지 명확히 확인하기

위하여 Fig. 5와 같이 산점도를 나타냈으며 상관계수 (r), 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE), 평균 제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 산출하였다. 기상드론과 레윈존데로 관측된 풍속의 상관계수는 0.93으로 상관성이 높았다. 또한 풍속의 MAE와 RMSE는 각각 0.7 m s^{-1} , 0.85 m s^{-1} 로 실외측기검정기준($\pm 1 \text{ m s}^{-1}$) 이내로 나타나 두 관측결과가 매우 유사함을 확인하였다. 풍향의 상관계수(0.91)는 풍속과 마찬가지로 높았으며, MAE와 RMSE는 각각 14.26° 와 20.93° 으로 검정 기준($\pm 5^\circ$)에 들지 못하였으나 30°

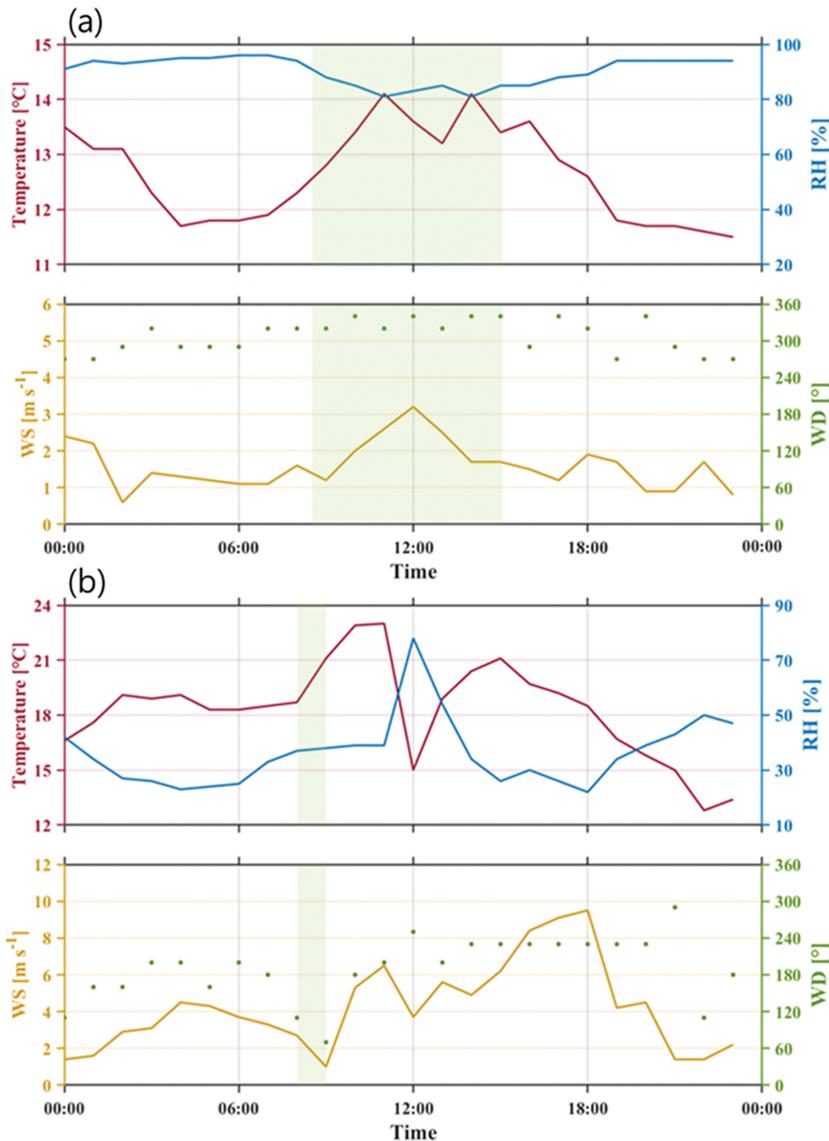


Fig. 6. Weather overview for Bukgangneung ASOS for (a) April 23, 2021 and (b) May 7, 2021. (Green shading: observation time of meteorological drone).

이내의 차이로 같은 계열의 풍향이 관측되었다. 이러한 결과는 기존에 수행된 기상드론 정지관측자료와 연직관측장비의 비교 연구의 정확도와 유사하였다. 서론에서 언급된 Palomaki et al. (2019)의 기상드론과 10 m 높이의 기상타워의 비교 결과에서 RMSE의 범위는 풍속과 풍향 각각 $0.27\sim 0.67\text{ m s}^{-1}$, $25\sim 56^\circ$ 로 확인하였으며, 간접적 방법으로 산출한 기상드론과 기상타워 간 풍속, 풍향의 RMSE는 각각 $0.3\sim 0.9\text{ m s}^{-1}$, $10\sim 21^\circ$ 로 나타났다. Shimura et al. (2018)의 연구에서는 기상드론의 2차원 풍향풍속계와 55 m 높이 타워의 에어로베인 풍향풍속계를 비교하였다. 두 장비 간의 풍속과 풍향 편차는 각각 0.5 m s^{-1} , -9° 였으며, RMSE는 각각 0.6 m s^{-1} , 12° 로 나타났다. 본 연구와 정지관측을 활용한 두 선행연구에서 공통적으로 제시된 RMSE의 차이는 최대 0.28 m s^{-1} 와 8.93° 로 유사하였다. 결과적으로 비교관측 연구를 통해 기상드론

이동 관측 자료의 정확도를 확보할 수 있었으며, 기상드론으로 1 m 고도, 30분 간격 이내의 시공간적 고해상도 연직바람 관측자료의 생산이 가능함을 확인하였다.

3.2 기상드론을 활용한 연직 관측공백 해소

3.1절의 기상드론 검증결과를 바탕으로 기상드론의 이동관측 자료를 윈드프로파일러의 연직 관측공백 해소에 적용하고자 한다. 먼저 기상드론의 연직 관측공백 해소를 위해 다양한 연직구조의 변화가 나타날 수 있는지 확인하고자 북강릉 ASOS (Automated Synoptic Observing System)의 2021년 4월 23일 지상관측자료를 확인하였다(Fig. 6a). 날씨는 구름이 약간 있는 날씨로 기온은 일출(0529 LST) 이후 12°C 에서 1500 LST에 14°C 로 2°C 증가하였으며 같은 시간 상대습도는 감소하였다. 기상드론 관측시간 동안 풍향은 주로 북

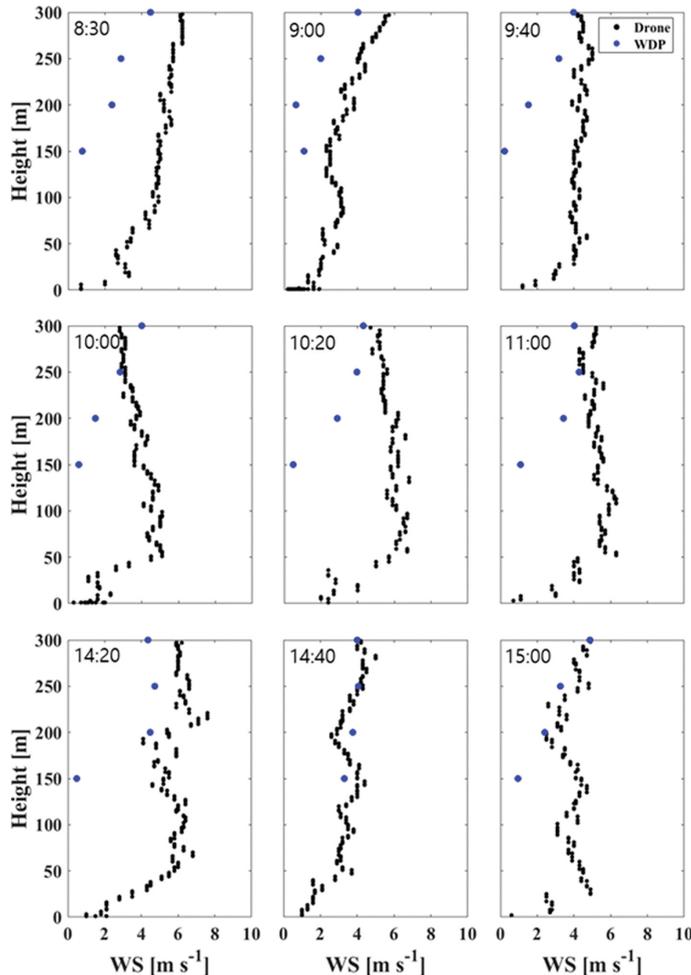


Fig. 7. Vertical profile of wind speed from meteorological drone and wind profiler on April 23, 2021.

서풍을 나타냈으며, 풍속은 오전시간 약 1 m s^{-1} 에서 3 m s^{-1} 까지 증가한 후 정오를 지나 서서히 감소하였다. 이는 기상요소의 일변화 패턴으로 판단된다. 반면 5월 7일의 지상관측자료는 일변화 패턴을 보이지 않았다(Fig. 6b). 기상드론 관측시간 동안 기온은 3°C 이상 증가한 반면 상대습도는 약 40%로 유지되었고, 풍향은 남풍(180°)에서 북동풍(60°)으로 변화하며 풍속이 감소하였다. 관측시간 이후 정오에는 강수로 인해 2시간 동안 8°C 이상의 기온변화와 함께 30% 이상의 상대습도 변화가 나타났다. 이후 풍속은 서서히 증가하여 1800 LST에는 9 m s^{-1} 이상 강하게 나타나 종관적인 영향이 크다고 판단되었다. 따라서 해당 기간의 연직구조 분석을 통해 다양한 환경에서 연직 관측공백 해소가 가능할 것으로 판단하였다.

Figure 7은 4월 23일의 기상드론과 윈드프로파일러의 연직 풍속관측 결과이다. 기상드론으로 관측된 풍

속은 지상에서 $0\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 로 나타났으며 고도에 따라 증가하여 150 m 고도에서는 $2\sim 6 \text{ m s}^{-1}$ 이었다. 이러한 기상드론으로 관측된 풍속의 분포는 윈드프로파일러에서 관측된 150 m 고도의 풍속과 자연스럽게 이어졌다. 특히 1440 LST에서 기상드론과 윈드프로파일러에서 관측된 150 m 고도의 풍속 차이는 1 m s^{-1} 이내였으며, 이후 300 m 고도까지 두 장비는 동일한 연직구조를 나타냈다. 그 외에 오전시간(0940~1100 LST)에는 250~300 m, 1500 LST에서는 200 m로 풍속이 일치하는 고도가 나타났으나 일정하지는 않았다. 그러나 두 장비의 관측 값이 일치한 후에는 동일한 분포를 보여 기상드론으로 윈드프로파일러의 풍속에 대한 연직 관측공백 해소가 가능하였다. 다만 일치하는 고도가 일정하지 않은 부분에 대한 설명은 5월 7일 관측결과 이후 논의하였다.

기상드론의 풍향은 0830 LST에서 지상부터 상층까

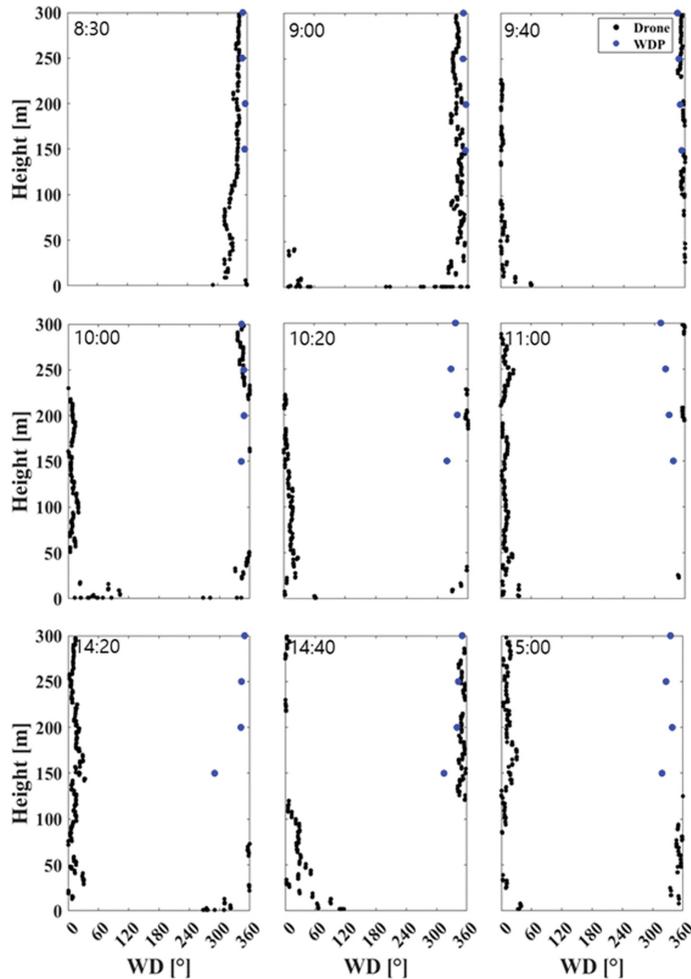


Fig. 8. Vertical profile of wind direction from meteorological drone and wind profiler on April 23, 2021.

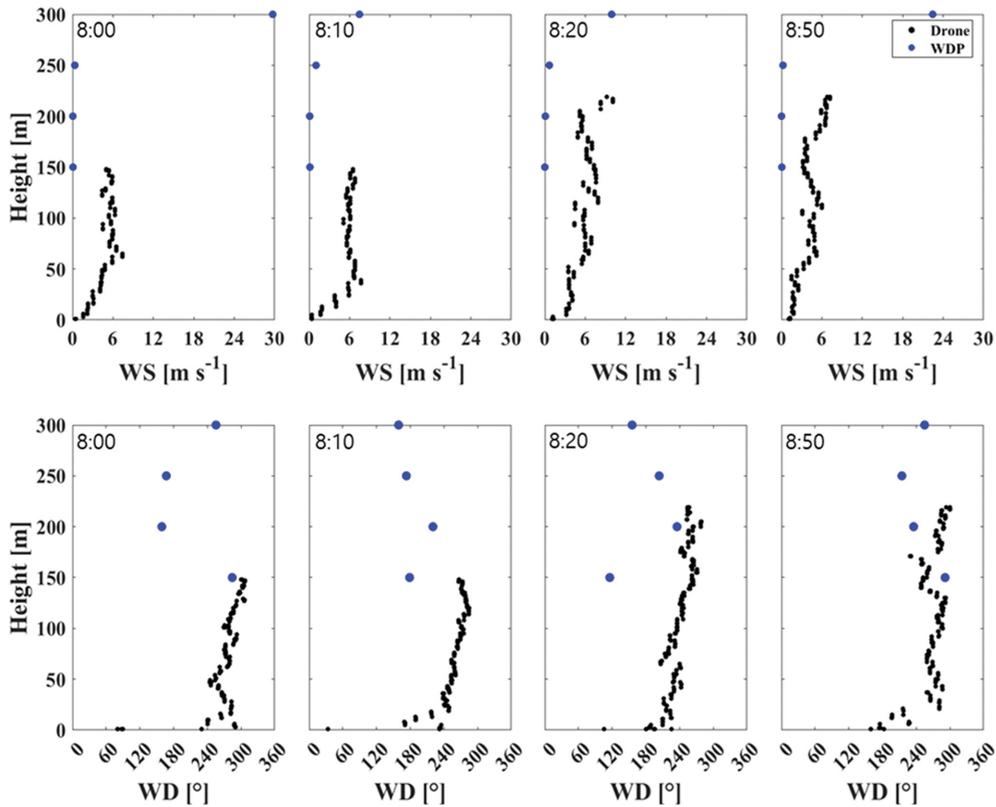


Fig. 9. Vertical profile of wind speed and direction from meteorological drone and wind profiler on May 7, 2021.

지 300~360°(북서~북풍)로 관측되었다(Fig. 8). 이후 시간에 따라 점차 0~60°(북~북동풍)로 변화하였다. 특히 오후 시간(1420~1500 LST)에는 100 m 고도 이하에서 최대 120°까지 풍향이 변화하는 특징을 보였다. 윈드프로파일러의 풍향은 모든 시간대에서 300~360°(북서~북풍)가 관측되어 0830~1000 LST까지 기상드론과 풍향의 차이는 30° 이하였다. 이후 1020 LST부터는 기상드론과 90° 차이의 풍향 분포를 보였으나 두 풍향은 모두 북풍계열로 동일하였다. 특히 1420~1500 LST의 100 m 고도 이하의 풍향변화는 윈드프로파일러의 관측공백 구간의 관측자료이기 때문에 기상드론을 활용하여 150 m 고도 이하의 풍향에 대한 연직 관측공백 해소가 가능하였다.

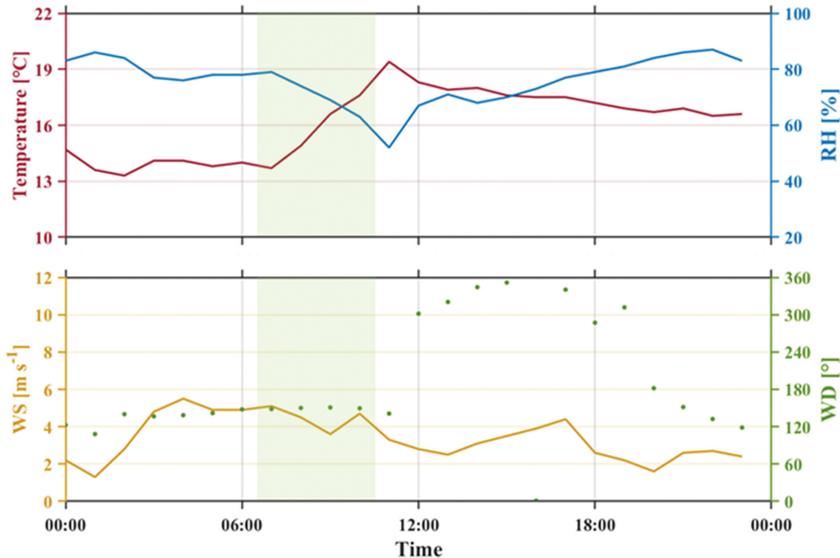
반면 5월 7일의 윈드프로파일러는 앞선 4월 23일과 다르게 풍속이 일치하는 구간이 나타나지 않았다(Fig. 9). 윈드프로파일러에서는 네 번의 관측에서 250 m 고도까지 0~1 m s⁻¹의 약한 바람이 관측되었다. 300 m 고도에서는 풍속이 급격히 증가하여 0810 LST와 0820 LST에 6 m s⁻¹와 12 m s⁻¹의 바람이 관측되었고 0800 LST와 0850 LST에서는 23 m s⁻¹와 30 m s⁻¹에 가까운 강한 바람이 관측되었다. 반면 기상드론은 네 시간대

에서 지상 부근의 3 m s⁻¹ 이내의 풍속이 100 m 고도에서는 6 m s⁻¹까지 증가하였으며, 0820 LST의 220 m 고도 풍속은 12 m s⁻¹ 이상으로 관측되어 두 장비가 일치하는 구간을 찾을 수 없었다. 풍향의 경우 기상드론은 20~30 m 고도 이내에서 60~240° 사이의 변동성을 보였으며 100 m 고도 이상에서는 240~300°(남서~북서풍) 사이로 수렴하였다. 윈드프로파일러의 풍향은 30분 이내의 짧은 관측간격에도 불구하고 일정한 연직 분포를 보이지 않았으며 특히 150 m 고도의 풍향은 120~300°(남동~북서풍)로 변화하였다. 두 장비가 일치하는 구간은 0820 LST의 200 m 고도, 0850 LST의 150 m 고도 이외에 나타나지 않았다. 관측에 사용된 기상드론(Matrice 600 pro)의 정확도는 3.1절에서 확인되었다. 따라서 윈드프로파일러로 관측된 풍속이 실제보다 약했으며, 풍향도 실제 풍향과 다르게 관측되어 두 장비간 관측 결과의 차이가 발생했다고 판단된다.

이는 윈드프로파일러의 대기하층 관측 특성에 의한 것으로 생각된다. 윈드프로파일러는 동, 서, 남, 북, 연직 방향의 빔을 통해 움직이는 입자의 시선속도를 관측하고 이를 조합하여 바람의 u (동-서빔), v (남-북빔),

Table 6. Statistical analysis of wind speed and direction observed by meteorological drone and wind profiler.

	150 m		200 m		250 m		300 m	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Wind speed [m s^{-1}]	3.89	4.23	2.53	3.27	1.42	1.68	1.46	1.76
Wind direction [$^{\circ}$]	43.92	58.64	26.60	31.37	22.19	30.71	22.43	28.08

**Fig. 10.** Weather overview for Mallipo AWS on October 13, 2022. (Green shading: observation time of meteorological drone).

w (연직범) 성분을 산출한다. 그러나 기상 조건에 의해 빔의 굴절 정도가 달라지며 지형에서 반사되는 0 m s^{-1} 의 시선속도가 불규칙적으로 관측될 수 있다. 이 경우 실제보다 낮은 풍속을 산출하게 된다(Kim et al., 2015; Jo et al., 2019). 실제로 두 장비간 풍속과 풍향의 MAE와 RMSE는 150 m 고도에서 3.89 m s^{-1} 와 43.92° , 300 m 고도에서 각각 1.46 m s^{-1} , 22.43° 로 나타났으며 고도가 높아질수록 감소하였다(Table 6). 따라서 기상드론 관측자료는 150 m 고도 이하의 연직 관측공백 해소뿐만 아니라 기상드론 비행이 가능한 1 km 고도 내에서 지형에 영향을 받는 윈드프로파일러의 관측자료를 보완하는데 활용할 수 있을 것이다.

3.3 기상드론을 활용한 시간 관측공백 해소

지표 가열에 의한 대기연직구조 변화를 분석하기 위해 학암포에서 약 14 km 떨어진 만리포 AWS의 2022년 10월 13일 지상관측자료를 확인하였다(Fig. 10). 날씨는 구름없이 맑았으며, 일출 이후 오전 시간 동안 기온은 5°C 증가, 상대습도는 30% 감소하며 일반적인 일변화가 나타났다. 반면 관측 시간 동안 풍향은 남-남동풍($120^{\circ}\sim 180^{\circ}$)으로 풍속은 $4\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ 로 변

화가 거의 나타나지 않았다. 관측시간 이후에는 해안 바람의 유입으로 1100~1200 LST 사이에 풍향이 150° 에서 300° 로 급격히 변하면서 기온이 낮아졌다. 다만 이는 기상드론 관측시간 이후이기 때문에 오전시간 대기의 연직 구조변화 분석이 가능하다고 판단하였다.

Figure 11는 2022년 10월 13일 기상드론과 레윈존테의 연직관측결과이다. Figure 11a에서 레윈존테로 관측된 0643 LST의 기온은 지상에서 약 12°C 였으며 고도에 따라 증가하여 100 m에서는 15°C 로 이 구간 내에 역전층이 형성되어 있다. 3시간 뒤인 0944 LST의 기온은 지상에서 16°C 로 가장 높고 고도에 따라 낮아져 역전층이 해소되었음을 알 수 있다. 이러한 조건에서 풍속은 역전층 상단(100 m) 부근에서 $5\sim 6 \text{ m s}^{-1}$ 로 가장 강하게 나타났다(Fig. 11b). 이후 역전층이 해소된 0944 LST에서는 200~300 m 사이에서 $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ 로 전체 고도 중 가장 강한 풍속이 나타났다.

30분 간격으로 관측한 기상드론 관측결과에서도 레윈존테와 동일한 역전층 변화를 확인할 수 있었다(Fig. 11c). 레윈존테 비양 후 30분 뒤인 0712 LST의 기온은 지상에서 12°C 로 가장 낮았으며 고도에 따라 증가하여 100 m에서 15°C 로 역전층이 형성되어 있다. 이

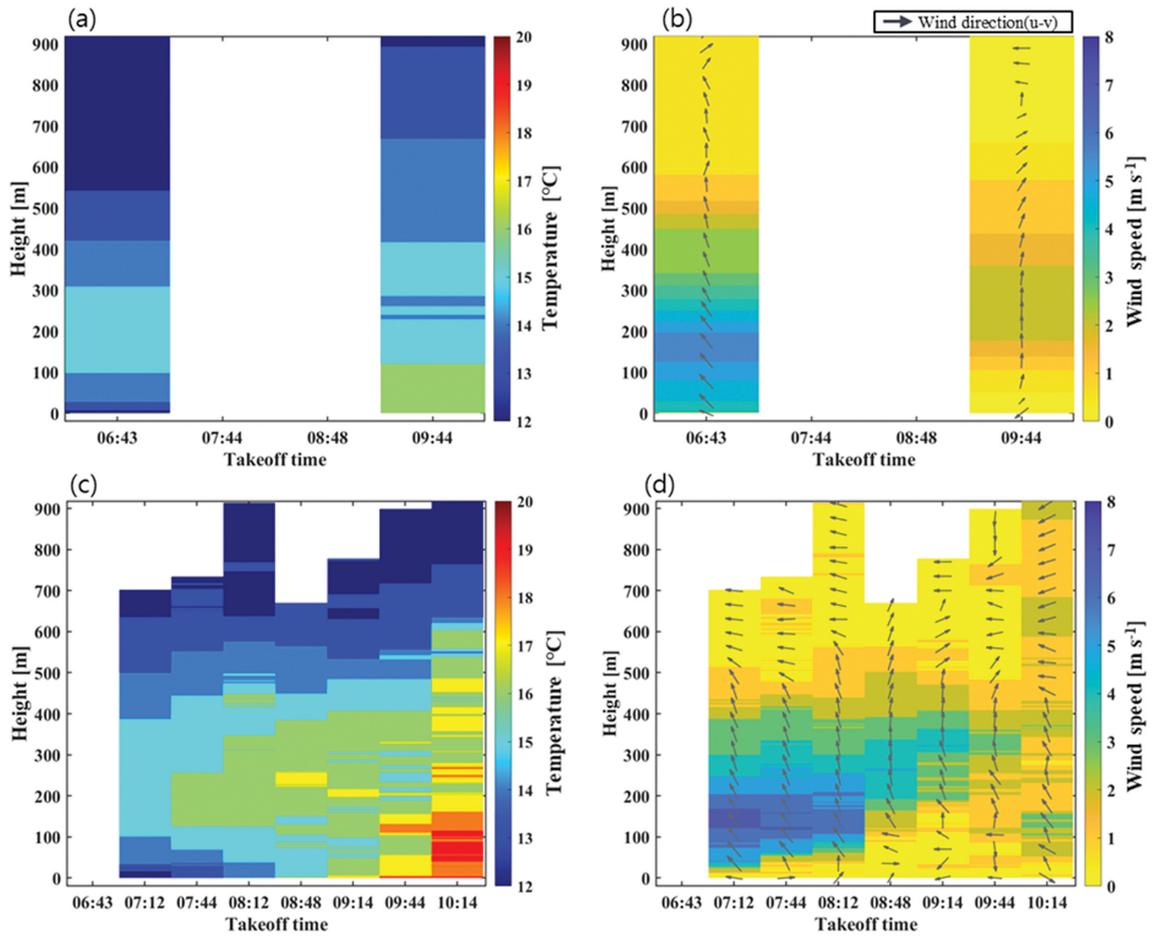


Fig. 11. Vertical observation results of meteorological drone and rawinsonde on October 13, 2022. (a, b) Temperature and wind observed by rawinsonde, (c, d) Temperature and wind observed by meteorological drone.

후 지표가열에 따라 지상과 100 m 사이의 기온 차는 0744 LST에 2°C, 0812 LST에 1°C로 변화하며 역전층이 점차 해소되었다. 이러한 조건에서 역전층 상단(100~400 m)의 풍속은 지상의 풍속($\sim 1 \text{ m s}^{-1}$)과 다르게 최대 7 m s^{-1} 이상 강하게 나타났다(Fig. 11d). 이후 지상의 낮은 풍속구간이 0744 LST에서 0914 LST까지 50 m에서 150 m로 점차 확대되었다. 이에 따라 최대 400 m 고도의 강풍구간은 1014 LST까지 점차 사라지는 연직 분포를 보였다. 이러한 연직바람분포는 맑은 날 복사냉각이 강한 조건에서 발생하는 야간 하층제트의 소산과정으로 판단된다. 일반적으로 야간 하층제트는 500 m 고도 이하에서 발생하며 이른 아침시간에 최대풍속이 나타난 후 대기혼합으로 소산된다(Ziemann et al., 2020; Weide Luiz and Fiedler, 2022). 3시간 간격의 레윈존데 관측은 수 시간 내에 변화하는 연직구조를 명확히 관측할 수 없었다. 반면

기상드론은 30분 간격의 관측으로 레윈존데의 시간적 관측공백을 해소하고 대기 연직구조의 변화를 상세히 관측하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 드론에 센서를 장착(직접적 관측방법)하고 상승비행하며 관측(이동관측)된 자료의 정확도를 확보하기 위하여 가상드론과 레윈존데를 비교관측 하였으며, 이를 바탕으로 레윈존데와 윈드프로파일러의 시공간적 관측 공백을 해소하고자 하였다.

기상드론을 이용한 이동관측의 정확도를 확보하기 위해 1 m s^{-1} 의 상승속도로 연직 비행하여 1 m 간격의 관측자료를 생산했으며, 최소 20분 간격으로 3일간 총 24회 레윈존데와 비교관측을 수행하였다. 두 장비의 풍속의 상관계수는 0.93이었으며 평균절대오차

(MAE)는 0.70 m s^{-1} 로 실외측기 검정기준인 $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$ 보다 작아 두 관측결과가 유사하였다. 풍향의 상관계수는 0.91로 풍속과 마찬가지로 높았다. 그러나 MAE는 14.26° 로 실외측기 검정기준($\pm 5^\circ$) 안에는 들지 못하였으나, 30° 이내의 차이로 같은 계열의 풍향을 관측하였다. 풍속과 풍향의 평균제곱근오차(RMSE)는 각각 0.5 m s^{-1} 와 22.06° 로 나타났으며, 이는 정지관측 방식의 정확도 확보를 위한 연구 사례에서 풍속과 풍향의 RMSE ($0.27\sim 0.90 \text{ m s}^{-1}$, $10\sim 56^\circ$)와 유사한 수치이다. 따라서 기상드론의 이동관측 방법은 바람을 고 해상도(1 m 간격, 20분 간격)로 관측이 가능함을 확인하였다.

이를 바탕으로 기상드론의 이동관측자료를 활용해 윈드프로파일러의 150 m 고도 이하 관측공백을 해소하고자 하였다. 4월 23일의 경우 기상드론은 관측공백 구간인 150 m 고도 내 풍속과 풍향의 변동성을 관측하였다. 또한 150 m 고도의 두 장비 간 풍속 차와 풍향 차는 1 m s^{-1} 와 30° 이내였으며, 이후 300 m 고도까지 경향이 동일하여 기상드론이 윈드프로파일러의 하층 공백을 해소할 수 있었다. 다만 일부 시간대에서 두 장비간 편차가 커지는 경향을 보였는데 이는 5월 7일 관측결과에서 더 뚜렷하게 나타났다. 5월 7일의 경우 기상드론은 250 m 고도까지 6 m s^{-1} 의 풍속을 관측한 반면 윈드프로파일러는 1 m s^{-1} 의 풍속을 관측하였다. 또한 풍향은 기상드론에서 $240\sim 300^\circ$ 사이의 변동성을 보인 반면 윈드프로파일러는 150 m 고도에서 $120\sim 300^\circ$ 까지 큰 변동성을 보였다. 이는 기존 연구 사례를 바탕으로 지형에서 오는 방해신호에 의한 오차로 판단하였다. 따라서 기상드론은 150 m 고도 이하의 관측공백 해소뿐만 아니라 대기하층에서 윈드프로파일러의 불확실한 관측자료를 보완하는데 활용할 수 있을 것이다.

시간 관측공백 해소는 일출 직후 이른 오전시간 대기연직구조 파악을 위한 기상드론과 레윈존데 공동 관측 사례를 통해 확인하였다. 공동 관측에서 기상드론은 30분 간격으로 비행하였으며, 레윈존데는 3시간 간격으로 비양하였다. 레윈존데의 관측자료에서 기온 분포를 통해 일출 직후 100 m 고도 부근의 역전층 구간에서 풍속이 가장 강한 것을 확인하였다. 기상드론 관측결과에서도 동일한 역전층과 강풍구간을 확인하였으며, 특히 지표 부근의 기온 상승과 함께 상층의 강풍구간이 사라지는 상세한 관측결과를 통해 야간 하층제트의 소산과정으로 판단할 수 있었다. 결과적으로 기상드론이 레윈존데만으로 확인할 수 없었던 바람의 연직구조를 관측함으로써 레윈존데의 시간 관측공백을 해소할 수 있었다.

이번 연구에서 기상드론은 1 km 이하의 대기하층에서 고해상도 바람관측자료를 확보하고 레윈존데와 윈

드프로파일러의 시공간적 관측공백을 해소하는데 활용하였다. 기상드론은 필요한 지역으로 이동하여 관측할 수 있기 때문에 공간적 해상도를 높이는 데 활용할 수 있다. 다만 기상여건과 배터리의 한계로 관측고도를 확대하고 다양한 환경에 적용하기에 어려운 단점이 존재한다. 그러나 대기하층의 정확한 관측자료를 얻기 위해 다양한 관측장비가 사용되고 있는 만큼, 기상드론은 연직바람관측 장비 중 하나로써 활용하여 시공간적 해상도를 높이는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 “관측기술 지원 및 활용연구(KMA2018-00123)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Adkins, K. A., C. J. Swinford, P. D. Wambolt, and G. Bease, 2020: Development of a sensor suite for atmospheric boundary layer measurement with a small multirotor unmanned aerial system. *Int. J. Aviation Aeronautics. Aerospace*, **7**, 1-14, doi:10.15394/IJAAA.2020.1433.
- Bell, T. M., B. R. Greene, P. M. Klein, M. Carney, and P. B. Chilson, 2020: Confronting the boundary layer data gap: evaluating new and existing methodologies of probing the lower atmosphere. *Atmos. Measurement Techniques*, **13**, 3855-3872, doi:10.5194/amt-13-3855-2020.
- Cho, Y.-J., T.-Y. Kwon, and B.-C. Choi, 2015: Characteristics of meteorological variables in the leeward side associated with the downslope windstorm over the yeongdong region. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **36**, 315-329, doi:10.5194/amt-13-3855-2020.
- Chong, J. H., S. H. Lee, S. S. Shin, S. E. Hwang, Y.-T. Lee, J. Y. Kim, and S. B. Kim, 2019: Research on the meteorological technology development using drones in the fourth industrial revolution. *J. Korea Contents Assoc.*, **19**, 12-21, doi:10.5392/JKCA.2019.19.11.012.
- _____, S. S. Shin, S. E. Hwang, S. H. Lee, S.-H. Lee, B.-J. Kim, and S. B. Kim, 2020: Vertical measurement and analysis of meteorological factors over boseong region using meteorological drones. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **41**, 575-587, doi:10.5467/JKES.2020.41.6.575.
- Greene, B. R., A. R. Segales, T. M. Bell, E. A. Pillar-Little, and P. B. Chilson, 2019: Environmental and sensor

- integration influences on temperature measurements by rotary-wing unmanned aircraft systems. *MDPI Sensors*, **19**, 1470, doi:10.3390/s19061470.
- Hedworth, H., J. Page, J. Sohl, and T. Saad, 2022: Investigating errors observed during UAV-based vertical measurements using computational fluid dynamics. *Drones*, **6**, 253, doi:10.3390/drones6090253.
- Hemingway, B. L., A. E. Frazier, B. R. Elbing, and J. D. Jacob, 2017: Vertical sampling scales for atmospheric boundary layer measurements from small unmanned aircraft systems (sUAS). *Atmosphere*, **8**, 176, doi:10.3390/atmos8090176.
- Jo, W.-G., B.-H. Kwon, and H.-J. Yoon, 2019: Clutter fence effect on data quality of ultra high frequency radar. *J. Korea Institute of electronic Commun. Sci.*, **14**, 275-282, doi:10.13067/JKIECS.2019.14.2.275.
- _____, 2020: Quality Control of Wind Profiler Doppler Spectrum Data. Master thesis, Pukyong National University. 110 pp [Available online at <https://repository.pknu.ac.kr:8443/bitstream/2021.oak/23751/2/Quality%20Control%20of%20Wind%20Profiler%20Doppler%20Spectrum%20Data.pdf>].
- Kim, K.-H., M.-S. Kim, S.-W. Seo, P.-S. Kim, D. H. Kang, and B. H. Kwon, 2015: Quality evaluation of wind vectors from UHF wind profiler using radiosonde measurements. *J. Environ. Sci. Int.*, **24**, 133-150, doi:10.5322/JESI.2015.24.1.133.
- Kim, Y.-I., S. K. Ku, and C. H. Park, 2018: Flow analysis and flight experiment for optimum height of weather data sensor. *J. Advanced Navigation Technol.*, **22**, 551-556, doi:10.12673/jant.2018.22.6.551.
- Kwak, K.-H., J.-J. Baik, S.-H. Lee, and Y.-H. Ryu, 2011: Computational fluid dynamics modelling of the diurnal variation of flow in a street canyon. *Bound.-Layer Meteor.*, **141**, 77-92, doi:10.1007/s10546-011-9630-4.
- Laroche, S., and R. Sarrazin, 2013: Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification. *Wea. Forecasting*, **28**, 772-782, doi:10.1175/WAF-D-12-00114.1.
- Neumann, P. P., and M. Bartholmai, 2015: Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit. *Sensors and Actuators A: Physical*, **235**, 300-310, doi:10.1016/j.sna.2015.09.036.
- Ng, E., C. Yuan, L. Chen, C. Ren, and J. C. H. Fung, 2011: Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, **101**, 59-74, doi:10.1016/j.landurbplan.2011.01.004.
- Oude Nijhuis, A. C. P., and Coauthors, 2018: Wind hazard and turbulence monitoring at airports with lidar, radar, and mode-S downlinks: The UFO project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 2275-2293, doi:10.1175/BAMS-D-15-00295.1.
- Palomaki, R. T., N. T. Rose, M. V. D. Bossche, T. J. Sherman, and S. F. J. De Wekker, 2017: Wind estimation in the lower atmosphere using multirotor aircraft. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **34**, 1183-1191, doi:10.1175/JTECH-D-16-0177.1.
- Samad, A., D. A. Florez, I. Chourdakis, and U. Vogt, 2022: Concept of using an unmanned aerial vehicle (UAV) for 3D investigation of air quality in the atmosphere—example of measurements near a roadside. *MDPI Atmosphere*, **13**, 663, doi:10.3390/atmos13050663.
- Schiano, F., J. Alonso-Mora, K. Rudin, P. Beardsley, R. Siegwart, and B. Sicilianok, 2014: Towards estimation and correction of wind effects on a quadrotor UAV. *ETH Zurich*. doi:10.3929/ETHZ-A-010286793.
- Segales, A. R., B. R. Greene, T. M. Bell, W. Doyle, J. J. Martin, E. A. Pillar-Little, and P. B. Chilson, 2020: The CopterSonde: an insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research. *Atmos. Measurement Techniques*, **13**, 2833-2848, doi:10.5194/amt-13-2833-2020.
- Shimura, T., M. Inoue, H. Tsujimoto, K. Sasaki, and M. Iguchi, 2018: Estimation of wind vector profile using a hexarotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above surface. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **35**, 1621-1631, doi:10.1175/JTECH-D-17-0186.1.
- Varentsov, M., V. Stepanenko, I. Repina, A. Artamonov, V. Bogomolov, N. Kuksova, E. Marchuk, A. Pashkin, A., and Varentsov, 2021: Balloons and quadcopters: intercomparison of two low-cost wind profiling methods. *Atmosphere*, **12**, 380, doi:10.3390/ATMOS12030380.
- Watkins, S., M. Thompson, B. Loxton, and M. Abdulrahim, 2010: On low altitude flight through the atmospheric boundary layer. *Int. J. Micro Air Vehicles*, **2**, 55-68, doi:10.1260/1756-8293.2.2.55.
- Weide Luiz, E., and S. Fiedler, 2022: Spatiotemporal observations of nocturnal low-level jets and impacts on wind power production. *Wind Energy Science*, **7**, 1575-1591, doi:10.5194/wes-2022-26.
- Wetz, T., N. Wildmann, and F. Beyrich, 2021: Distributed wind measurements with multiple quadrotor unmanned aerial vehicles in the atmospheric boundary layer

- Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3795-3814, doi:10.5194/amt-14-3795-2021.
- WMO, 2015: Manual on the Global Observing System. World Meteorological Organizaion, 25 pp.
- Ye, X., B. Wu, and H. Zhang, 2015: The turbulent structure and transport in fog layers observed over the Tianjin area. *Atmos. Res.*, **153**, 217-234, doi:10.1016/j.atmosres.2014.08.003.
- Ziemann, A., A. Galvez Arboleda, and A. Lampert, 2020: Comparison of wind lidar data and numerical simulations of the low-level jet at a grassland site. *MDPI Energies*, **13**, 6264, doi:10.3390/en13236264.