

ORIGINAL ARTICLE

신호대잡음비의 임계값 설정에 따른 UHF 윈드프로파일러 바람벡터의 정확도 평가

김광호 · 김박사 · 김민성 · 강동환 · 권병혁^{1)*}

부경대학교 지구과학연구소, ¹⁾부경대학교 환경대기과학과

Accuracy Evaluation of UHF Wind Profiler Radar Wind Vectors by Setting a Threshold of Signal-to-Noise Ratios

Kwang-Ho Kim, Park-Sa Kim, Min-Seong Kim, Dong-Hwan Kang, Byung Hyuk Kwon^{1)*}

Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Abstract

A minimum threshold for the signal to noise ratio (SNR_{min}) has to be set in the data processing system of wind profiler radar (WPR). The data collection rate and the accuracy of the WPR wind vector depend on the SNR_{min} . The WPR at Uljin is operated with an SNR_{min} of 1 dB which is a relatively large threshold. We found that the accuracy and the continuity of the WPR wind vector with height were directly related to the variability of the SNR and vertical gradient of the squared refractive index. We investigated a quantitative method for determining a new SNR_{min} for the WPR at Uljin and it was evaluated with radiosonde data. The accuracy and continuity of the wind vector from an SNR of less than 1 dB, began to decrease at an altitude of 3.5 km. Most of the SNR values were less than -3.5 dB in altitudes higher than 3.5 km. We retrieved high-accuracy wind vectors at altitudes over 3 km where measurements were deficient with an SNR_{min} of 1 dB.

Key words : Wind profiler radar, Doppler spectra, Signal noise ratio, Vertical refractive index gradient

1. 서론

윈드프로파일러(wind profiler radar, WPR)는 대기의 바람벡터를 관측하는데 이용되는 중요한 관측 기기이다. 바람 벡터의 연직 프로파일을 결정하기 위하여 도플러 빔 방식을 사용하고 고정된 방위각과 고도각에 따라 전자기 펄스파를 송신한다. 대기 산란 과정의 특징에 의해 수신된 신호는 도플러 지연에 따른 위상차가 발생하고, 고속푸리에변환(fast Fourier transform,

FFT)으로 산출된 도플러 스펙트럼을 통해서 대기의 바람벡터 성분이 결정된다. WPR는 기상학적인 연구에 많이 활용되고 있으며(Hardy, 1990; Monna, 1998), 수 분의 시간분해능과 수 십 미터의 공간분해능으로 바람의 연직구조를 제공할 수 있기 때문에 위험기상을 분석하거나 수치예보모델의 예측정확도를 높이기 위한 기초 자료로 널리 활용되고 있다(Holleman et al., 2008; Ishihara, 2006; Maruri et al., 2014; Robert, 2012; Weber et al., 1993).

Received 24 June, 2016; Revised 1 September, 2016;

Accepted 6 September, 2016

*Corresponding author : Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Phone : +82-51-629-6644

E-mail : bhkwon@pknu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

WPR는 장비의 성능에 따라 이론적으로 관측할 수 있는 최고 고도가 결정된다. WPR의 유효관측고도는 전파거리 접합이 없이 관측되는 최고 관측고도를 의미한다. 유효관측고도는 펄스반복시간(pulse repetition time, PRT) 혹은 펄스반복주파수(pulse repetition frequency, PRF)에 의해 좌우되며, WPR의 최고 관측고도는 전파거리 표본점의 개수에 의해서도 좌우된다. WPR의 이론적인 최고 관측고도는 실제 대기에서 관측된 최고 관측고도와 정확하게 일치하지 않는다. 대기 굴절률의 공간적인 변동성이 WPR의 대기 신호의 수신 강도에 영향을 주기 때문이다. WPR는 대기 굴절률의 비균질 영역에서 산란되는 전파를 수신한다. 대기로 방사된 전파는 대기 중의 매질에 의해 산란 및 굴절되면서 전파 속도가 달라진다. 이와 같은 특성을 이용하여 빛의 속도와 전파 속도의 비를 통해서 대기 굴절률을 정의할 수 있으며, 대기 굴절률은 수증기, 건조공기 등에 의해 좌우된다(Bean and Dutton, 1966). 대기 굴절률의 비균질 영역은 난류, 구름, 강수 입자에 의해 발생한다. 일반적으로 청천 대기의 하층에서는 난류가 수증기압, 기온, 그리고 기압의 공간 분포를 흐트리면서 대기 굴절률의 비균질 영역을 발생시킨다.

레이더의 수신전력은 레이더 방정식에 의해 거리의 제곱에 반비례한다. 관측고도가 높아질수록 수신전력이 낮아지면, WPR에 수신되는 대기 신호와 잡음 신호의 구분이 어려워진다. 수신전력과 잡음전력의 비를 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)라고 한다. WPR로 수신되는 대기 신호가 약할수록 SNR의 비율도 감소한다. 대기 굴절률의 변동성은 대기 신호의 수신 강도에 영향을 주기 때문에 SNR에 직접적으로 기여한다.

모든 WPR 자료처리 시스템은 최소 SNR 문턱값(SNR_{min})을 사용한다. SNR_{min} 은 대기 신호와 잡음 신호를 구분할 수 있는 가장 작은 SNR 값을 의미한다. 수신된 신호의 SNR이 SNR_{min} 보다 작다면, 더 이상 대기 신호를 판별할 수 없다고 판단한다. 현재 울진기상대 WPR에 적용되고 있는 SNR_{min} 은 1 dB이다. Riddle et al.(2012)은 Alaska의 Poker Flat에서 9년간(1979-1987) 수집된 윈드프로파일러 자료를 이용하여 SNR_{min} 을 산출할 수 있는 경험적인 수식을 제안하였고

다양한 연구에서 WPR 자료의 품질관리를 위하여 활용되었다(Hartten and Johnston, 2014; Lindseth et al., 2012).

본 연구에서는 SNR_{min} 을 세 개의 값으로 구분하고, SNR_{min} 미만의 결손된 윈드프로파일러 바람벡터를 복원하여 정확성을 평가하였다. SNR_{min} 은 현재 울진기상대의 WPR에 적용되고 있는 SNR_D (1 dB)와 Riddle et al.(2012)의 방법에 의해 산출된 SNRR, 그리고 고도별 WPR의 정확성 및 연속성과 SNR 빈도의 상관성을 통해서 결정된 SNR_D 로 구분하였다. 청천대기에서 관측된 울진기상대 WPR의 원시자료를 이용하여 SNR_{min} 미만의 시선속도를 검출하였고, 이를 통해서 산출된 WPR 바람벡터는 라디오존데를 이용하여 검증하였다. 또한 울진기상대의 라디오미터로부터 대기 굴절률의 변동성을 정량적으로 산출하여 WPR SNR 분포에 대한 연관성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

울진기상대에 설치된 프랑스 Degreane사의 UHF (ultra high frequency) WPR (PCL 1300)에 설정된 SNR_{min} 인 1 dB 미만의 신호에서 시선속도를 검출하기 위하여 관측 자료 중 저층 관측 방식(low mode)으로 관측된 자료를 이용하였다. WPR 바람벡터의 검증을 위하여 WPR 설치 지점에서 진양공업의 RSG-20A 라디오존데를 비양하였고, Table 1과 같이 평균오차(mean bias, MB)와 제곱근평균제곱오차(root mean square error, RMSE)를 분석하여 정확도를 비교하였다. 라디오존데 관측은 기상청에서 주관한 ‘강수 정량예보 개선을 위한 2015년 여름철 종합관측’의 일환으로 수행되었다. 라디오존데의 바람벡터는 해발고도를 기준으로 윈드프로파일러 고도와 가장 가까운 고도를 중심으로 ± 75 m 내의 값을 평균하였다. WPR의 시계열 자료로부터 Kitchen(1989)에 의해 제안된 확률오차를 통해서 Kim et al.(2015)에 상세히 기술된 방법으로 자료의 연속성을 조사하였다. Table 2와 같이 울진기상대 WPR 자료의 연직 공간 해상도는 71.68 m이다. WPR의 PRF는 20 kHz이며, 유효관측고도는 7500 m이다. 전파거리 표본점에 의한 최고 관측고도는 5089.28 m이다. WPR과 라디오존데의 관측은

Table 1. Skill scores for accuracy validation of wind vectors from wind profiler

Description	Variables	Statistic definition
Mean RS	\bar{R}	$\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N V_R$
Mean WPR	\bar{W}	$\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N V_W$
Mean bias	MB	$\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N (V_R - V_W)$
Root mean square error	RMSE	$\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N (V_R - V_W)^2}$
Correlation coefficient	CORR	$\frac{\sum_1^N (V_R - \bar{R})(V_W - \bar{W})}{\sqrt{\sum_1^N (V_R - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_1^N (V_W - \bar{W})^2}}$

V_W : Measured by wind profiler radar

V_R : Measured by radiosonde

Table 3과 같이 2015년 9월 9일 09UTC부터 11일 09UTC까지 총 48시간 동안 청천 대기 상태에서 이루어졌다. WPR는 10분 간격으로 수집되었고, 라디오존데는 6시간 간격으로 총 8회 비양하였다.

울진기상대 WPR의 SNR 분포와 대기 굴절률 변동성의 관계를 파악하기 위하여 Table 3의 관측 기간 동안 10분 간격으로 수집되는 독일 RPG사의 라디오미터(RPG-HATPRO) 자료를 이용하였다. 라디오미터는 대기 중의 수증기와 산소, 구름에 의해 방출되는 에

너지를 14개의 마이크로웨이브 채널을 통해 흡수한 후, 플랑크법칙을 이용하여 밝기온도로 변환한다. 각 고도별 수증기량 산출 알고리즘에 밝기온도를 적용하여 기온, 습도 등의 연직 프로파일을 생산한다. 대기 굴절률의 변동성을 식 (1)의 잠재굴절지수의 연직 기울기(M)로 표현할 수 있다(Ottersten, 1969). 라디오미터에서 생성되는 기온(T), 습도, 그리고 기압(P)을 통해서 M을 산출하는 것이 가능하다.

Table 2. Operational configuration of low mode strategy for wind profiler at Uljin

Parameter	Value	Unit
Frequency	1290	MHz
Peak power	4.5	kW
Beam number	5	
Pulse width	80	μS
Pulse repetition frequency	20	kHz
The number of FFT points	128	
The number of incoherence integration	40	
Range resolution	71.68	meter
The number of range gate	71	
Minimum threshold for SNR	1	dB

Table 3. General information of intensive observation periods

Instruments	Periods (UTC)	Temporal resolution (minute)	Vertical profiles
Wind profiler		10	288
Radiosonde	09UTC 09 ~ 09UTC 11 September 2015	360	8
Radiometer		10	288

$$M = -77.6 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \left(-\frac{7800}{T} \frac{dq}{dz} + \frac{N_{bw}^2}{g} \frac{q}{T} + \frac{N_{bw}^2}{g} \right) \quad (1)$$

여기서, q 는 비습이고, g 는 중력가속도이다. N_{bw} 는 Brunt-Vaisala 진동수이다. 특히, M^2 은 WPR의 수신 전력과 비례하는 특성을 보인다(Heo et al., 2002).

Riddle et al.(2012)에 의한 SNR_{min} 산출 방법은 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 요구되는 WPR 장비 사양의 변수는 FFT 분석점 수(NPts)와 비간섭적분(Incoherence integration) 수(NSpec)이다. 비간섭적분은 FFT를 통해 얻은 여러 개의 도플러 스펙트럼을 각 주파수 구간에 따라 적분하는 것을 의미한다. 비간섭적분의 역할은 스펙트럼 침두 주변에서 발생하는 잡음의 변동성을 줄여주고, 스펙트럼 침두를 더욱 뚜렷하게 하여 시선속도 검출 가능성을 향상시킨다. Riddle et al.(2012) 방법에 의해 산출된 울진기상대 WPR의 SNR_{min} (SNR_R)은 -15.16 dB이었다. 현재 울진기상대 WPR에 적용되고 있는 값보다 낮았다.

$$SNR_R = 10 \log_{10} \left(\frac{25 \left(NSpec - 2.3125 + \frac{170}{NPts} \right)^{1/2}}{NPts \times NSpec} \right) \quad (2)$$

본 연구에서는 WPR의 시선속도를 검출하기 위하여 Fig. 1의 과정으로 울진기상대 WPR의 원시자료를 가공하였다. 우선, 도플러 스펙트럼의 잡음전력 수준을 결정하였다. 최근 가장 널리 사용되는 백색잡음을 가정하여 잡음전력 수준을 결정하는 방법을 적용하였다(Hildebrand and Sekhon, 1974). 스펙트럼 침두보다 낮은 스펙트럼 밀도의 수준을 정하고, 정해진 수준보다 낮은 스펙트럼 자료를 모아 새로운 스펙트럼을

구성한다. 새롭게 구성된 스펙트럼이 백색 잡음 조건을 만족할 때까지 이 과정을 반복한다. 잡음전력 수준을 결정한 후, 고도별 도플러 스펙트럼의 대기 신호에 의한 침두를 결정하였다. 침두를 중심으로 도플러 스펙트럼의 FFT 분석점의 최소 지점과 최고 지점을 결정하였다. 결정된 도플러 스펙트럼 변수를 통해서 Table 4와 같이 스펙트럼 모멘트를 산출하였다. 스펙트럼 모멘트는 0차부터 3차까지 총 4개(0차: 수신전력, 1차: 시선속도, 2차: 스펙트럼폭, 3차: 비대칭도)이며, SNR을 포함하면 총 5개다. WPR의 바람벡터(u , v , w)는 모든 고도의 표본점에 대하여 Table 5와 같이 네 개의 경사빔과 연직빔의 1차 스펙트럼 모멘트를 통해서 산출하였다.

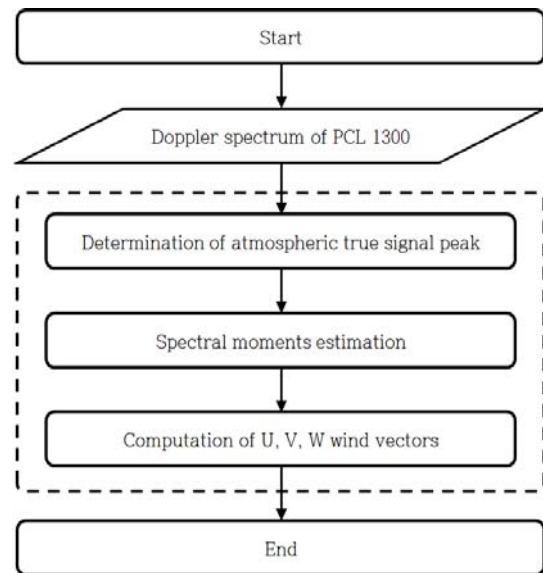
**Fig. 1.** Method of spectral moment estimation based on doppler spectrum of PCL 1300.

Table 4. Formula of moments from doppler spectra

Moment	Formula
Received power	$M_0 = \sum_{i=m}^n S_i$
Radial velocity	$M_1 = \frac{1}{M_0} \sum_{i=m}^n S_i v_i$
Spectral width	$M_2 = \frac{1}{M_0} \sum_{i=m}^n S_i (v_i - M_1)^2$
Skewness	$M_3 = \frac{1}{M_0} \sum_{i=m}^n S_i (v_i - M_1)^3$

S: spectral density
v: radial velocity
i: number of FFT point
m: minimum FFT point with peak as the center
n: maximum FFT point with peak as the center

Table 5. Formula of wind vector from radial velocity

Wind vector	Formula
u	$u = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2\sin\theta}$
v	$v = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2\sin\theta}$
w	$w = \frac{V_{rE} + V_{rW}}{2\cos\theta}, w = V_{rZ}$

V_{rE} : radial velocity of eastern oblique beam
 V_{rW} : radial velocity of western oblique beam
 V_{rN} : radial velocity of northern oblique beam
 V_{rS} : radial velocity of southern oblique beam
 θ : radial velocity of southern oblique beam
 θ : zenith angle

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 청천대기에서 관측된 울진기상대 WPR의 고도별 풍속 시계열이다. 약 3 km 이상의 고도에서 풍속값이 존재하지 않는 구간이 발생하였다. SNR_D 미만의 시선속도가 산출되지 못했기 때문이다. Fig. 3(a)는 SNR_D를 적용하여 풍속을 산출한 결과이다. Fig. 2에서 공백이었던 구간이 복원되었다. Fig. 3(b)는 SNR의 고도별 시계열 분포이다. 약 3 km 이상의 고도에서 -10 ~ 1 dB 사이의 SNR이 분포하였고, 고도가 높아질수록 SNR이 감소하는 분포를 보였다. 관측기간 동안 울진기상대의 최소 SNR은 -9.7 dB로, SNR_R

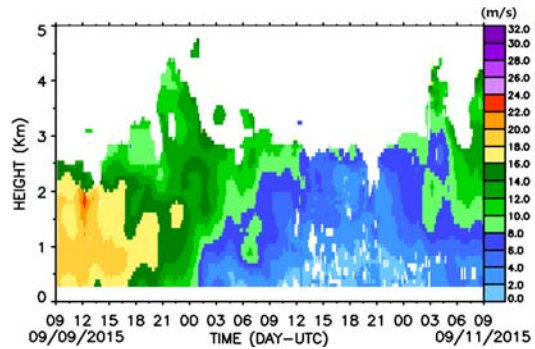


Fig. 2. Time-height cross section of 10-min mean of wind speed retrieval by SNR_D from 1290 MHz wind profiler at Uljin.

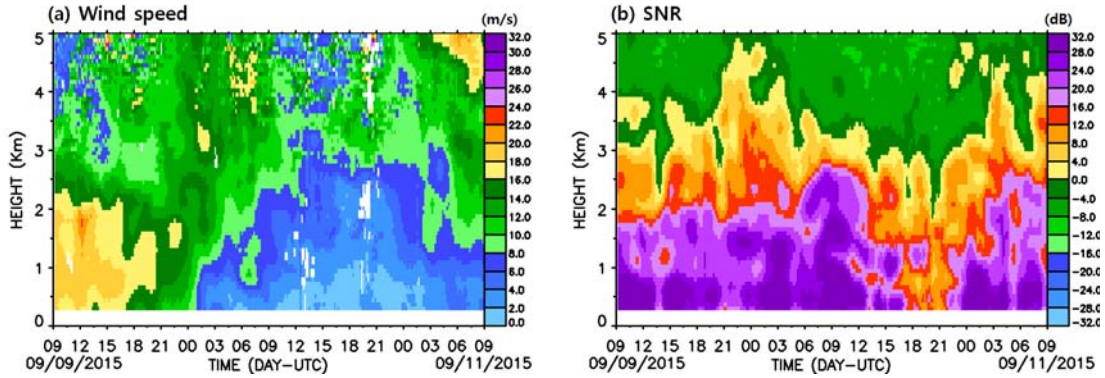


Fig. 3. Time-height cross sections of 10-min values of (a) wind speed and (b) SNR_R from 1290 MHz wind profiler at Uljin.

보다 높았다. SNR_R의 기준으로 대기 신호를 검출할 수 있기 때문에, SNR_D 미만에서 검출된 모든 바람벡터는 이용 가능하다.

관측 기간 동안 SNR_D와 SNR_R을 기준으로 검출된 바람벡터의 자료수집률은 Fig. 4와 같이 2 km 고도까지는 95% 이상이였다. SNR_R에 의한 자료수집률은 5 km 고도까지 95% 이상을 유지하였다. SNR_D에 의한 자료수집률은 2.5 km 고도를 기준으로 3 km 고도까지 50% 미만으로 급격하게 감소하였고, 약 4.9 km 고도 부근에서 0%에 도달하였다. Fig. 1에서 바람벡터 분포와 비교해보면 바람벡터의 자료수집률은 고도별 SNR의 분포와 직접적으로 연관되었다. Fig. 5의 고도별 SNR 빈도에서 2.2 km 고도부터 SNR_D 미만의 SNR이 -3~1 dB 사이에 처음으로 발생하였다. 3 km 고도부터 SNR_D 미만의 SNR에 대한 빈도가 급격하게 증가하기 시작하여, 4 km 고도부터는 -8~7 dB 사이에 SNR의 빈도가 가장 높았다. 고도에 따른 SNR 크기의 감소 경향은 자료수집률의 감소 경향과 일치하였고, SNR_R 미만의 SNR은 검출되지 않았다.

SNR과 대기 굴절률의 관계는 WPR 바람벡터의 검출률과 밀접한 관련이 있다. WPR는 대기 굴절률의 비균질 영역에서 산란되는 전파를 수신하기 때문에 대기 굴절률의 공간적인 변동성이 클수록 산란되는 전파 신호의 강도는 높아진다. 신호가 뚜렷하면 SNR 역시 높게 나타난다. 청천 대기의 하층에서 수신되는 WPR의 전파 신호는 난류 소용돌이에 의해 발생한 수

증기압, 기온, 그리고 기압의 비균질 영역에서 산란된 것이다. 난류 소용돌이에 의해 수신된 전파는 도플러 스펙트럼 분석을 통해서 바람벡터로 변환된다. 즉, 청천대기에서 대기 굴절률의 변동성이 큰 영역에서는 수신되는 신호의 강도와 SNR이 높아지고, 난류 소용돌로부터 관측된 뚜렷한 신호를 이용하여 바람벡터 성분을 검출하기 쉬워진다.

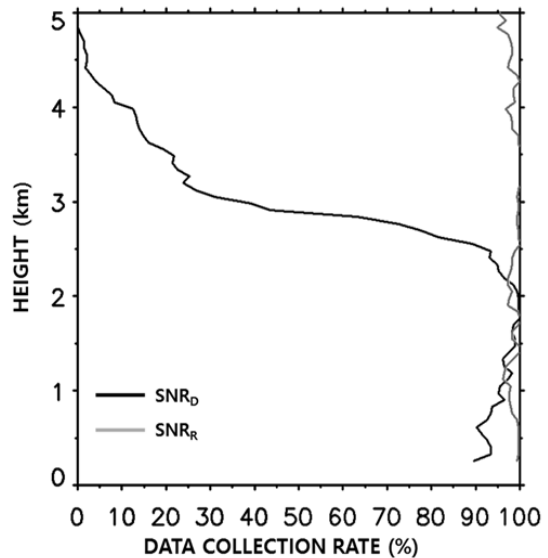


Fig. 4. Vertical profiles of data acquisition rate for SNR_D and SNR_R for intensive observation period in Table 3.

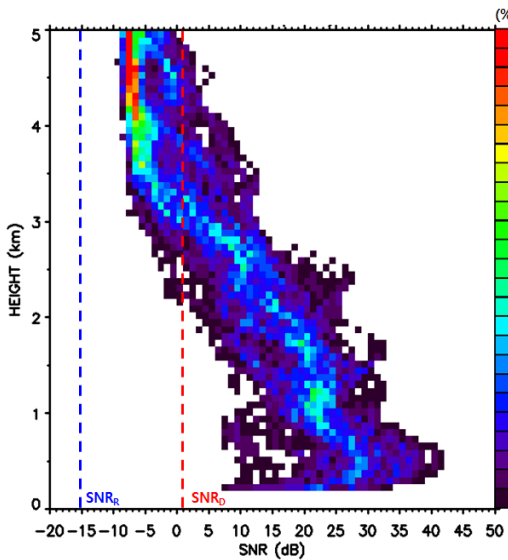


Fig. 5. SNR-height cross section of SNR density (%) from 1290 MHz wind profiler at Uljin. Red dot line and blue dot line indicate SNR_D and SNR_R respectively.

SNR과 대기 굴절률의 변동성과의 관계를 파악하기 위하여 라디오미터로부터 Fig. 6과 같이 M^2 을 산출하였고 M^2 의 시계열 자료를 고도별로 평균하였다. 평균 M^2 은 1.5 km 이상에서 고도에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. SNR의 고도에 따른 빈도 분포와 감소 경향이 동일하였다. 특히, 4.3 km부터 5 km 고도까지

M^2 이 급격하게 감소하면서 M^2 의 표준편차도 증가하였는데, 동일한 고도 구간에서 SNR의 빈도는 -8~7 dB 사이에서 가장 높았다. 즉, WPR의 고도별 SNR 분포는 M^2 에 비례하였고, WPR의 바람벡터 검출 고도는 대기 굴절률의 변동성과 직접적인 연관이 있었다.

확률오차는 시계열 자료의 시간 간격(Δt)에 따른 오차의 평균을 통해서 자료의 연속성을 나타내는 지표이며, 확률오차의 크기가 작을수록 윈드프로파일러 관측 자료의 연속성이 높은 것이다. SNR_D 미만에서 검출된 윈드프로파일러 풍속의 고도별 연속성을 판단하기 위하여 Fig. 3(a)의 고도별 시계열 풍속을 통해서 확률오차를 산출하였다(Fig. 7). 3.5 km 고도까지 확률오차는 1 m/s 미만으로 낮았다. 2~3.5 km 고도에서는 SNR_D 미만의 SNR이 분포하였고, -3.5 dB 이상의 SNR에서 빈도가 높았음에도 불구하고 연속성은 높았다. 3.5 km 고도를 기준으로 고도가 높아질수록 확률오차가 증가하였고, 4.5 km 고도부터 급격하게 증가하였다. 확률오차가 1 m/s 이상으로 증가하기 시작한 3.5 km 고도는 -3.5 dB보다 낮은 SNR의 빈도가 급격하게 증가하기 시작했던 고도와 일치하였다. 특히, 급격하게 확률오차가 증가하는 4.5 km 고도 구간은 M^2 이 급격하게 감소하였고 -8~7 dB 사이의 SNR 빈도가 가장 높았던 구간과 일치하였다.

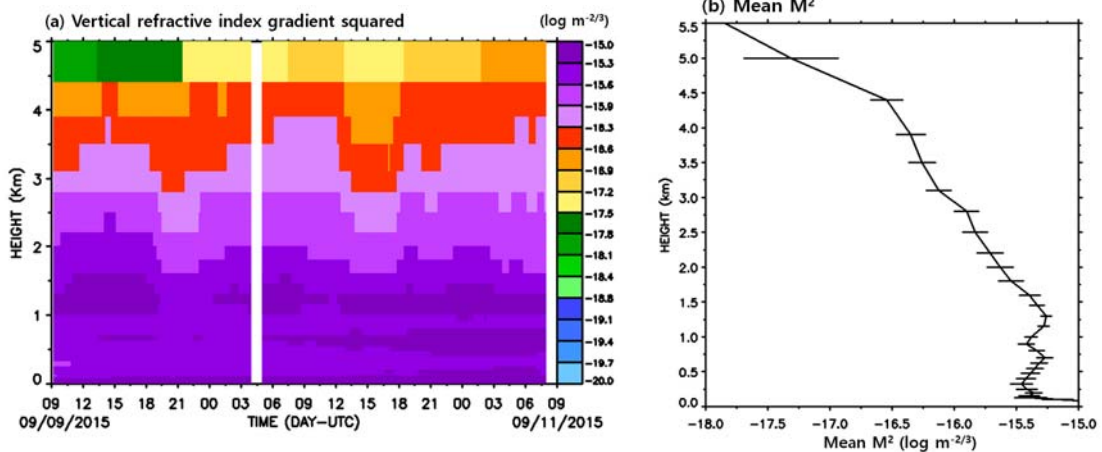


Fig. 6. (a) Time-height cross section of 10-min values of vertical refractive index gradient squared (M^2) and (b) mean M^2 profile from radiometer at Uljin. Error bars represent standard deviation of M^2 .

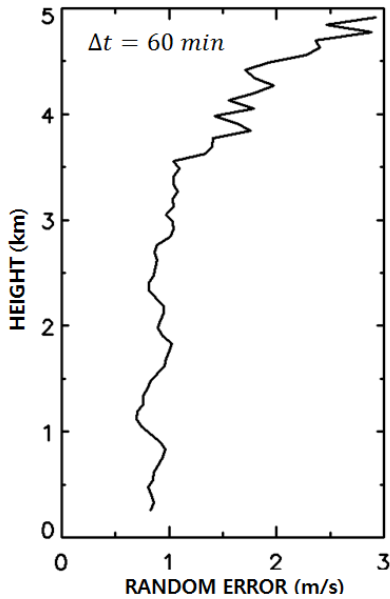


Fig. 7. Vertical profile of random error of wind speed from 1290 MHz wind profiler at Uljin.

라디오존데로부터 산출한 WPR의 고도별 풍속 RMSE는 3.5 km 고도에서 증가하기 시작하였고, 4.5 km 고도에서 1.2 m/s이었던 RMSE가 5 km에서는 5 m/s로 급격하게 증가하였다(Fig. 8(a)). 이는 확률오차의 고도별 증가 경향과 동일하였다. 라디오존데와 윈드프로파일러의 평균 풍속은 고도에 따라 약 5 m/s에서 15 m/s까지 증가하였다(Fig. 8(b)). 정확도와 연속성이 감소하기 시작한 고도는 3.5 km이고, 3.5 km 이상의 고도에서는 -3.5 dB 미만에서 SNR 빈도가 급격하게 증가하였다. 이와 같은 결과를 통해서 -3.5 dB를 새로운 SNRmin으로 결정하였고, SNRU로 명명하였다. 즉, SNRU는 WPR의 정확도와 연속성이 급격하게 감소하는 구간과 라디오미터의 M^2 이 급격하게 감소하는 구간에서 SNR 빈도가 가장 높았던 구간의 SNR값을 의미한다.

SNRU 이상일 때 스펙트럼 모멘트를 재산출하여 바람벡터를 복원하였고, WPR의 모든 고도에 대하여

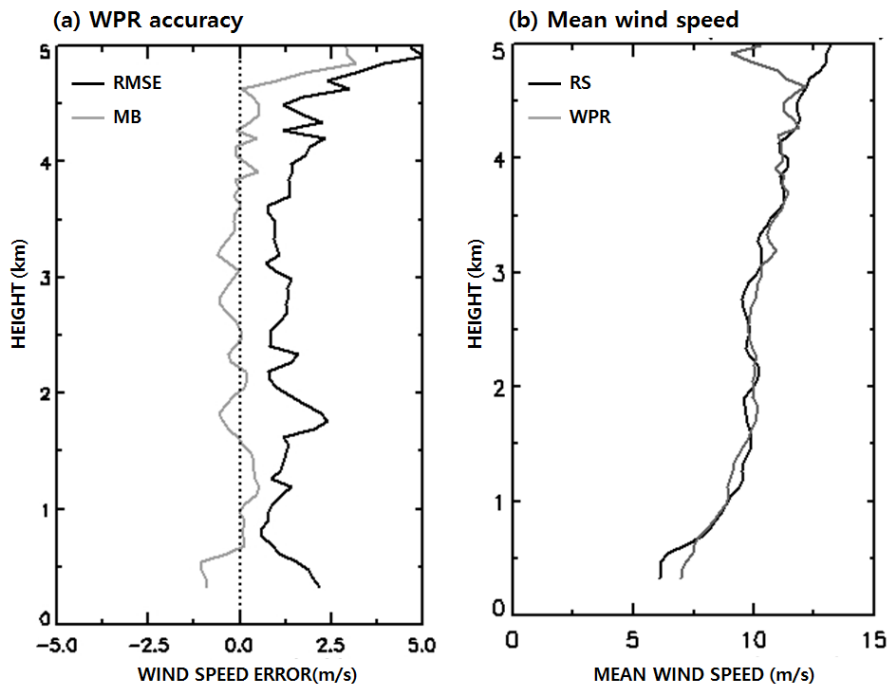


Fig. 8. (a) Vertical profile of root mean square error and mean bias of wind speed from 1290 MHz wind profiler radar based on radio sonde profile. (b) Vertical profile of mean wind speed observed by wind profiler radar and radio sonde at Uljin.

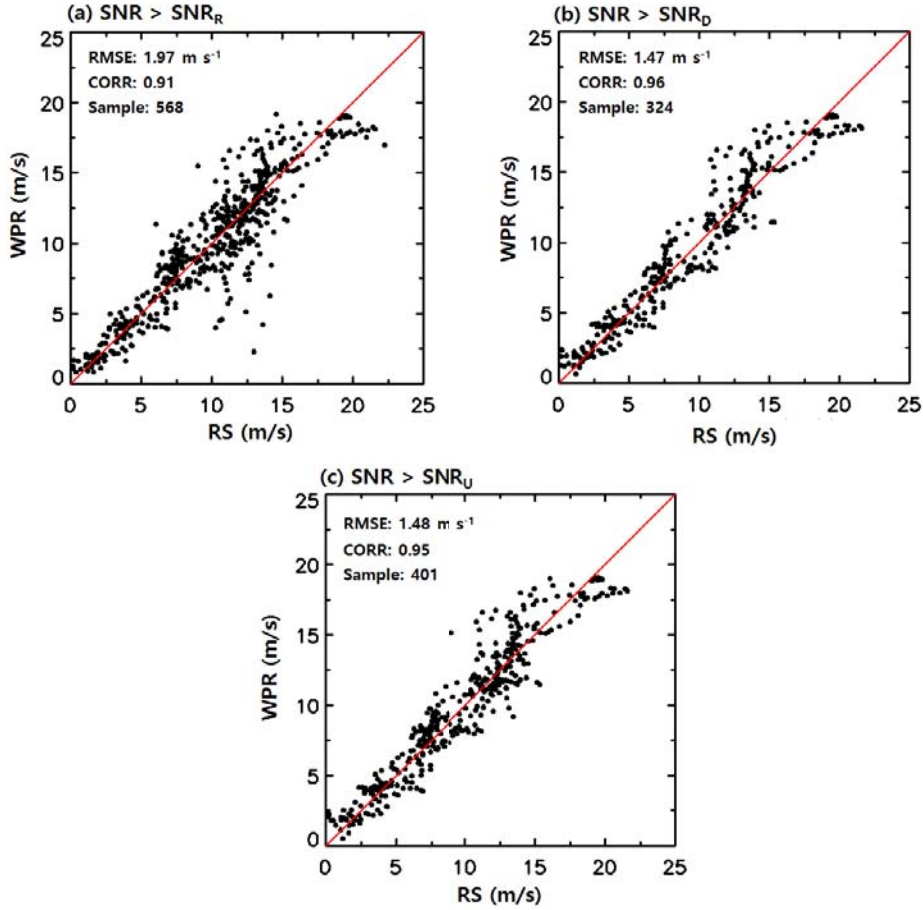


Fig. 9. Scatter plots of wind speed between radio sonde (RS) and wind profiler (WPR) for each SNR_{min} .

풍속의 정확도를 재산출하였다. 또한 SNR_D 와 SNR_R 을 기준으로 산출된 WPR의 모든 고도의 풍속의 정확도와 비교하였다. 정확도 산출을 위해 이용된 WPR과 라디오존데의 총 샘플 수는 48시간 동안 SNR_R , SNR_D , SNR_U 에 대하여 각각 568, 324, 401개였다. SNR_R 을 기준으로 검출된 풍속의 RMSE와 CORR은 각각 1.97 m/s, 0.91이었고, 10~15 m/s 구간에서는 과소 추정된 WPR의 풍속이 검출되었다(Fig. 9(a)). SNR_D 를 기준으로 검출된 풍속의 RMSE와 CORR은 각각 1.47 m/s, 0.96이었다(Fig. 9(b)). 10~15 m/s 구간에서 과소 추정되었던 WPR의 풍속은 SNR_D 에 의해 제거되었고, SNR_D 를 기준으로 검출된 풍속의 정확도와 상관도는 향상되었다. SNR_U 를 기준으로 검출된

풍속의 RMSE와 CORR은 1.48 m/s, 0.95이었다(Fig. 9(c)). SNR_U 의 샘플수는 SNR_D 보다 77개 많았으며, SNR_D 기준으로 검출된 풍속의 RMSE와 0.01 m/s 차이로 거의 동일하였다. 즉, SNR_U 은 SNR_D 보다 더욱 많은 수의 정확도가 높은 바람벡터를 복원하였고, SNR_R 의 10~15 m/s 구간에서 과소 추정되었던 WPR의 풍속도 제거할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 청천대기에서 SNR_{min} 에 의해 제거된 WPR의 바람벡터를 원시자료를 이용하여 복원하였다. SNR_{min} 은 SNR_D (1 dB), SNR_R (-15.16 dB),

그리고 SNR_U (-3.5 dB)로 구분하였다. SNR_{min} 미만에서 복원된 바람벡터의 정확도는 라디오존데의 바람벡터를 통해서 정량적으로 산출하였고, WPR의 시계열 자료로부터 Kitchen(1989)의 확률오차를 통해서 자료의 연속성을 산출하였다. 또한 울진기상대의 라디오미터로부터 대기 굴절률의 변동성을 정량적으로 산출하여 WPR SNR 분포의 연관성을 파악하였다.

SNR_R 이상의 바람벡터를 복원하여 정확도와 연속성을 산출한 결과, 3.5 km 이상의 고도에서 감소하기 시작하였고, 4.5 km 구간에서 급격하게 감소하였다. 3.5 km 고도는 -3.5 dB보다 낮은 SNR의 빈도가 급격하게 증가하기 시작했던 고도와 일치하였다. 특히, 급격하게 확률오차가 증가하는 4.5 km 고도 구간은 M^2 이 급격하게 감소하였던 구간이었고, -8~-7 dB 사이의 SNR 빈도가 가장 높았던 구간과 일치하였다. -3.5 dB를 새로운 SNR_{min} 으로 결정한 후 풍속의 정확도를 산출한 결과, SNR_D 와 거의 동일한 정확도의 풍속을 검출하였고, SNR_D 보다 많은 수의 자료를 검출할 수 있었다. 또한, SNR_R 에 포함되어있던 과소 추정된 WPR 자료를 제거할 수 있었다. 울진기상대의 WPR에 설정된 1 dB의 SNR_{min} 은 청천대기에서 과대 설정된 것으로 판단된다. 즉, SNR_U 와 같이 더 낮은 SNR 임계값 설정은 기존의 SNR 임계값에서 산출된 바람벡터의 정확도를 유지하면서 기존의 SNR 임계값에 의해 제거된 정확도 높은 바람벡터를 복원하는 역할과 SNR_U 보다 낮은 SNR에서 과대 혹은 과소 추정된 바람벡터를 제거하는 역할을 수행한다.

고도별 WPR 바람벡터의 정확도 및 연속성은 SNR의 빈도 분포와 대기 굴절률의 변동성과 직접적인 연관이 있었고, SNR_{min} 의 적합성을 정량적으로 평가할 수 있었다. 또한 적합한 SNR_{min} 의 결정을 위한 정량적인 방법을 제시할 수 있었다. 대기 굴절률의 변동성은 기온과 습도와 같은 대기 매질의 상태에 영향을 받기 때문에 계절에 따라 그 특성이 달라질 수 있다. 향후 WPR과 라디오미터 자료를 장기간 계절별로 확보하여 대기 굴절률의 변동성과 고도별 WPR의 정확도에 대한 계절적 특성을 분석할 예정이며, 장기간 자료를 통해서 계절에 따른 적합한 SNR_{min} 을 제시할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Bean, B. R., Dutton, E. J., 1965, Radio Meteorology, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 431.
- Hardy, K. R., Gage, K. S., 1990, The history of radar studies of the clear atmosphere, in D. Atlas (ed.), Radar in Meteorology, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 130-142.
- Hartten, L. M., Johnston, P. E., 2014, Stratocumulus-topped marine boundary layer processes revealed by the absence of profiler reflectivity, J. Appl. Meteorol. Clim., 53, 1775-1789.
- Heo, B. H., Jacoby-Koaly, S., Kim, K. E., Campistron, B., Benech, B., Jung, E. S., 2003, Use of the doppler spectral width to improve the estimation of the convective boundary layer height from UHF wind profiler observations, J. Atmos. Ocean. Tech., 20, 408-424.
- Holleman, I., Van Gasteren, H., Bouten, W., 2008, Quality assessment of weather radar wind profiles during bird migration, J. Atmos. Ocean. Tech., 25, 2188-2198.
- Ishihara, M., Kato, Y., Abo, T., Kobayashi, K., Izumikawa, Y., 2006, Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan meteorological agency, J. Meteor. Soc. Japan, 84, 1085-1096.
- Kim, K. H., Kim, M. S., Seo, S. W., Kim, P. S., Kang, D. H., Kwon, B. H., 2015, Quality evaluation of wind vectors from UHF wind profiler using radiosonde measurements, J. Env. Sci. Int., 24, 133-150.
- Kitchen, M., 1989, Representativeness errors for radiosonde observations, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 115, 673-700.
- Lindseth, B., Brown, W. O., Jordan, J., Law, D., Hock, T., Cohn, S. A., Popović, Z., 2012, A new portable 449-MHz spaced antenna wind profiler radar, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50, 3544-3553.

- Maruri, M., Romo, J. A., Gomez, L., 2014, Aspects of quality control of wind profiler measurements, *J. Atmos. Meas. Tech.*, 7, 135-148.
- Monna, W. A., Chadwick, R. B., 1998, Remote -sensing of upper-air winds for weather forecasting: Wind-profiler radar, *Bull. WMO*, 47, 124-132.
- Ottersten, H., 1969, Mean vertical gradient of potential refractive index in turbulent mixing and radar detection of CAT, *Radio Science*, 4, 1247-1249.
- Hildebrand, P. H., Sekhon, R. S., 1974, Objective determination of the noise level in doppler spectra, *J. Appl. Meteor.*, 13, 808-811.
- Riddle, A. C., Hartten, L. M., Carter, D. A., Johnston, P. E., Williams, C. R., 2012, A minimum threshold for wind profiler signal-to-noise ratios, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29, 889-895.
- Robert, E., Barbré, Jr., 2012, Quality control algorithms for the kennedy space center 50-MHz doppler radar wind profiler winds database, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29, 1731-1743.
- Weber, B. L., Wuertz, D. B., Welsh, D. C., McPeck, R., 1993, Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 10, 452-464.