

레이더 연직바람 관측장비(Radar Wind Profiler) 개발 및 성능평가

류근수¹⁾ · 이규원^{1),2)*}

¹⁾경북대학교 대기원격탐사연구소, ²⁾경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀

(접수일: 2024년 12월 4일, 수정일: 2024년 12월 17일, 게재확정일: 2024년 12월 18일)

Development of Radar Wind Profiler (RWP) and Accuracy Evaluation

Geunsu Lyu¹⁾ and GyuWon Lee^{1),2)*}

¹⁾Center for Atmospheric REmote Sensing (CARE), Kyungpook National University, Daegu, Korea

²⁾BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Department of Atmospheric Sciences,
Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 4 December 2024; revised 17 December 2024; accepted 18 December 2024)

Abstract This study introduces a domestically developed the Radar Wind Profiler (RWP) and evaluates its performance qualitatively and quantitatively. The newly developed RWP that was installed at the testbed site of the National Typhoon Center in Jeju on March 2021 consists of indoor and outdoor units. The RWP utilizes an active phased array antenna system with 256 elements arranged in a 16×16 grid, allowing continuous steering of beams for azimuth angles from 0° to 360° and zenith angles up to $\pm 20^\circ$. Through in-house signal processing and quality control algorithms, Doppler power spectra and spectral moments are derived. Using the Doppler Beam Swinging (DBS) method, calculates horizontal and vertical winds. Intensive observations were conducted at the testbed site from June 20 to August 19, 2021. To optimize the quality control of RWP radial velocities, data from the high-mode observations over nine months (March to November 2021) were analyzed to determine quality control thresholds. The performance of RWP was validated by comparison with rawinsonde observations that are launched from June 20 to August 19, 2021. Results show high accuracy and reliability with root mean square errors (RMSE) of 0.99 m s^{-1} for wind speed, 8.27° for wind direction, success operational ratio of 97.7%. The performance improved notably in the latter part of the observation period of rawinsondes. Signal-to-noise ratio (SNR) and valid ratio of data tended to decrease with altitude, with an average valid ratio of 98.5% and an average SNR of 42.8 dB between 400 m and 3 km.

Key words: Radar wind profiler, Signal processing, Phased array antenna, Quality control, Doppler beam swinging

1. 서 론

바람 관측은 크게 지점관측(in-situ)과 원격탐사관측으로 구분할 수 있다. 지점관측은 풍향풍속계, 라디오

존데 등을 이용하여 바람의 방향과 속도를 직접 측정하는 방식이다. 이 방법은 정확도가 높지만, 관측 지점이 한정적이고 많은 비용이 들며 악천후 시 관측이 어렵다는 단점이 있다. 원격탐사 관측은 도플러 레이더, 도플러 라이더 등을 통해 다른 물리량을 관측하여 역산을 통해 바람을 간접적으로 추정하는 방식이다(Werner, 2005; Dutta et al., 2016; Garcia-Benadi et al., 2022). 원격탐사 관측은 지점관측에 비해 정확도가 떨어질 수 있지만, 관측범위가 넓고 다양한 기상

*Corresponding Author: GyuWon Lee, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-6360, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: gyuwon@knu.ac.kr

변수를 동시에 관측할 수 있는 장점이 있다.

Gossard et al. (1999)는 기상 현상의 발생과 발달을 이해하는 데 있어 연직바람이 중요한 역할을 한다는 것을 보였으며, 연직바람 자료를 다른 기상변수와 함께 분석하여 연직바람과 기온, 습도 및 전파 굴절지수(refractive index) 간의 상관관계를 분석하였다. Kim and Lee (2015)와 Kim et al. (2022)은 태풍, 집중호우 등 극한 기상현상과 연직바람과의 상관성을 분석하였다. Wu et al. (2023)은 대량의 연직바람 관측자료와 딥러닝 등의 인공지능 기술을 활용한 강수예측 모델이 기존의 강수예측 모델보다 정확도가 향상될 수 있음을 보였다. 연직바람 관측은 기상예보, 기후변화 연구, 대기오염 연구 등 다양한 분야에서 중요하게 활용된다(Augustine and Zipser, 1987; Ruffieux, 1999;

Hong et al., 2015; Kim and Lee, 2015; Oscanoa et al., 2016; Wang et al., 2017; Yuan et al., 2022).

우리나라의 강원영동 지역은 지형적 특성으로 봄철에 강풍으로 인한 산불이 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 이러한 자연재해를 실시간 감시하고 예측하기 위해 활용도가 높은 연직바람 관측장비의 실시간 관측자료 제공이 요구된다(Lee et al., 2006; Lee and Kim, 2011). 그러므로, 실시간 고층바람 관련 정보를 제공할 수 있는 연직바람 관측장비는 재난 및 재해의 예방을 위한 기상관측 장비로써 활용도가 높아지고 있다. 기상청 및 유관기관에서 연직바람 관측장비를 활용하고 있으나 국내 기술력 부재로 인해 100% 해외 수입에 의존하고 있다. 따라서 관측기에 이상 증상 및 장애 발생 시 신속한 대응 또는 조치가 어

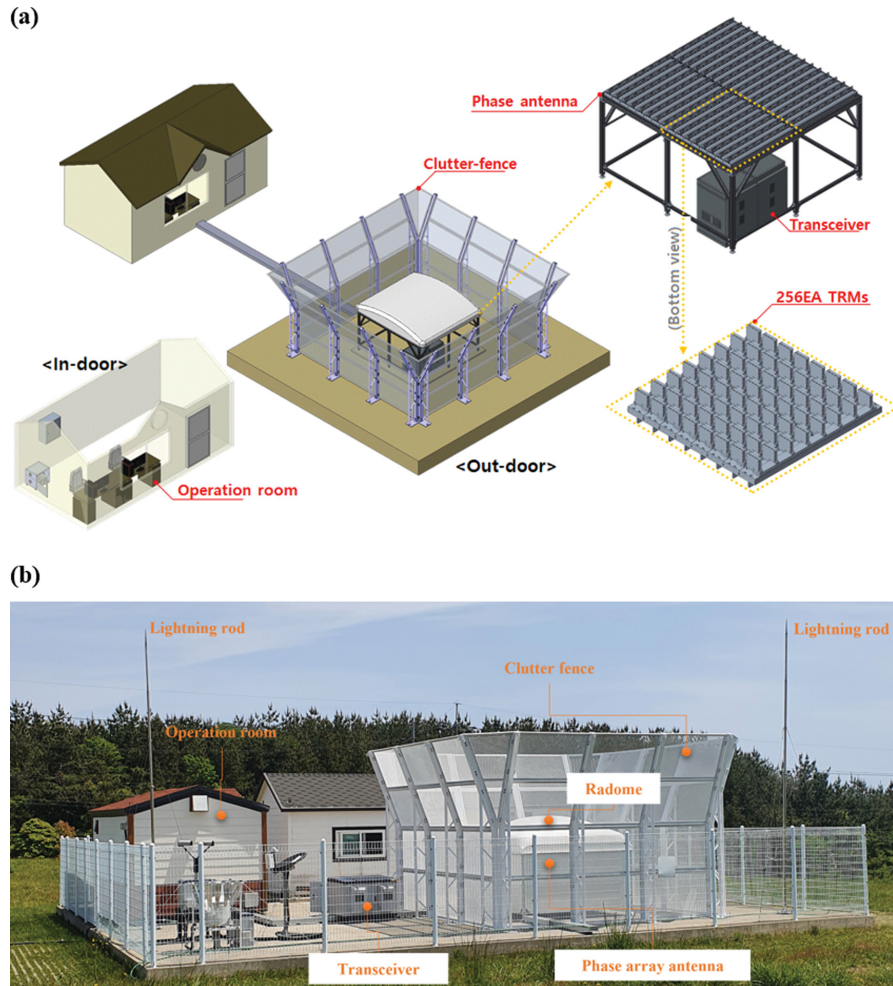


Fig. 1. System of Radar Wind Profiler (RWP). Adapted from Kang et al. (2020). TRMs stands for transmit/receive modules. (a) Configuration diagram of each part of the RWP and (b) installation photo at the National Typhoon Center in Jeju.

러워 관측 업무가 지연되는 일이 발생하고 있다. 연직바람 관측장비의 국산화를 통한 청천대기 관측기술 고도화뿐만 아니라, 무인기, 포병지원, 항공기 지원 등 군사분야에 필요한 고층대기 관측기술 개발과 운영, 유지보수, 활용 기술 고도화를 위한 가이드라인 마련이 필요하다. 국산화를 통해 우리나라의 기상 관측 기술 수준을 향상시키고, 이를 운용하면 장애 발생 시 신속한 대처가 가능하여 관측 지연을 최소화할 수 있다.

본 연구에서는 국내기술로 개발된 연직바람 관측장비를 소개하고 테스트베드 운영을 통한 관측 결과 및 자료 생산결과를 분석하였다. 또한 사운드링 관측자료를 활용하여 연직바람 관측장비의 성능을 정량적으로 평가하였다.

2. 연직바람 관측장비 개발

2.1 하드웨어 구성

본 연구에서 사용된 연직바람 관측장비(Radar Wind Profiler; RWP)는 순수 국내 기술로 하드웨어, 신호처리, 및 자료처리기술을 개발하여 최초 국산화한 장비로, 국가태풍센터 내 테스트베드 부지에 비교관측장비와 함께 설치되었다. RWP는 크게 옥내장치와 옥외장치로 구분된다. 옥내장치에는 셀터와 운영 PC가 있고, 옥외장치는 송수신부, 안테나부, 클러터펜스로 구성된다(Fig. 1). RWP는 능동형 위상배열(active phased array) 안테나 시스템(Srinivasulu et al., 2012)으로 개발되었다. Table 1은 RWP의 주요 규격을 정리한 것이다(Kang et al., 2020). 중심주파수 1.29 GHz와 16 × 16 배열의 총 256개의 안테나로 구성되었으며 전자주사(electronic scanning) 방법을 사용하여 빔 방위각과 천정각을 바꿀 수 있다. 방위각은 0~360°까지 변경이 가능하고, 천정각은 빔형태를 고려하여 ±20°까지 변경이 가능하다.

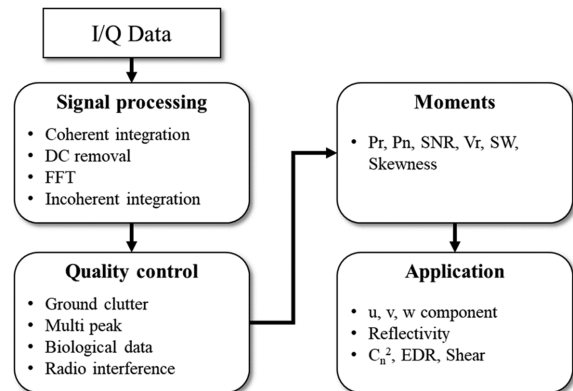


Fig. 2. Software configuration and data processing flow chart.

2.2 소프트웨어 구성

Figure 2는 연직바람 관측장비의 신호처리 및 자료처리 과정을 나타낸 소프트웨어 구성도이다. 연직바람 관측장비 하드웨어에서 생산된 원시 시계열 I/Q 신호로부터 신호처리(signal processing) 과정을 통해 원시 스펙트럼을 생산하고(Lee and Lee, 2020), 지형 에코, 새, 항공기에코, 전파간섭, 다중피크 처리 등의 스펙트럼 품질관리(quality control)가 이루어진다(Kim et al., 2016; Jo, 2020). 다음으로 스펙트럼 자료에 모멘트 적분법을 적용하여 0차에서 3차 모멘트를 산출한다(Lee and Lee, 2020). 적분법으로 산출되는 모멘트는 수신전력(received power; Pr), 시선속도(doppler radial velocity; Vr), 스펙트럼 폭(spectral width; SW), 스펙트럼 왜도(Skewness)이다. 잡음전력(noise power; Pn)은 스펙트럼의 잡음수준으로 산출하고(Hildebrand and Sekhon, 1974), 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio; SNR)는 잡음전력과 수신전력의 비로 산출한다. 끝으로 모멘트 자료를 사용하여 바람성분과 레이더반

Table 1. Specification of radar wind profiler that is adapted from Kang et al. (2020).

Parameter	Specification	Remark
Frequency (fc)	1.29 GHz	Band width: fc ± 5 MHz
Antenna effective aperture × Maximum RF power	14.0 kW·m ² (in operation 26.3 kWm ²)	13.86 kW·m ² (WINDAS corp./Japan)
Array number	256 ea	
Antenna gain	≥ 30 dBi (in operation 29.6 dB)	
Number of beams	5 ea (in operation)	
Beam tilting angle (θ)	±20°	Electronic control

사도, 난류변수 등의 기상변수를 생산하도록 구성되었다.

3. 연구방법 및 자료

3.1 RWP 연직바람 산출

3.1.1 DBS 관측 및 연직바람 산출

대부분의 연직바람 관측장비는 Doppler Beam Swinging (DBS) 방식으로 빔별 시선속도를 관측하고 기상정보를 산출한다. DBS방식은 연직바람 관측장비에서 3개 또는 5개의 시선속도를 획득하여 수평바람과 연직속도를 산출한다(Ecklund et al., 1977; Green et al., 1978). 연직방향과 일정 각도(θ)만큼 기울어진 동·서·남·북쪽 방향으로 방사된 빔은 각 방향의 대기 운동에 따라 도플러 편이(doppler shift)된 전파신호로 수신된다. 특정 고도에서 수평 바람장이 일정하다고 가정하면 3개 방향(연직, 남쪽, 동쪽)의 시선속도로 수평바람을 산출할 수 있지만, 산출오차를 줄이기 위해 5개 빔 방식이 주로 이용된다(Fig. 3).

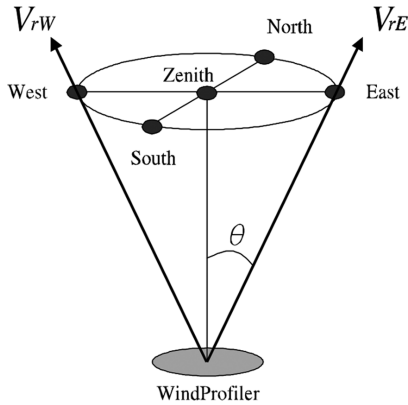


Fig. 3. Schematic diagram of the five beam configuration of the DBS observation of RWP (Baek et al., 2005).

5개 빔의 시선속도 V_{rZ} (연직방향 시선속도), V_{rE} (동쪽방향 시선속도), V_{rW} (서쪽방향 시선속도), V_{rS} (남쪽방향 시선속도), V_{rN} (북쪽방향 시선속도)가 관측되며 3차원 바람장(u, v, w) 성분으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{rE} &= W \cos \theta + u \sin \theta \\ V_{rW} &= W \cos \theta - u \sin \theta \\ V_{rN} &= W \cos \theta + v \sin \theta \\ V_{rS} &= W \cos \theta - v \sin \theta \\ V_{rZ} &= W = w + w_p \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 w_p 는 입자의 평균낙하속도, w 는 바람의 연직성분이다. 식(1)에서 다음과 같이 3차원 바람장을 산출할 수 있다.

$$u = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2 \sin \theta}, v = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2 \sin \theta}, W = W_{rZ} \quad (2)$$

따라서, 5개의 방향으로 관측된 도플러 시선속도를 식(2)에 대입하여 각 고도의 동서성분(u), 남북성분(v), 연직성분(W)을 산출한다(Beak et al., 2005).

Table 2는 본 연구에서 사용된 RWP의 저층(low-mode) 및 고층모드(high-mode)에 대한 관측전략을 정리한 것이다. 연직, 북, 동, 남, 서의 순서로 저층 및 고층모드로 관측이 이루어진다. 본 연구에서는 고층모드의 관측자료가 분석에 사용되었다.

3.1.2 시선속도 품질관리

관측된 시선속도의 공간 연속성 도출을 위해 시선속도에 대한 질감(texture)과 신호대잡음비(SNR)를 사용하였다. 주어진 고도에서의 시선속도 질감은 특정 고도의 시선속도와 이웃하는 시선속도의 차이를 정량화한 것이다. 즉, 질감이 작을수록 변동성이 작고, 반대로 질감이 크면 변동성이 크다는 것을 의미한다. 식(3)은 본 연구에서 사용한 질감 계산식이다(Kwon et al., 2015; Ye et al., 2015).

Table 2. Configuration of low and high-mode strategies for RWP.

Parameter	Low mode	High mode	Unit
Frequency	1290	1290	MHz
Zenith angle (θ)	15	15	°
Beam number	5	5	-
Pulse repetition interval	26.0	74.0	μs
Number of coherent integrations	128	32	-
Number of FFT points	512	512	-
Number of incoherent integrations	31	43	-
Nyquist velocity	17.4	24.5	m s ⁻¹
Horizontal wind speed range	±67.4	±94.8	m s ⁻¹
Range resolution	100	100	m
Number of height gates	33	101	-

$$\delta(V_r) = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=-n/2}^{n/2} (V_r - V_{r,i})^2} \quad (3)$$

여기서 δ 는 산출된 질감, V_r 는 시선속도, n 은 이웃하는 지점의 수를 의미한다. 시선속도 질감을 이용한 품질관리 방법은 매시간 관측된 시선속도로부터 질감을 산출하고 경험적 임계치와 크기를 비교하여 임계치보다 큰 자료는 품질이 낮은 것으로 판단하고 제거하는 것이다. 그런데 이때 사용되는 임계치에 따라 제거되는 정도가 달라지기 때문에 임계치 결정이 매우 중요하다.

3.2 비교검증 관측 수행

RWP가 설치된 제주 국가태풍센터 내 테스트베드 부지에서 2021년 06월 20일부터 08월 19일까지 2개월간 집중관측이 이루어졌다. 수평바람(풍향 및 풍속)의 정량적 성능을 비교검증하기 위해 레윈존데(rawinsonde) 관측이 함께 수행되었다. Table 3은 집중관측 기간 동안 레윈존데 관측일정을 정리한 것이다. 레윈존데 관측은 일반관측과 비교관측으로 구분된다. 일반관측은 RWP의 성능을 검증하기 위한 것이고, 비교관측은 레윈존데 센서간 비교를 위한 것이다. 또한 KNU는 집중관측 동안 비교검증을 위한 비양을 의미하고, KMA는 기상청 현업 레윈존데 비양을 의미한다. 일반관측은 테스트베드에서 남동쪽으로 약 2.4 km 떨어진 펜션에서 이루어졌다. 비교관측은 국가태풍센터내 고층기상관측소에서 동일한 시간에 비양하였다. 일반관측은 집중관측기간동안 하루에 4회 비양을 목표로 하였으나 레윈존데 센서의 조기 소진으로 인해 7월 27일부터 하루 2회로 비양 횟수를 조정하였다.

3.3 사운딩자료와 비교 및 검증

연직바람 관측장비에서 산출된 바람의 정량적 비교 및 검증을 위해 상관계수(correlation coefficient; CORR), 평균편의(mean bias; BIAS), 제곱근편차(root mean squared error; RMSE), 정규화된 제곱근편차(normalized

RMSE; NRMSE)를 검증지수로 사용하였다[식(4)~(7)].

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - S_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - S_i)^2} \quad (6)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - S_i)^2} / \bar{S} \quad (7)$$

여기서, S_i 와 R_i 는 각각 공간일치된 i 번째 고도의 사운딩자료와 RWP 자료를 의미한다. 이때 RWP의 관측고도에 가장 근접한 사운딩 자료를 선형내삽하여 공간일치 시켰다. \bar{S} , \bar{R} 은 검증에 사용된 사운딩 및 RWP 자료의 평균값이며, N 은 검증에 사용된 사운딩 자료의 개수이다. 이때 적용된 주요 검증조건은 아래와 같다.

- 검증고도: 1.0~2.0 km (MSL)
- 검증고도로부터 ± 2 게이트 평균
- 검증시간을 기준으로 ± 10 분 평균
- 산출된 풍속의 1시간 변동이 3 ms^{-1} 이상이면 검증에서 제외
- 풍속이 2 ms^{-1} 미만은 풍향 검증에서 제외

3.4 RWP 자료 유효성

2개월간의 관측자료를 식(8)에 적용하여 RWP 관측 자료의 각 고도별 유효비율(valid ratio)을 산출하였다.

$$Valid \ ratio \ (\%) = \frac{N_{SNR>2 \text{ dB}}}{N_{total}} \quad (8)$$

여기서 $N_{SNR>2 \text{ dB}}$ 는 해당고도에서 SNR이 2 dB 이상

Table 3. Rawinsonde launch schedule and location.

Observation category	Period	Location	Launch time (LST)				Total number of rawinsonde launch	Remark
Normal launch	6/20~7/26	Pension	3	9	15	21	144	KNU (4 times/day)
	7/27~8/19	Pension	3	-	15	-	44	KNU (2 times/day)
Comparison launch	7/02~7/23	Typhoon Center	-	9	-	21	39	KNU (2 times/day)
Regular (KMA)	6/20~8/19	Typhoon Center	-	9	-	21	126	KMA (2 times/day)

인 자료의 수, N_{total} 은 해당고도에서 2개월 동안 수집된 전체 자료의 수를 의미한다. 각 고도에 해당하는 자료의 수를 조사하여 유효비율을 산출하였다. RWP의 유효비율을 정량화하기 위해 장비개발의 요구조건을 참고하여 최소관측거리는 0.4 km, 청천 시 최대관측거리는 3.0 km로 설정하였다.

4. 연구 결과

4.1 관측결과

Figure 4는 2021년 8월 14일 하루 동안의 RWP 관측결과를 나타낸 것이다. 관측결과는 수평바람, 연직바람의 시선속도, 레이더 반사도, 스펙트럼 폭을 시간에 따른 연직분포로 나타냈다. RWP 관측결과와 시간 간격은 10분이고, 연직 해상도는 100 m이지만, 수평바람은 시인성을 위해 시간 간격은 30분, 연직으로 400 m 간격의 자료만 나타냈다. 또한 풍속이 약 1.3 m s^{-1} (2.5 knot) 미만의 자료는 작은 점으로 표시하였다. 수평바람의 경우 약 3 km 고도를 경계로 하층은 동풍 계열, 상층은 서풍계열의 바람이 분포하는 것을 볼 수 있다. 0400 LST부터 강수가 시작되었으며 약 5 km 고도에서 연직방향 시선속도가 -4.0 m s^{-1} 이상으로 급격히 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 낙하하는 얼

음입자가 용해층(melting layer)을 지나면서 밀도가 증가하여 낙하속도가 증가했기 때문이다(Gage et al., 1994; Ralph, 1995; Williams et al., 1995). 마찬가지로 해당 층의 반사도(radar reflectivity)는 40 dBZ 이상으로 증가하고 강수가 나타나는 고도에 걸쳐 20 dBZ 이상으로 나타난다. 이것은 강수입자에 부딪혀 되돌아오는 신호의 크기가 상대적으로 크기 때문인 것으로 해석된다. 강수가 시작하는 고도의 스펙트럼 폭은 1.5 m s^{-1} 이상으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 스펙트럼 폭은 강수입자의 속도분포를 의미하는데, 강수가 시작되는 고도는 입자의 낙하속도가 다양하게 분포한다는 것을 알 수 있다.

4.2 연직바람 산출 및 품질관리

RWP가 테스트베드에 설치되어 운영됨에 따라 RWP에서 실제 관측된 자료를 이용한 품질관리 최적화가 필요하다. Figure 5는 2021년 3월부터 11월까지 약 9개월간의 고층모드의 연직바람 관측자료를 이용한 SNR과 시선속도 질감(texture)의 2차원 빈도분포이다. SNR이 0 dB보다 큰 시선속도는 비교적 잡음(noise)이 적어 대부분 질감이 1.0 m s^{-1} 이하로 계산되었다. 이와는 반대로 SNR이 0 dB 근처인 시선속도는 잡음이 크기 때문에 질감 또한 크게 산출되어 분포한다. 따라서 본 연

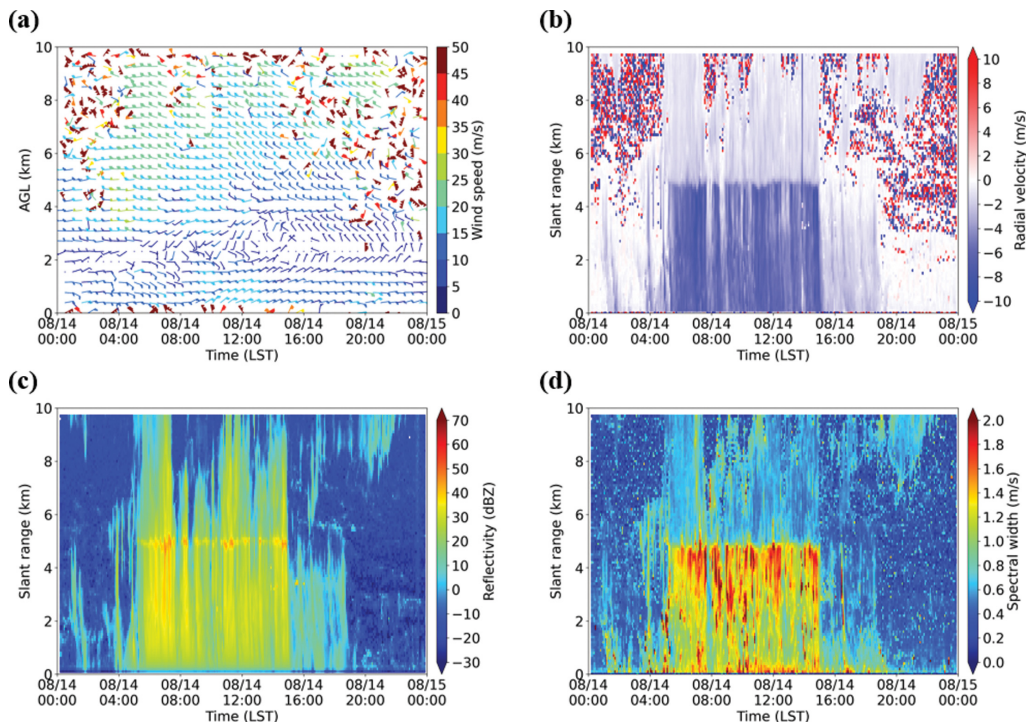


Fig. 4. Examples of RWP observation. (a) horizontal wind, (b) radial velocity, (c) radar reflectivity and (d) spectral width of vertical beam.

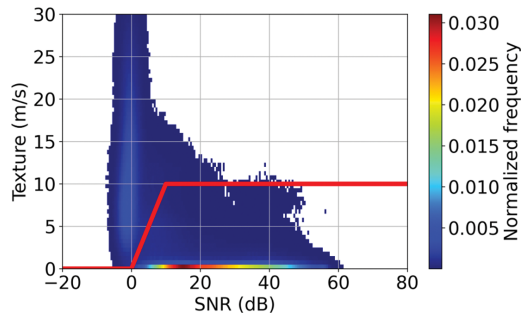


Fig. 5. Two-dimensional frequency distributions of SNR and radial velocity texture.

구에서는 두 영역을 구분할 수 있는 붉은색 실선을 품질관리 임계치로 설정하였다. 임계치는 식(9)와 같이 SNR 범위에 따라 3개 구간으로 나눌 수 있고 질감이 임계치보다 크면 품질이 낮은 것으로 간주하여 제거하였다. SNR이 0 dB보다 작은 구간은 질감에 관계없이 제거되고, SNR이 0 dB보다 크고 10 dB보다 작은 구간은 SNR과 질감을 비교하여 제거한다. SNR이 10 dB보다 큰 영역은 질감이 10 m s⁻¹ 보다 크면 품질이 낮다고 판단하여 제거하였다.

$$QC = \begin{cases} \delta(Vr) > 0 & (SNR < 0 \text{ dB}) \\ \delta(Vr) > SNR & (0 < SNR < 10 \text{ dB}) \\ \delta(Vr) > 10 & (SNR > 10 \text{ dB}) \end{cases} \quad (9)$$

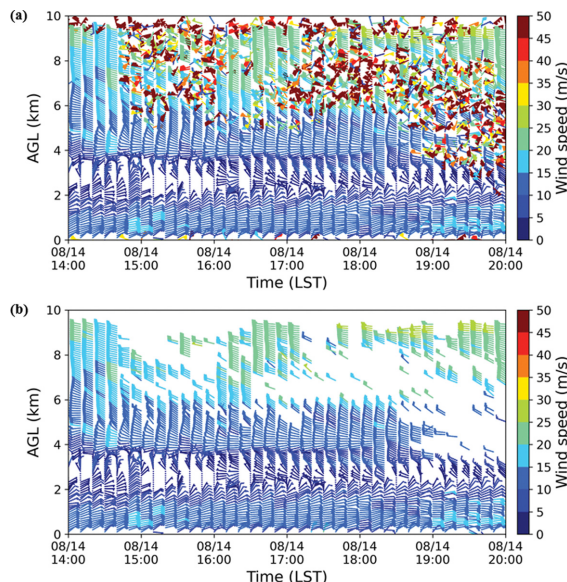


Fig. 6. Comparison of horizontal wind profiles (a) before and (b) after quality control.

Figure 6은 각각 2021년 8월 14일 1400~2000 LST 기간의 품질관리 전과 후의 바람프로파일 산출결과이다. 5 km 이상의 상층에 풍향이 급변하거나 풍속이 50 m s⁻¹ 보다 크게 산출되었다. 이 영역의 시선속도는 시공간 변동성이 매우 크고(Fig. 4b), SNR이 0 dB 이하로 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 4c). 시선속도의 품질이 낮기 때문에 비정상적인 바람이 산출되었다(Fig. 6a). 이와 같은 시선속도는 변동성이 크기 때문에 질감 또한 크게 산출되어 앞에서 결정한 임계치보다 큰 영역에 해당한다. 품질이 낮은 영역의 바람 자료가 품질관리를 통해 모두 깨끗이 제거되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6b).

4.3 사운딩자료와 비교

RWP에서 산출된 바람성분의 정확도를 확인하기 위해 레원존데와 비교하여 정량적 검증을 수행하였다. Figure 7은 2개월간의 집중관측기간 동안의 RWP와 레원존데의 수평풍속과 풍향에 대한 일평균 RMSE 시계열이다.

여기서 검은색 점선은 개발장비의 성능목표치(1 m s⁻¹, 10°)를 나타낸 것이다. 풍속과 풍향 모두 대체로 성능목표치를 만족하는 범위에 있는 것을 볼 수 있다. 특히 집중관측 초반에 비해 후반으로 갈수록 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 풍향의 경우 7월 28일에서 7월 30일까지 유지보수 기간 동안 RMSE가 크게 산출되었다. 이처럼 유지보수 이후 풍향에 영향을 줄 수 있는 요인에 대한 분석이 필요해 보이고 어떤 영향이 있었는지 주의 깊게 살펴봐야 할 것으로 생각된다.

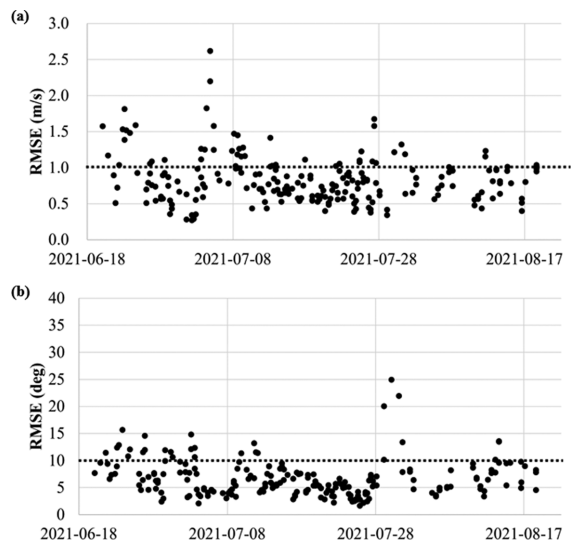


Fig. 7. Time series of daily mean RMSE of (a) wind speed and (b) wind direction.

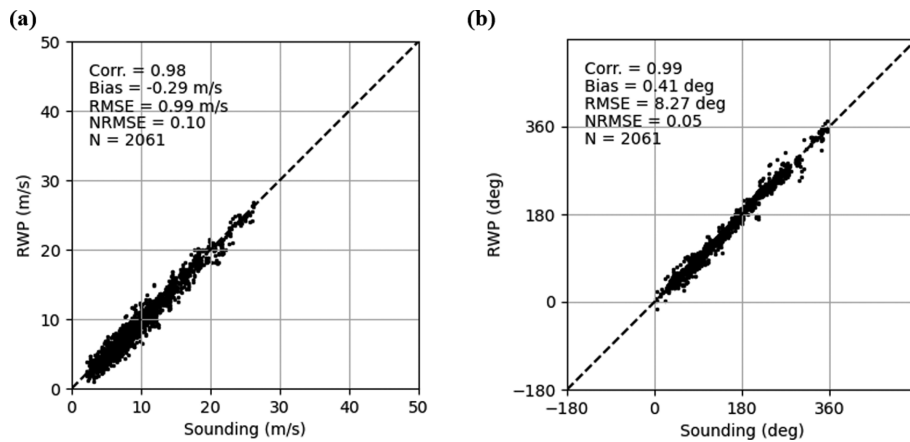


Fig. 8. Comparison of (a) wind speed and (b) direction between RWP and sounding.

Figure 8은 집중관측기간 동안의 RWP 관측결과와 레윈존데를 비교한 성능 검증결과이다. 풍속과 풍향 모두 0.98 이상의 매우 높은 상관관계가 있고 BIAS는 각각 -0.29 m s^{-1} , 0.41° 로 나타났다. 풍속과 풍향의 RMSE는 각각 0.99 m s^{-1} 와 8.27° 로 레윈존데와 매우 높은 일치성을 보였다. 마찬가지로 NRMSE는 각각 0.1과 0.05로 분석되었다.

Figure 9는 집중관측 기간 동안의 관측자료를 이용한 고도별 유효비율과 평균 SNR을 함께 나타낸 것이

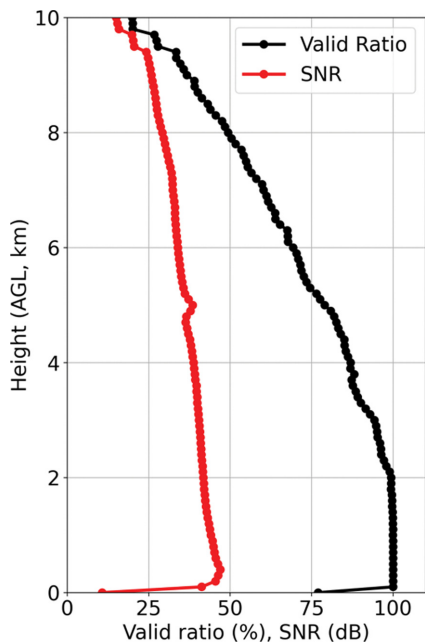


Fig. 9. Valid ratio (black) and mean SNR (red) at each altitude of RWP.

다. 고도가 높아질수록 SNR과 유효비율 모두 감소하는 경향을 보인다. 첫 번째 게이트의 SNR은 약 10.7 dB이고 유효비율은 약 77.0%로 산출되었다. 첫 번째 게이트는 장비의 특성상 자료의 품질이 낮기 때문에 다른 고도보다 작게 산출된 것으로 분석된다. 고도 10 km까지의 평균 유효비율은 73.0%이고 평균 SNR은 35.1 dB로 산출되었다. 최소관측거리인 400 m의 유효비율은 100.0%이고 SNR은 47.0 dB로 산출되었으며, 청천 시 최대관측거리인 3 km에서의 유효비율은 94.3%, SNR은 40.5 dB로 산출되었다. 최소관측거리와 최대관측거리 사이의 평균 유효비율은 약 98.5%로 높게 나타났고, 평균 SNR은 42.8 dB이다. 이러한 결과는 장비개발의 요구조건인 80%보다 높은 것으로 확인되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내기술로 개발된 RWP를 소개하고 연직바람 산출 결과를 정성 및 정량적으로 평가하였다. 연직바람 관측장비는 국가태풍센터 테스트베드 부지에 설치되었으며, 옥내장치와 옥외장치로 구성된다. RWP는 256개의 소자가 16×16 배열로 구성된 능동형 위상배열 안테나 시스템을 사용하여 방위각을 $0\sim 360^\circ$ 까지, 천정각을 $\pm 20^\circ$ 까지 변경할 수 있다. 이 장비는 원시 I/Q신호로부터 신호처리 과정을 통해 원시 스펙트럼을 생산하고, 품질관리 후 모멘트 적분법을 적용하여 기상변수를 산출한다. 5개 빔의 DBS 방식을 사용하여 시선속도로 수평바람과 연직속도를 산출한다. 2021년 6월 20일부터 8월 19일까지 제주 국가태풍센터에서 성능평가를 위한 집중관측을 수행하였다. RWP 시선속도 품질관리 최적화를 위해 2021년 3월부터 11월까지 9개월간의 고층모드 관측자료를 분

석하여 품질관리 임계치를 결정하였다. RWP의 성능은 레윈존데와 비교하여 검증하였으며, Corr, BIAS, RMSE, NRMSE를 검증지수로 활용하였다. 고도별 유효비율을 산출하여 기상자료의 신뢰성을 확인하였다.

강수사례의 기본 모멘트 산출결과를 분석한 결과, 강수입자의 낙하에 따른 물리적 특성을 잘 보여주었다. 시선속도 품질관리 임계치의 최적화와 적용을 통해 수평바람 품질관리 성능을 확인하였다. 풍속과 풍향의 RMSE는 각각 0.99 m s^{-1} 와 8.27° 로 모두 높은 상관관계와 일치성을 보였으며, 특히 집중관측 후반으로 갈수록 성능이 향상되었다. SNR과 유효비율은 고도가 높아질수록 감소하는 경향을 보였으며, 검증 고도의 평균 유효비율은 98.5%, 평균 SNR은 42.8 dB로 나타났다.

본 연구에서는 여름철 약 2개월간의 자료를 분석에 사용하였다. 향후 지속적인 관측과 기술 개선을 통해 RWP의 성능을 더욱 향상시키기 위해 다양한 기상 조건의 관측자료의 추가 분석이 필요하다. 이를 통해 기상 예보의 정확성을 높이고, 기상 재해 예방에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문(저서)은 2022학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Augustine, J. A., and E. J. Zipser, 1987: The use of wind profilers in a mesoscale experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **68**, 4-17, doi:10.1175/1520-0477(1987)068<0004:TUOWPI>2.0.CO;2.
- Baek, S.-G., C.-H. Cho, J.-H. Kim, and H.-Y. Song, 2005: Analyses of precipitation cases using wind profiler. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 1-16.
- Dutta, D., S. Mallick, K. A. Jyothi, J. P. George, and D. P. Kumar, 2016: Wind from Indian Doppler Weather Radars: a data assimilation view point. In *Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation VI*, **9876**, 82-90, doi:10.1117/12.2223691.
- Ecklund, W. L., D. A. Carter, and K. S. Gage, 1977: Sounding of the lower atmosphere with a portable 50 MHz coherent radar. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4969-4971, doi:10.1029/JC082i031p04969.
- Gage, K. S., C. R. Williams, and W. L. Ecklund, 1994: A new tool for diagnosing tropical convective cloud systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 2289-2294, doi:10.1175/1520-0477(1994)075<2289:UWPANT>2.0.CO;2.
- Garcia-Benadi, A., J. Bech, M. Udina, B. Campistron, and A. Paci, 2022: Multiple characteristics of precipitation inferred from wind profiler radar Doppler spectra. *Remote Sens.*, **14**, 5023, doi:10.3390/rs14195023.
- Gossard, E. E., S. Gutman, B. B. Stankov, and D. E. Wolfe, 1999: Profiles of radio refractive index and humidity derived from radar wind profilers and the Global Positioning System. *Radio Sci.*, **34**, 371-383, doi:10.1029/1998RS900029.
- Green, J. L., K. S. Gage, and T. E. VanZandt, 1978: Three-dimensional wind observations of a jet stream using a VHF Doppler radar. *Preprints, 18th Conf. on Radar Meteor., Atlanta, Amer.* 184-189.
- Hildebrand, P. H., and R. S. Sekhon, 1974: Objective determination of the noise level in Doppler spectra. *J. Appl. Meteor.*, **13**, 808-811, doi:10.1175/1520-0450(1974)013<0808:ODOTNL>2.0.CO;2.
- Hong, J., J. Jeon, and C. Ryu, 2015: A case study on heavy rainfall using a wind profiler and the stability index. *J. Chosun Natural Sci.*, **8**, 221-232, doi:10.13160/ricns.2015.8.3.221.
- Jo, W. G., 2020: *Quality control of wind profiler Doppler spectrum data*. Pukyong National University, Busan, Korea, 97 pp.
- Kang, B.-J., W.-J. Jung, H.-S. Lee, T.-O. Kong, J.-Y. Kim, J.-I. Chun, and J.-H. Chun, 2020: Development of active phased array antenna for radar wind profiler. *J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci.*, **31**, 253-263, doi:10.5515/KJKIEES.2020.31.3.253.
- Kim, D.-K., and D.-I. Lee, 2015: Atmospheric thickness and vertical structure properties in wintertime precipitation events from microwave radiometer, radiosonde and wind profiler observations. *Meteor. Appl.*, **22**, 599-609, doi:10.1002/met.1494.
- Kim, K.-H., P.-S. Kim, M.-S. Kim, D.-H. Kang, and B.-H. Kwon, 2016: Improvement in wind vector from UHF wind profiler radar through removing ground echo. *J. Environ. Sci. Int.*, **25**, 267-280, doi:10.5322/JESI.2016.25.2.267.
- Kim, M. S., B. H. Kwon, S. Kim, K. Lee, and Y. Kim, 2022: Retrieval of humidity profile using refractive index of UHF wind profiler radar. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU22-8970, doi:10.5194/egusphere-egu22-8970.
- Kwon, S., S.-H. Jung, and G. W. Lee, 2015: Intercomparison of radar rainfall rate using Constant Altitude Plan Position Indicator and hybrid surface rainfall maps. *J. Hydrol.*, **531**, 234-247, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.063.
- Lee, S.-Y., I.-U. Chung, and S.-K. Kim, 2006: A study on

- establishment of the optimum mountain meteorological observation network system for forest fire prevention. *Korean J. Agric. For. Meteorol.*, **8**, 36-44.
- _____, and J.-E. Kim, 2011: A study on meteorological elements effecting on large-scale forest fire during spring time in Gangwon Young-dong region. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **11**, 37-44.
- Lee, S.-Y., and G.-W. Lee, 2020: Development of simulation method of doppler power spectrum and raw time series signal using average moments of radar wind profiler. *J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci.*, **15**, 1037-1044, doi:10.13067/JKIECS.2020.15.6.1037.
- Oscanoa, J., C. Castillo, and D. Scipi3n, 2016: CLAIRE: An UHF wind profiler radar for turbulence and precipitation studies. *2016 IEEE XXIII International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 1-6, doi:10.1109/INTERCON.2016.7815577.
- Ralph, F. M., 1995: Using radar-measured radial vertical velocities in rain and snow to distinguish precipitation scattering from clear-air scattering. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 257-267, doi:10.1175/1520-0426(1995)012<0257:URMRVV>2.0.CO;2.
- Ruffieux, D., 1999: Use of a wind profiler in a planetary boundary layer experiment. *Analusis*, **27**, 310-312, doi:10.1051/analusis:1999270310.
- Srinivasulu, P., P. Yasodha, P. Kamaraj, T. N. Rao, A. Jayaraman, S. N. Reddy, and S. Satyanarayana, 2012: 1280-MHz active array radar wind profiler for lower atmosphere: System description and data validation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **29**, 1455-1470, doi:10.1175/JTECH-D-12-00030.1.
- Wang, M., Q. Ren, Y. Geng, and Y. Chai, 2017: Application of radar wind profiler data in analyzing the process of torrential rains in Urumqi Xinjiang, China. *Nat. Hazards*, **88**, 1677-1690, doi:10.1007/s11069-017-2940-1.
- Werner, C., 2005: Doppler wind lidar. *In Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Springer Science, 325-354.
- Williams, C. R., W. L. Ecklund, and K. S. Gage, 1995: Classification of precipitating clouds in the tropics using 915-MHz wind profilers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 996-1012, doi:10.1175/1520-0426(1995)012<0996:COPCIT>2.0.CO;2.
- Wu, Y., J. Guo, T. Chen, and A. Chen, 2023: Forecasting precipitation from radar wind profiler mesonet and reanalysis using the random forest algorithm. *Remote Sens.*, **15**, 1635, doi:10.3390/rs15061635.
- Ye, B.-Y., G. Lee, and H.-M. Park, 2015: Identification and removal of non-meteorological echoes in dual-polarization radar data based on fuzzy logic algorithm. *Adv. Atmos. Sci.*, **32**, 1217-1230, doi:10.1007/s00376-015-4092-0.
- Yuan, J., and Coauthors, 2022: Real-time synchronous 3-D detection of air pollution and wind using a solo coherent doppler wind lidar. *Remote Sens.*, **14**, 2809, doi:10.3390/rs14122809.