

ORIGINAL ARTICLE

라디오존데 관측자료를 이용한 UHF 윈드프로파일러 바람관측자료의 품질평가

김광호 · 김민성 · 서성운 · 김박사¹⁾ · 강동환¹⁾ · 권병혁*

부경대학교 환경대기과학과, ¹⁾부경대학교 지구과학연구소

Quality Evaluation of Wind Vectors from UHF Wind Profiler using Radiosonde Measurements

Kwang-Ho Kim, Min-Seong Kim, Seong-Woon Seo, Park-Sa Kim¹⁾,
Dong-Hwan Kang¹⁾, Byung Hyuk Kwon*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹⁾Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract

Wind profiler provides vertical profiles of three-dimensional wind vectors with high spatiotemporal resolution. The wind vectors is useful to analyze severe weather phenomena and to validate the various products from numerical weather prediction model. However, the wind measurements are not immune to ground clutter, bird, insect, and aircraft. Therefore, quality of wind vectors from wind profiler must be quantitatively evaluated prior to its application. In this study, wind vectors from UHF wind profiler at Ganwon Regional Meteorological Administration was quantitatively evaluated using 27 radiosonde measurements that were launched every two or three hours according to rainfall intensity during Intensive Observation Period (IOP) from June to July 2013. In comparison between two measurements, wind vectors from wind profiler was relatively underestimated. In addition, the accuracy and quality of wind vectors from wind profiler decrease with increasing beam height. The accuracy and quality of the wind vectors for rainy periods during IOP were higher than for the clear-air measurements. The moderate rainfall intensity lead to multi-peaks in Doppler spectrum. It results in overestimation of vertical air motion, whereas wind vectors from wind profilers shows good agreement with those from radiosonde measurements for light rainfall intensity.

Key words : UHF windprofiler, Radiosonde, Quality control, Ground clutter, Doppler spectrum

1. 서 론

윈드프로파일러는 수 분의 시간분해능과 수 십 미터의 공간분해능으로 바람의 연직구조를 제공할 수 있어, 위험기상을 분석하거나 수치예보모델의 예측정확도를

높이기 위한 기초 자료로 널리 활용되고 있다(Weber et al., 1993; Ishihara,2006; Holleman et al., 2008; Robert, 2012; Maruri et al., 2014). 특히 중규모 악기상의 연직 구조를 파악하기 위한 중요한 도구로 이용되어 왔다 (Won et al. 2006). 이와 같이 윈드프로파일러 자료의 중

Received 2 December, 2014; Revised 6 January, 2015;

Accepted 7 January, 2015

*Corresponding author: Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Phone: +82-51-629-6644, Fax : +82-51-629-6638

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.

요성이 증대됨에 따라 국내에서는 2003년 기상연구소에서 해남에 UHF 윈드프로파일러를 설치하였으며, 기상청을 중심으로 2004년부터 강릉, 파주, 군산, 창원, 원주, 철원, 서해중합해양과학기지, 울진, 추풍령에 프랑스 Decreane사의 UHF 윈드프로파일러를 설치하여 국가규모 관측망을 구성하였다. 이후 울산공항, 김해공항, 여수공항에도 윈드프로파일러를 설치하여 공항난류 탐지에 활용하고 있으며 최근에는 공군에서도 항공작전지원을 위해 청주공항에 UHF 윈드프로파일러를 설치하였으며 향후 전국관측망을 구성할 계획에 있다.

윈드프로파일러 자료는 전자기파를 사용하는 원격탐사자료의 특성으로 인해 클러터, 전파 간섭, 새 혹은 항공기 등에 의한 영향을 빈번하게 받는다. 그 결과 미국, 유럽, 일본에서는 윈드프로파일러 자료의 품질을 개선하기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다 (Weber et al., 1993; Ishihara, 2006; Holleman et al., 2008; Robert, 2012; Maruri et al., 2014). 특히 윈드프로파일러는 지상에서 대기로 전파를 방사하여 대기의 강수입자에 의한 레일리 산란(Rayleigh scattering) 신호와 함께 난류에 의한 브래그 산란(Bragg scattering) 신호를 수신한다. 대기 중에서 강수가 발생하고 브래그 산란과 레일리 산란의 강도가 유사할 경우, 윈드프로파일러는 강수입자의 낙하속도에 의해 오염된 대기의 연직속도를 추정하게 된다. 최근에는 개선된 방법으로 각 고도별 도플러 스펙트럼에서 최소 2개 이상의 침두를 선택하는 다중침두 알고리즘이 널리 사용되고 있다 (Cornman et al., 1998; Griesser, 1998; Wilfong et al., 1999; Morse et al., 2002). 기상청의 UHF 윈드프로파일러들은 대기의 연직속도 관측에서 강수신호의 영향을 최소화하고자 3개의 도플러 스펙트럼 침두로부터 시선속도를 결정하는 좀 더 개선된 다

중 침두 알고리즘과 다양한 통계기법의 품질검사 알고리즘을 사용하고 있다 (Currier, 2003). 그러나 국내 윈드프로파일러 연구들은 수치모델의 자료동화 및 검증연구와 재해기상분석(e.g. 집중호우, 폭설)에 집중되어 있으며 (Park et al., 2005; Won et al., 2006; Park et al., 2010; Jung et al., 2014). 윈드프로파일러 자료의 정확성과 품질에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 기상청 윈드프로파일러 중 강릉에 설치된 UHF 윈드프로파일러의 바람관측자료의 품질을 정량적으로 검증하였다. 우선 품질측면에서 윈드프로파일러 자료의 연속성과 자료수집률을 분석하였다. 정확도 검증에 위해 강릉 윈드프로파일러 관측지점에서 라디오존데 집중관측을 수행하였으며, 라디오존데 바람관측자료의 비교를 통해 윈드프로파일러 바람관측자료의 정확도를 정량적으로 분석하였다. 또한 윈드프로파일러의 고도별 정확도 및 품질분석결과와 연계하여 윈드프로파일러의 도플러 스펙트럼 분석에 기반한 오차원인 분석을 수행하였다.

2. 자료

윈드프로파일러 정확성 평가를 위해서 적용된 연구 사례는 Table 1과 같다. 윈드프로파일러 자료는 10분 간격으로 수집하며, 연구사례에 해당되는 6월과 7월은 각각 48시간, 24시간 동안의 자료를 이용하였다. 라디오존데 자료는 6월과 7월에 각각 2시간, 3시간간격으로 수집하였다. 6월에는 총 18회 비양하였고, 7월에는 총 9회 비양하였다. 6월은 7월에 비하여 장마전선에 의한 영향으로 강수가 많이 발생하였기 때문에, 더욱 조밀하게 2시간 간격으로 고층 대기를 관측하였다. AWS 우량계의 강수

Table 1. General information of intensive observation periods

Instruments	Periods (LST)	Temporal resolution (minute)	Number of data
Wind profiler	09LST 17 ~ 09LST 19 June 2013	10	279
	09LST 10 ~ 09LST 11 July 2013	10	144
	18LST 17 ~ 10LST 18 June 2013	120	9
Radiosonde	13LST 18 ~ 08LST 19 June 2013	120	9
	09LST 10 ~ 09LST 11 July 2013	180	9
Rain gauge	09LST 17 ~ 09LST 19 June 2013	10	288
	09LST 10 ~ 09LST 11 July 2013	10	144

량 자료는 10분 간격으로 수집하며 윈드프로파일러 자료 수집 기간과 동일하다.

UHF 윈드프로파일러의 관측모드는 고층관측방식(high mode)과 저층관측방식(low mode)이 있다. 윈드프로파일러에서 방사하는 전파의 펄스폭(pulse width)과 펄스반복주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)는 각각 공간적 관측해상도와 최고관측고도에 영향을 주며, 펄스폭이 길수록 관측 분해능은 낮아지고 PRF가 작을수록 최고관측고도는 높아진다. 강릉 윈드프로파일러의 고층관측방식과 저층관측방식의 관측 해상도는 각각 164.85 m, 71.68 m 이고, 최고관측고도는 각각 약 11.0 km, 5.0 km이다. 본 연구에서는 관측 해상도가 더 높은 저층관측방식의 윈드프로파일러 자료를 이용하였다. Table 2와 같이 저층관측방식에 대한 강릉 윈드프로파일러의 최고관측고도는 5.1 km이며, 71.68 m의 고도분해능으로 총 71개의 고도에서 10분 간격으로 자료를 생

성한다. 윈드프로파일러의 관측 정확도 검증을 위하여 고도별 수평풍속과 풍향, 연직속도, 수신전력, 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 도플러 스펙트럼을 이용하였다. 도플러 스펙트럼은 도플러 편이 주파수 혹은 시선속도에 스펙트럼 밀도를 나타낸 것이다. 도플러 스펙트럼은 잡음 수준보다 높은 신호의 침투에 대한 면적과 폭, 침투 신호에 대응되는 시선속도, 그리고 침투신호의 비대칭도를 통해서 각각 수신전력, 스펙트럼폭, 시선속도, 스펙트럼 비대칭도를 표현한다. 즉, 도플러 스펙트럼에 의해서 윈드프로파일러의 모멘트들이 결정되는 것이다. 본 연구에서는 윈드프로파일러의 오차 원인을 분석하기 위하여 윈드프로파일러의 연직빔과 4개의 경사빔에 대한 도플러 스펙트럼 자료를 활용하였다.

라디오존데는 독일 GRAW의 DFM-06센서를 이용하였다(Table 3). 라디오존데의 비양 시간 간격을 지상의 강수 발생 유무에 따라 조정하였다. 지상에 강수가 발

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

Parameter	Value	Unit
Frequency	1290	MHz
Peak power	4.5	kW
Beam number	5	
Pulse Repetition Frequency	16	kHz
Nyquist velocity	12.84	m s ⁻¹
Number of FFT points	128	
Lowest sampled height	72	m
Highest sampled height	5100	m
Range resolution	71.68	m
Number of height gates	71	

Table 3. Technical specifications of temperature and humidity sensors in radiosonde instrument (DFM-06)

Parameter	Value	Unit
Weight	< 90	g
Transmission range	250	km
Programmable frequency	400 ~ 406	MHz
Wind speed accuracy	< 0.2	m s ⁻¹
Temperature accuracy	< 0.2	℃
Humidity accuracy	< 5	%
Pressure accuracy	< 1	hPa
Geopotential height accuracy	< 20	m
Horizontal position accuracy	< 5	m

생하지 않는 기상 현상에 대해서는 3시간 간격으로 라디오존데를 비양하였고, 강수가 발생한 경우에는 2시간 간격으로 라디오존데 관측을 수행하였다. 라디오존데에서 관측된 기상정보는 1초 간격으로 저장되었다. 윈드프로파일러의 검증을 위하여 사용한 라디오존데 관측 변수는 고도별 수평 풍속과 풍향이다.

3. 연구방법

윈드프로파일러 자료의 정확성을 분석하는 방법은 윈드프로파일러 관측 자료의 연속성과 수집률에 대한 품질 평가와 집중 관측에서 수집한 라디오존데 자료를 이용하여 통계적 방법으로 검증하는 정확도 평가로 구분할 수 있다. 강수 유무에 따른 윈드프로파일러 관측 자료의 정확도를 검사하기 위하여 집중 관측도 강수가 있을 때와 없을 때로 구분하여 실행되었다. 지상에서 측정되는 강수 특성만으로는 고도별 대기 상태를 알 수 없기 때문에 시선속도와 수신전력의 관계로 강수의 연직 분포를 파악하고, 이에 따라 윈드프로파일러로 관측한 바람의 정확도를 조사하였다.

3.1. 강수 구분

강수가 발생할 때 관측되는 윈드프로파일러의 바람은 윈드프로파일러의 자료 수집 시간 동안 강수 현상의 강도와 형태가 일정하게 유지되고, 각 빙마다 균일한 속도로 강수가 내린다는 가정 하에 관측되는 결과이다. 대류형 강수 현상이 발생한 경우에는 강수의 공간적 불균일성에 의해 이러한 가정은 성립되지 않는다. 공간적으로 불균일한 강수 분포에 의해 윈드프로파일러에서 방사하

는 각 빙마다 산란 조건이 달라지는데, 하나의 빙에는 브래그 산란이 발생하고, 다른 빙에는 레일리 산란이 발생하는 경우 윈드프로파일러에서 관측된 수평 풍속에 심각한 오류가 발생할 수 있다.

강수 형태에 따른 윈드프로파일러 관측 변수의 특성으로 고도별 강수 형태를 구분할 수 있다. Ralph et al. (1996)은 UHF 윈드프로파일러의 연직빔에서 수집된 연직 시선속도와 수신전력 사이의 상관성을 이용하여 고도별 강수 형태를 구분하였다. 대기 중에 강수입자가 없는 경우에는 연직 시선속도와 수신전력 사이에 뚜렷한 상관성이 존재하지 않지만, 비와 눈의 경우에는 연직 시선속도와 수신전력 사이의 뚜렷한 상관성이 나타난다. Baek et al. (2005)는 2003년 해남에 설치되어 있던 L-28 UHF 윈드프로파일러 결과를 Table 4와 같이 Ralph et al. (1996)로부터 제안된 기준에 적용하여 연직 강수 형태를 구분하였다. 지상에 강수가 기록되더라도 같은 시간에 고도별 대기 조건은 Table 4와 같이 무강수, 눈, 녹는눈, 그리고 강우 영역으로 구분된다. 연구 사례 기간에는 장마전선의 형성에 의해서 강수가 발생하였고, 강수는 대기 운동의 시공간적 비균질성을 높임으로써 윈드프로파일러의 관측 오차를 유발하는 원인이 될 수 있다. Table 4의 기준을 이용하여 고도별 강수 유무를 판별하였고, 고도별 강수 유무에 따른 윈드프로파일러 관측의 정확도를 분석하였다. 또한, AWS 우량계의 시계열 자료를 통해서 지상 강수 유무에 따른 윈드프로파일러 관측 자료의 품질을 분석하였다.

3.2. 연속성 검사

윈드프로파일러는 10분 이내의 간격으로 바람을 관측

Table 4. Category of hydrometeor classification based on spectral moments of wind profiler (Ralph et al., 1996; Baek et al., 2005)

Classification	Vertical velocity (V_w)	Signal power (S_p)	Remark
Air (no precipitation)	$-0.3 < V_w < 0.3 \text{ m s}^{-1}$	wide range	Bragg scattering from air
Snow	$-1.5 < V_w < -0.3 \text{ m s}^{-1}$	wide range	Strong correlation between radial velocity and received power
Melting snow	$-3.0 < V_w < -1.5 \text{ m s}^{-1}$	higher	
Rain	$V_w < -3.0 \text{ m s}^{-1}$	higher	lower but significant correlation between radial velocity and received power
Noise	wide range	lower	

하기 때문에 연속적인 시계열을 생성할 수 있다. 연속적인 시계열 자료는 확률오차(random error)를 추정할 때 이용되며, 확률오차를 통해서 윈드프로파일러 관측 자료의 연속성을 검사할 수 있다. 연속성 검사 방법은 자료 수집 시간 간격(Δt)에 따라 확률오차를 산출하는 것이다. 윈드프로파일러의 확률오차는 Kitchen(1989)에 의해 제안된 방법으로 산출하였다. 식 (1)은 Δt 에 따른 대기 변동성을 의미하며, 식 (2)는 대기 변동성을 고려하여 확률오차를 산출하는 방법을 의미한다.

$$\tau_u(\Delta t) = b(\Delta t)^\gamma \quad (1)$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{(\text{rms}V(\Delta t))^2 - (\tau_u(\Delta t))^2}{2}} \quad (2)$$

여기서, τ_u 는 바람에 의한 대기의 변동성을 의미하고, Δt 는 τ_u 함수에 대한 시계열 자료 간의 시간 간격이며 Dibbern et al. (2001)의 방법과 동일하게 30분, 60분, 120분, 그리고 240분으로 결정하였다. γ 와 b 는 대기 변동성 계산을 위한 상수이다. τ_u 는 Δt , γ , 그리고 b 에 의해 대기변동성을 의미하는 상수로 결정된다. 대기변동성을 나타내는 ϵ 은 윈드프로파일러의 확률오차이며, $\text{rms}V(\Delta t)$ 는 시계열 시간 간격에 따른 윈드프로파일러 수평풍속(V)자료의 순서쌍($V_t, V_{t+\Delta t}$)에 대한 제곱근-평균-제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 의미한다. 식 (1)의 γ 와 b 는 윈드프로파일러의 관측 기간과 연직 해상도에 의존하는데, 일반적으로 γ 는 0.5에서 0.6 사이의 범위에 있고, b 는 τ_u 에 큰 영향을 미치지 않는 변수로써, 본 연구에서는 1을 사용하였다(Dibbern et al., 2001). 윈드프로파일러의 확률오차는 시계열 자료의 시간 간격에 따른 바람의 연속성을 나타내는 지표로 이용하였고, 확률오차의 크기가 작을수록 윈드프로파일러 관측 자료의 연속성이 높은 것이다.

3.3. 자료수집률 검사

윈드프로파일러로 수신되는 시계열 신호는 대기 신호와 더불어 윈드프로파일러 시스템의 전기 잡음, 대기 중의 배경 잡음 등이 섞여서 나타난다. 이러한 무작위 잡음은 정확한 대기 신호 추출에 있어서 방해 요소로 작용하

고, 수신전력이 약해질수록 대기 신호의 세기도 약해지기 때문에 무작위 잡음 속에서 뚜렷한 대기 신호를 찾기가 더욱 어려워진다. 무작위 잡음을 최대한 줄여야만 뚜렷한 대기 신호를 구분할 수 있는데, 이때 대기 신호와 잡음이 섞여있는 비율을 나타낸 값이 SNR이다. 윈드프로파일러는 관측 고도가 높아질수록 SNR과 수신전력이 점차 감소하는 특징을 보이며, 이에 따라 대기 상층으로 갈수록 수집되는 자료의 수도 점차 감소한다. 본 연구에서는 윈드프로파일러의 SNR과 수신전력에 따른 고도별 자료수집률을 윈드프로파일러 관측자료의 품질을 나타내는 척도로 이용하였다.

3.4. 정확도 평가

윈드프로파일러와 라디오존데의 비교 관측에 의해 발생하는 차이는 두 시스템의 관측 오차와 기상학적인 변동에 의한 시공간적 오차의 조합에 의해 발생한다. 윈드프로파일러와 라디오존데의 비교는 윈드프로파일러 관측의 정확도와 품질에 대한 평가에 있어서 매우 중요한 연구로서 진행되었다(Steinhagen et al., 1994). 본 연구에서 윈드프로파일러의 정확도는 라디오존데를 이용하여 Table 5의 통계적 방법을 통해서 산출하였다. 평균 편차(Mean Bias, MB)는 윈드프로파일러 오차의 방향성을 나타낸다. 평균 편차의 부호가 양(+)일 경우에는 윈드프로파일러가 라디오존데에 비하여 과소 측정되었다는 것을 의미한다. 제곱근평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 윈드프로파일러 오차의 크기를 나타낸다. 정규화된 RMSE(Normalized RMSE, NRMSE)는 수평풍속에 대한 영향으로부터 윈드프로파일러 오차의 크기를 정규화한 것을 의미한다. 단, NRMSE는 계산 특성상 풍속이 낮은 하층에서 분모의 값이 작기 때문에 큰 값으로 나타날 수 있다. 그렇기 때문에, 강한 수평 풍속의 영향이 큰 상층 분석 시에 주로 이용된다. Table 5의 N은 각 고도별 라디오존데와 윈드프로파일러 자료의 수를 의미한다. V_R 과 V_W 는 각각 라디오존데와 윈드프로파일러의 수평풍향, 풍속을 대표하며, \bar{R} 과 \bar{W} 는 V_R 과 V_W 에 대한 평균값이다. 통계적 검증을 위하여 윈드프로파일러와 고도별로 100m 이동평균한 라디오존데자료를 시공간적으로 일치시켰다. 시간적으로는 라디오존데의 비양시간과 가장 근접한 시간에 측정된 윈드프로파일러 자료를 대응시켰다. 공간적으로는 각 고도별 윈드프로파

Table 5. Lists of skill score for accuracy validation of wind vectors of 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	$\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N (V_R - V_W)^2}$
Normalized Root Mean Square Error	NRMSE	$\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N \left(\frac{V_R - V_W}{V_R}\right)^2}$

V_W : Measured by Wind Profiler Radar (WPR)

V_R : Measured by RadioSonde (RS)

일러 자료와 가장 근접한 고도의 라디오존데 자료를 대응시켰다.

4. 분석 결과

4.1. 고도별 강수 구분

윈드프로파일러 관측 변수의 특징을 이용한 고도별 강수 유무 판별 방법은 Fig. 1과 같이 연직속도와 수신전력의 상관성을 이용한다. Fig. 1의 산포도 상에 표시한 검은색 상자는 강수형태를 구분하기 위한 것이다. 상자 내의 숫자는 강수 형태를 의미하는데 1부터 4까지 각각 무강수, 눈, 녹는 눈, 그리고 강우를 의미한다. 지상 강수 유무에 따라 고도별 강수 유형을 분리한 결과, Fig. 1a와 같이 지상에 강수가 발생하지 않았을 경우, 모든 고도에서 대부분의 윈드프로파일러 자료는 연직속도 $0.3 \sim -0.3 \text{ m s}^{-1}$ 와 80dB 이하의 넓은 수신전력 범위의 무강수 영역에 해당하였다. 이는 지상의 강수 유무와도 일치하였다. 지상의 무강수 분포와는 다르게 약 2.0 km 이상의 고도에서는 눈과 녹는 눈, 그리고 강우 영역이 발생하였다. 특히, 녹는 눈은 약 4.0 km 이상의 고도에서 뚜렷하게 발생하였고, 그 아래로 강우의 형태로 변환되면서 약 2.0 km 까지 강우 영역이 나타났다. 이와 같이 지상에 강수가 발생하지 않더라도 대기의 상층에는 강수가 존재할 수 있으며, 지상의 무강수 사례에 대한 윈드프로파일러의 정확도는 고도에 따라 강수의 영향이 포함될 수 있음을 의

미한다. 눈 영역은 녹는 눈과 강우 영역에 비하여 뚜렷하게 구분하기 어려웠다. 눈 영역에서는 고도 2.0 km 이상에서 $-0.3 \sim -1.5 \text{ m s}^{-1}$ 의 연직속도와 40 ~ 60dB의 좁은 수신전력 범위의 낮은 상관성을 보였다. 여름철 높은 기온에 의해 상층의 눈은 대부분 하층으로 하강하면서 강우로 전환되기 때문에 눈 영역에서의 연직속도와 넓은 범위의 수신전력 사이의 상관성은 강하게 나타나기 어려웠다.

Fig. 1b와 같이 지상에 강수가 발생한 경우에 대부분의 윈드프로파일러 자료는 녹는 눈과 강우 영역에 해당하였다. 약 2.0 km 이상의 고도에서는 녹는 눈 영역이 나타났다, 약 4.0 km 이상의 고도에서 더욱 뚜렷하게 발생하는 것을 알 수 있었다. 강우 영역은 하층부터 약 4.0 km 이하의 높은 고도까지 고르게 분포하였고, 이는 지상의 강수 사례와도 일치하는 결과였다. 즉, 지상의 강수 유무에 따른 윈드프로파일러의 연직속도와 수신전력의 상관성 분석은 고도별 강수 유무 구분 방법에 대한 유의성을 대표하였다.

4.2. 연속성 검사

윈드프로파일러 자료의 품질은 윈드프로파일러 시계열 자료의 연속성과 수집률로 평가되었다. Fig. 2와 같이 2013년 6월과 7월의 연속적인 시계열 자료를 이용하여 윈드프로파일러의 확률오차를 산출하였다. Fig. 2a는 강수가 발생했던 6월 17 ~ 19일의 윈드프로파일러 시계열

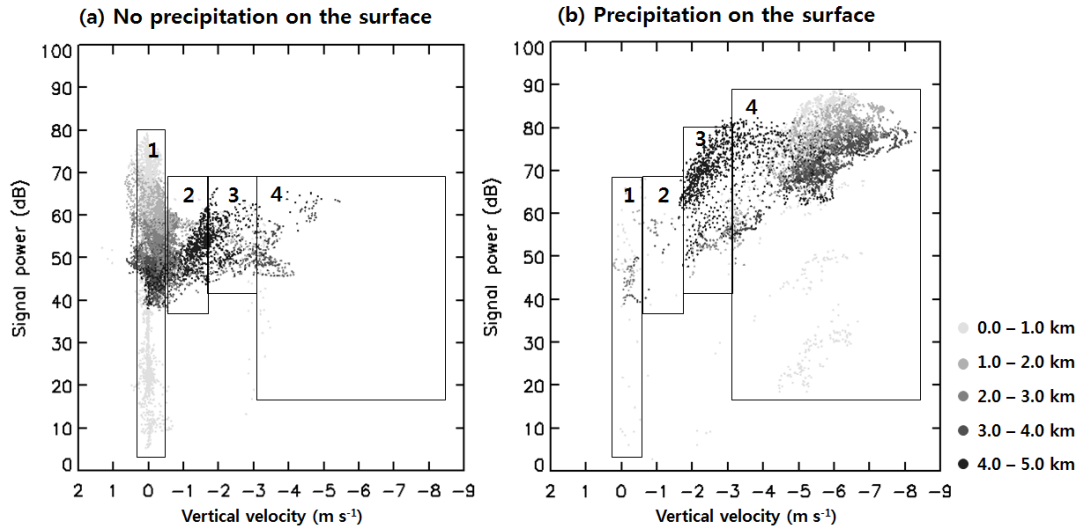


Fig. 1. Precipitation identified by vertical velocity and signal power (1: no precipitation, 2: snow, 3: melting snow, 4: rain).

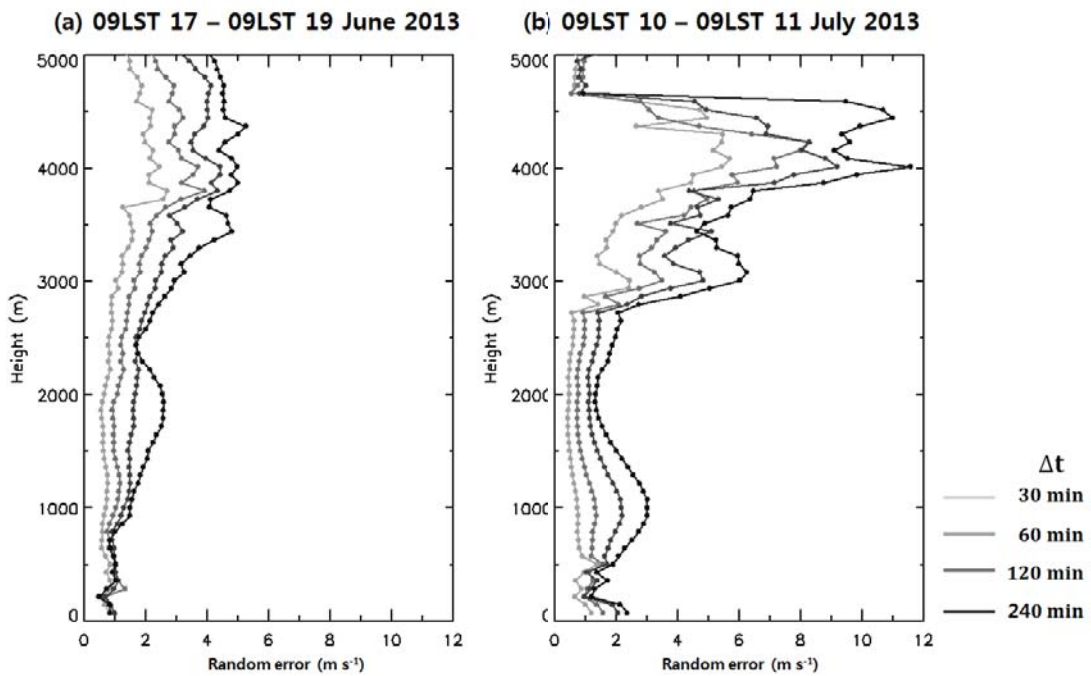


Fig. 2. Vertical profiles of random error at different time intervals.

자료를 이용하여 산출한 고도별 확률오차이다. Δt 는 윈드프로파일러의 자료수집 시간 간격으로 Δt 가 길어질수록 모든 고도에서 확률오차는 증가하여, 윈드프로파일러 자료의 연속성은 낮아졌다. Δt 의 변화에 따른 확률오차의 고도별 변화는 고도에 따라 점차 증가하였다. Δt 가 30분일 경우, 고도 약 3.0 km까지 확률오차는 1.0 m s^{-1} 미만으로 일정하여, 자료의 연속성도 높았다. 고도 약 3.0 km 이상부터 확률오차는 약 2.0 m s^{-1} 까지 증가하였고, 고도 3.5 km 이상부터 약 3.0 m s^{-1} 으로 급격하게 증가하였다. 이후 고도 5.0 km까지 1.0 m s^{-1} 으로 점차 감소하였다. 고도 3.5 km ~ 4.5 km의 구간에서 자료의 연속성이 낮아졌다.

Fig. 2b는 강수가 발생하지 않았던 7월의 윈드프로파일러 시계열 자료를 이용하여 고도별 확률오차이다. 무강수 기간의 확률오차는 강수 기간과 마찬가지로 Δt 가 길어질수록 증가하였고, 윈드프로파일러 자료의 연속성은 낮아졌다. Δt 가 30분일 경우, 확률오차가 1.0 m s^{-1} 미만으로 일정하게 나타나는 고도는 강수 기간에 비하여 2.8 km로 낮아졌지만, 확률오차의 크기는 강수 기간에 비하여 작았고 연속성은 컸다. 고도 2.8 km 이상에서는 강수 기간에 비하여 확률오차가 6.0 m s^{-1} 까지 급격하게

증가하면서 자료의 연속성도 낮아졌다. 고도 4.0 km에서 자료의 연속성이 가장 낮았고, 고도 4.0 km 이후로 확률오차가 점차 감소하였다. 이는 무강수 사례에 대한 정확도 평가에서 윈드프로파일러의 오차가 급격하게 증가하는 구간의 연직분포와 유사하였다.

4.3. 자료수집률 검사

지상의 강수유무에 따라 분류한 강릉 윈드프로파일러의 고도별 자료수집률은 Fig. 3과 같다. 지상 강수가 기록되었던 2013년 6월 17일 18LST ~ 18일 10LST를 제외한 모든 기간은 무강수 사례로 분류하였다. Fig. 3a는 전체 연구 기간에 대한 윈드프로파일러의 고도별 자료수집률을 나타낸다. 전체 연구 기간에 대한 윈드프로파일러의 자료수는 총 423개이다. 전체 연구 기간의 SNR과 자료수집률은 고도에 따라 점차 감소하였다. 고도 2.5 km까지는 약 95% 이상의 자료수집률을 보였다. 이후 4.0 km 고도까지 자료수집률은 80%로 점차 낮아졌다. 고도 4.0 ~ 4.3 km의 구간에서 자료수집률은 급격하게 감소하였다. 고도 4.3 km까지 점차 감소하던 SNR은 이후에 15dB에서 20dB으로 증가하였고, 자료수집률은 더 이상 감소하지 않고 약 40%로 일정하였다. 이는 고도

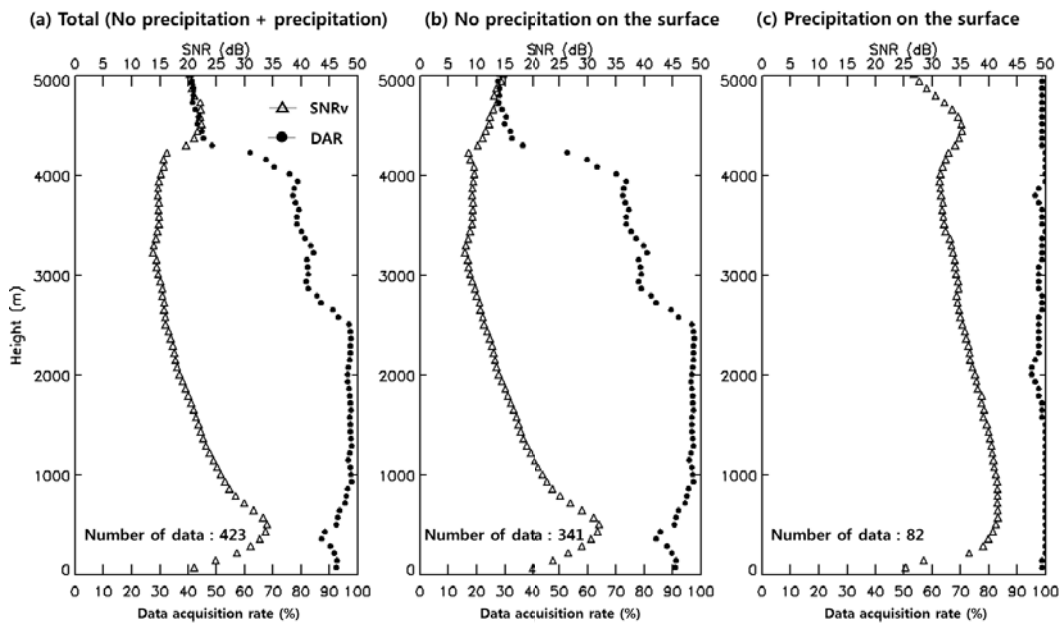


Fig. 3. Vertical profiles of Data Acquisition Rate(DAR) and Signal to Noise Ratio for Vertical beam(SNRv).

4.0 km 이상에서 발생한 강수의 영향 때문이었다. 고도 4.0 km 이상은 무강수에 해당되는 사례가 거의 나타나지 않았다(Fig. 1). 고도에 따라 점차 감소하던 SNR은 상층의 강수 영역에 의해 증가하는 경향을 보였으며, 급격하게 감소하던 자료수집률도 더 이상 감소하지 않고 일정하였다.

무강수 사례의 자료수집률은 전체 연구 기간의 자료수집률과 유사하였다(Fig. 3b). 무강수 사례의 자료수는 전체 자료 기간의 자료수의 약 80%에 해당하기 때문에, Fig. 3a에서는 무강수 사례의 자료수집률 경향이 우세하였다. 무강수 사례에서도 고도 약 4.3 km 이후로 급격하게 감소하던 자료수집률은 약 30%로 일정하게 유지되었고, 35dB에서 7dB까지 점차 감소하던 SNR도 15dB까지 증가하였다. 무강수 사례는 지상 우량계의 강수 유무에 의해 분류되었기 때문에, 무강수 사례에 대한 상층의 자료수집률 변화는 상층의 강수에 의한 영향으로 나타날 수 있다.

강수 사례에 대한 자료수집률은 모든 고도에서 약 95%로 높았다(Fig. 3c). SNR은 고도에 따라 25dB ~ 45dB으로 무강수 사례보다 높았다. 윈드프로파일러의 대기 신호는 대기 중의 강수에 의한 강한 산란으로 잡음 신호에 비하여 매우 뚜렷하였고, 이는 윈드프로파일러의 강한 SNR 연직분포와 높은 자료수집률로 나타났다.

4.4. 정확도 평가

강수는 대기 운동의 시공간적 비균질성을 높임으로서 윈드프로파일러의 관측 오차를 유발하는 원인이 될 수 있고, 고도에 따른 강수의 유무도 달라지기 때문에 고도별 강수 유무에 따른 분석이 요구된다. 본 연구에서는 전체 연구 기간에 대한 평균적인 정확도와 더불어 고도별 강수 유무에 따른 정확도를 제시하였다.

Fig. 4a에서는 전체 연구기간 동안 라디오존데와 윈드프로파일러의 고도별 수평풍속의 MB, RMSE, NRMSE, 평균풍속과 수평풍향 RMSE를 나타낸다. 고도 2.0 km 이상의 상층에 대한 윈드프로파일러의 고도별 수평풍속 MB는 약 3.8 km까지 1.5 ~ 0.0 m s⁻¹이내로 일정하였고, 라디오존데에 비하여 과대 측정되었다. 고도 3.8 km부터 4.0 km까지의 수평풍속에 대한 MB는 약 5.0 m s⁻¹까지 급격하게 증가하였다. 이 구간에서 윈드프로파일러는 라디오존데에 비하여 수평풍속을 과소 측정하였다.

고도 4.0 km부터 4.5 km까지 수평풍속에 대한 MB는 급격하게 감소하였다. 고도 4.5 km 이상에서는 ±1.0 m s⁻¹이내로 감소하였고, 윈드프로파일러의 과소 측정이 점차 완화되었다.

윈드프로파일러의 수평풍속에 대한 고도별 제공근평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 MB가 급격하게 증가하는 구간(고도 3.8 km ~ 4.5 km)을 제외하고 약 3.5 m s⁻¹미만이었다. 특히, 고도 2.5 km까지는 2.0 m s⁻¹미만의 높은 정확성을 보였고, 이후 고도 3.5 km까지 고도가 증가함에 따라 RMSE도 점차 증가하였다. MB가 급격하게 증가하는 구간의 수평풍속과 풍향에 대한 RMSE는 윈드프로파일러의 과대 측정에 의해서 각각 약 8.0 m s⁻¹와 30°까지 크게 증가하였다. 이 구간을 제외하고 약 1.0 km 이상의 고도에서 수평풍향에 대한 RMSE는 약 10° 미만으로 일정하게 높은 정확도를 보였다. 고도 1.0 km 미만에서 수평풍향의 RMSE는 약 120° 정도로 가장 높게 나타났고, 고도가 증가하면서 급격하게 감소하였다. 고도 1.0 km 미만의 평균수평풍속은 5.0 m s⁻¹미만이고, 지표면의 영향에 의해서 하층으로 내려갈수록 수평풍향의 오차가 크게 증가하였다.

NRMSE는 수평풍속 RMSE의 급격한 증가 구간(고도 3.5 ~ 4.5 km)에서 최대로 나타났으며, 라디오존데 수평풍속의 약 50%에 대한 오차가 발생하였다. 고도 2.0 ~ 3.5 km 구간의 NRMSE는 RMSE의 지속적인 증가와 다르게 오차의 증감이 나타났다. 고도 2.0 ~ 2.8 km 구간의 오차는 라디오존데 수평풍속의 약 10%에서 30%으로 점차 증가하였고, 고도 2.8 ~ 3.5 km 구간의 오차는 라디오존데 수평풍속의 약 30%에서 20%으로 점차 감소하였다.

전체 연구 사례 기간의 윈드프로파일러 연직 오차분포를 통해서 상층의 고도 약 2.0 ~ 3.5 km 구간과 고도 약 3.5 ~ 4.5 km 구간에서 발생하는 윈드프로파일러 수평풍속의 오차는 라디오존데 수평풍속 보다 30% 이상 크게 나타났고, 윈드프로파일러 오차의 불연속성은 다른 고도에 비하여 상대적으로 뚜렷하였다. 두 구간에서 발생한 윈드프로파일러의 오차는 Fig. 4b와 Fig. 4c의 강수 유무에 의한 오차의 연직분포에서 구분되었다. 고도 2.0 km 미만에서 윈드프로파일러의 수평풍속 RMSE는 2.0 m s⁻¹이내로 일정하였다. 다만, 1.0 km 이하로 고도가 감소할수록 지표면의 영향과 약한 수평풍속으로 인한

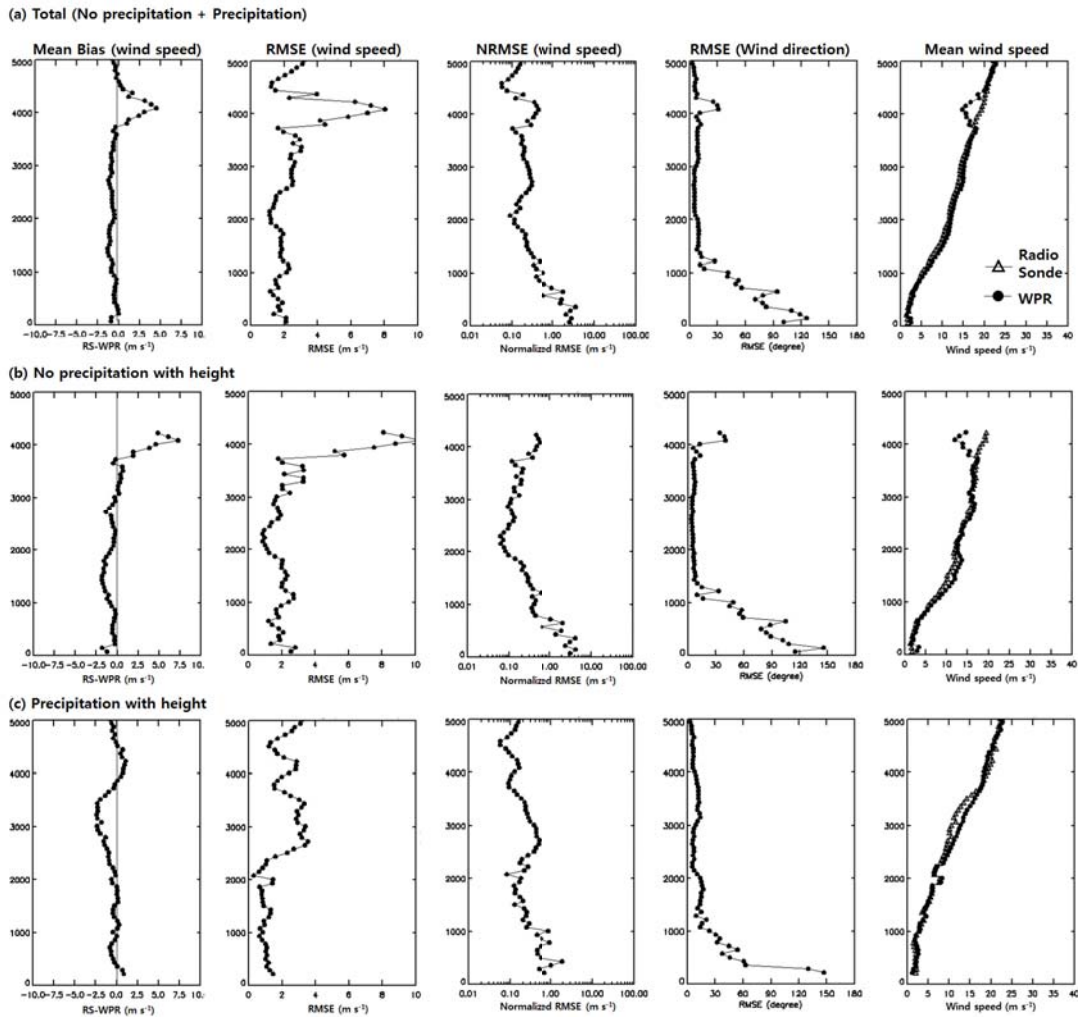


Fig. 4. Vertical profile of five skill scores in Table 5: (a) Total (no precipitation + precipitation), (b) no precipitation, (c) Precipitation.

여 윈드프로파일러의 수평풍향에 대한 RMSE는 100° 이상으로 급격하게 증가하였다.

Fig. 4b는 고도별 무강수 사례에 대한 윈드프로파일러의 정확도를 나타낸다. 약 4.5 km 이상의 고도에서 결과가 나타나지 않는 이유는 장마전선의 접근으로 인하여 눈 혹은 강우의 형태로 지속적으로 강수가 나타났기 때문이다(Fig. 1). 무강수 사례에 대한 윈드프로파일러 수평풍속의 MB는 고도 약 3.5 km까지 $\pm 2.5 \text{ m s}^{-1}$ 이내로 일정하였다. 고도 약 1.0 ~ 2.0 km에서 윈드프로파일러

는 라디오존데에 비하여 수평풍속을 과대 측정하였다. 이 구간에서 라디오존데의 수평풍속은 7.0 m s^{-1} 에서 15.0 m s^{-1} 까지 급격하게 증가하였다. 고도 약 3.5 ~ 4.0 km 구간의 수평풍속에 대한 MB는 약 7.5 m s^{-1} 까지 급격하게 증가하였고, 윈드프로파일러의 수평풍속은 라디오존데에 비하여 과소 측정되었다. 윈드프로파일러 수평풍속의 RMSE는 평균적으로 2.8 m s^{-1} 였다. 윈드프로파일러의 과대 측정된 고도 1.0 ~ 2.0 km 구간과 과소 측정된 고도 3.5 ~ 4.5 km 구간을 제외하고 약 2.0 m s^{-1} 미만

으로 낮았다. 과소 측정된 구간의 RMSE는 약 10.0 m s^{-1} 까지 증가하였고, 과대 측정된 구간의 RMSE는 2.0 m s^{-1} 보다 높았다. 수평풍향에 대한 RMSE는 수평풍속 RMSE의 급격한 증가 구간(고도 3.5 km 4.5 km)과 고도 1.0 km 미만의 하층을 제외하고 약 10° 미만으로 일정하였다. 윈드프로파일러 수평풍속의 과소 측정된 구간의 수평풍향 RMSE는 최대 45° 까지 증가하였다. NRMSE는 고도 2.0 km까지 0.1로 감소하였고, 라디오존데 수평풍속의 약 10%까지 오차가 점차 감소하였다. 고도 2.0 km 이상의 윈드프로파일러 오차는 라디오존데 수평풍속에 비하여 점차 증가하였다. 고도 3.5 ~ 4.5 km 구간의 NRMSE는 0.6까지 급격하게 증가하였고, 라디오존데 수평풍속의 약 60%까지 오차가 발생하였다. 즉, 전체 연구 기간에서 발생한 윈드프로파일러의 과소 측정 구간(고도 약 3.5 ~ 4.0 km)은 무강수 사례에서 발생한 과소 측정에 의한 것이다.

Fig. 4c는 고도별 강수 사례에 대한 윈드프로파일러의 정확도를 나타낸다. 강수 사례에 대한 윈드프로파일러 수평풍속의 MB는 고도 약 2.0 ~ 3.5 km 구간을 제외하고 약 $\pm 1.0 \text{ m s}^{-1}$ 이내로 일정하였다. 고도 약 2.5 ~ 3.5 km 구간에서 윈드프로파일러 수평풍속의 MB는 약 -2.5 m s^{-1} 까지 증가하였고, 라디오존데에 비하여 수평풍속을 과대 측정하였다. 윈드프로파일러 수평풍속의 RMSE는 평균적으로 3.2 m s^{-1} 였다. 고도 2.0 km까지 2.0 m s^{-1} 이내로 일정하였고 무강수 사례보다 낮았다. 고도 2.0 km까지의 라디오존데 수평풍속은 무강수 사례보다 약 50% 정도 낮게 분포하였다. 2.0 km 이상의 고도에서 윈드프로파일러 수평풍속의 RMSE는 4.0 m s^{-1} 까지 급격하게 증가하였고, 무강수 사례의 RMSE의 약 2배에 해당되는 오차이다. 무강수 사례의 과소 측정 고도에서 강수 사례의 RMSE는 최대 3.5 m s^{-1} 으로 나타났고, 무강수 사례와 같이 RMSE의 급격한 증가는 나타나지 않았다. 수평풍향에 대한 RMSE는 고도 1.0 km 미만의 하층을 제외하고 약 10° 미만으로 일정하였다. 윈드프로파일러 수평풍속의 NRMSE는 고도 2.0 km까지 0.1로 감소하였고, 라디오존데 수평풍속의 약 10%까지 오차가 점차 감소하였다. 고도 2.0 km 이상의 윈드프로파일러 과대 측정 구간에서는 NRMSE가 고도 2.5 km를 기준으로 증감하였다. 최대 NRMSE를 기록한 2.5 km 고도에서는 라디오존데 수평풍속의 약 60% 오차가 발생하였고, 무강수 사

례의 3배에 해당되는 오차이다. 즉, 전체 연구 기간에서 발생한 윈드프로파일러의 과대 측정된 구간(고도 약 2.5 ~ 3.5 km)은 강수 사례에서 발생한 과대 측정에 의한 것이다.

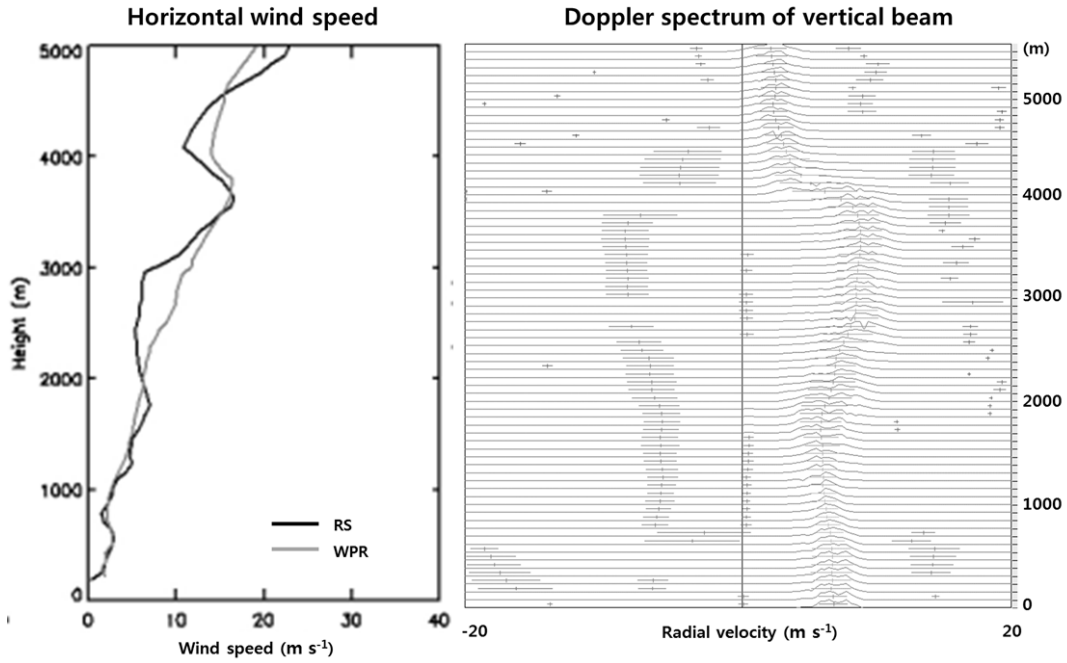
4.5. 도플러 스펙트럼 분석

윈드프로파일러 자료의 정확도 평가와 품질 평가를 통해서, 고도별 윈드프로파일러 자료의 정확성을 정량적으로 평가할 수 있었다. 윈드프로파일러 자료의 정확성은 강수 유무에 따라 구분되는 특성을 보였다. 무강수 사례에서 윈드프로파일러의 수평풍속은 고도 약 3.5 ~ 4.5 km구간에서 과소 측정되었고, 강수 사례에서 윈드프로파일러의 수평풍속은 고도 2.5 ~ 3.5 km 구간에서 과대 측정되었다.

강수 사례에서 발생한 윈드프로파일러 오차의 대부분은 강수에 의한 영향을 받는다. Dibbern et al. (2001)의 연구 결과에 따르면 강수에 의한 UHF 윈드프로파일러의 오차는 저층관측방식에서 약한 비(2.5 mm h^{-1} 미만)와 보통 비 이상(2.5 mm h^{-1} 이상)으로 구분된다. 약한 비의 경우 강수의 지속 시간이 30분 미만일 때 무강수 사례와 동일한 오차를 보이며, 지속 시간이 30분 이상일 때 무강수 사례보다 10% 정도 낮은 오차를 보였다. 지속 시간이 30분 이상 되는 보통 비 혹은 강한 비의 경우, 무강수 사례보다 90% 정도 높은 오차를 보였다.

2013년 6월 18일 23LST에는 2.5 mm h^{-1} 의 보통 비가 발생하였다. Fig. 5a와 같이 2013년 6월 18일 23LST의 윈드프로파일러 연직 수평풍속 분포는 고도 2.0 ~ 4.5 km에서 라디오존데의 수평풍속보다 과대 측정되었다. 연직빔의 고도별 도플러 스펙트럼에서는 강수에 의한 연직 시선속도의 분포가 뚜렷하였다. 고도 4.0 km 이상에서는 약 3.0 m s^{-1} 미만으로 도플러 스펙트럼의 침투가 나타나는데, 눈에 의한 연직 시선속도를 의미한다. 약 3.0 m s^{-1} 미만으로 나타나던 연직 시선속도는 약 4.0 km 고도에서 급격하게 증가하였다. 이 구간은 눈에서 강우로 변환되는 융해층으로써, 고도가 낮아질수록 눈이 점차 녹으면서 연직 시선속도가 강우에 의해 급격하게 증가하였다. 강우에 의해 고도 4.0 km 미만의 연직 시선속도는 약 $5.0 \sim 8.0 \text{ m s}^{-1}$ 으로 매우 높았다. 대기의 난류 운동에 의한 영향보다 강수의 연직 운동에 의한 영향이 연직빔의 도플러 스펙트럼에 지배적으로 나타났다. 이와

(a) 23LST 18 June 2013



(b) 19LST 18 June 2013

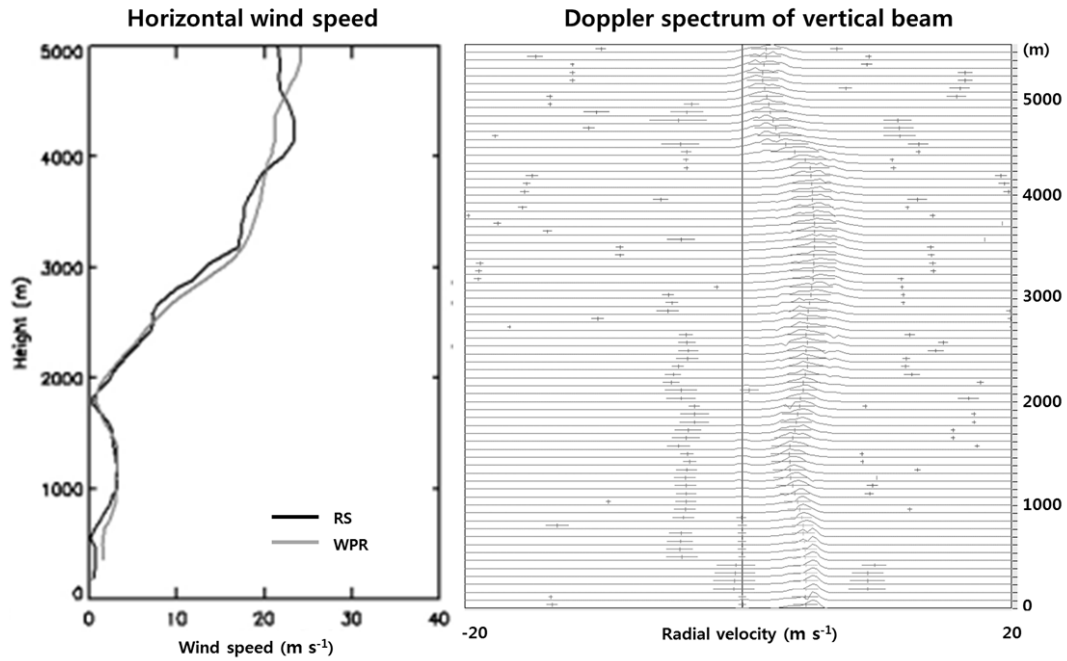


Fig. 5. Vertical profiles of horizontal wind speed and Doppler spectrums for (a) moderate rain and (b) light rain.

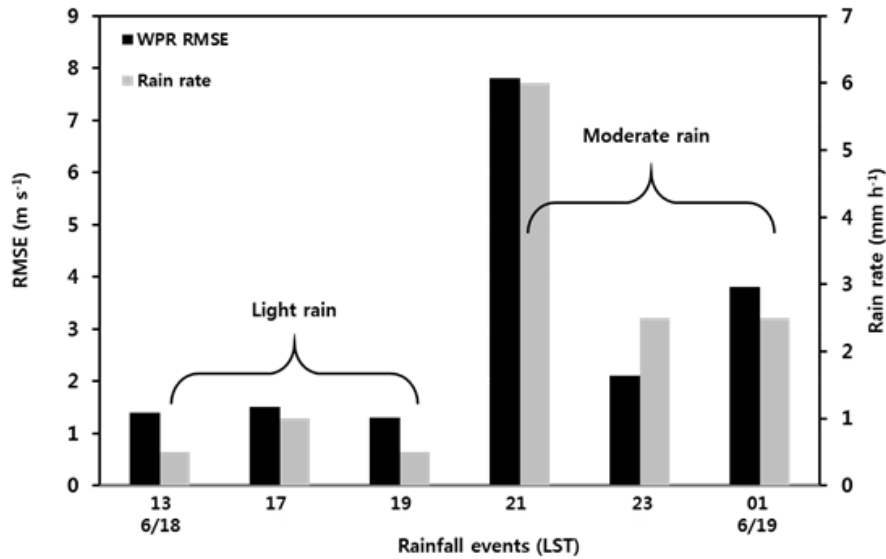


Fig. 6. Variation of root mean square error(RMSE) of horizontal wind speed from wind profiler and rainfall intensity.

같이 강한 강수 운동에 의한 시선속도로부터 산출된 수평풍속은 라디오존데의 수평풍속에 비하여 과대 측정되는 결과를 발생시켰다.

연구 사례 중에서 2013년 6월 18일 19LST는 0.5 mm h⁻¹의 약한 비가 내렸다. Fig. 5b와 같이 2013년 6월 18일 19LST의 윈드프로파일러 연직 수평풍속은 고도 2.5 km까지 라디오존데의 수평풍속과 유사하였다. 고도 2.5 ~ 4.0 km 구간의 윈드프로파일러 수평풍속은 라디오존데의 수평풍속에 비하여 강하게 나타났지만, 보통 비에 비하여 고도별로 라디오존데와 유사한 수평풍속 분포를 보였다. 약한 비에 대한 연직 빔의 도플러 스펙트럼에서도 강수에 의한 연직 시선속도의 분포가 나타났지만, 보통 비보다 5.0 m s⁻¹이내의 낮은 연직 시선속도 분포를 보였다. 보통 비보다 약한 강수 운동으로 인하여, 약한 비의 도플러 스펙트럼에서는 강수에 의한 대기 난류 운동의 오염이 적었다.

전체 연구 기간 중에서 강수 사례에 대한 윈드프로파일러 수평풍속의 RMSE를 약한 비와 보통 비로 구분하였다(Fig. 6). 약한 비에 대한 RMSE는 평균적으로 1.4 m s⁻¹으로 나타났고, 무강수 사례보다 50% 낮은 오차이다. 보통 비의 경우는 평균적으로 4.6 m s⁻¹으로, 무강수 사례보다 64% 높은 오차이다. 즉, 약한 비에 해당하는

강수는 윈드프로파일러의 관측 정확도를 향상시키는 역할을 하였고, 보통 비 이상의 강수는 윈드프로파일러의 관측 정확도를 저하시키는 역할을 하였다.

일반적으로 청천 대기에서 윈드프로파일러의 SNR은 전파의 감쇠로 인하여 상층으로 갈수록 급격하게 감소하고, 도플러 스펙트럼의 침투 신호도 명확하게 구분하기 어려워진다. 고도가 높아질수록 대기 굴절률에 영향을 주는 변수인 수증기와 건조공기가 점차 감소하기 때문이다. 강수 환경에서 윈드프로파일러는 대기 난류에 의한 브래그 산란과 강수에 의한 레일리 산란이 동시에 나타난다. 구름 입자 혹은 강수 입자에 의해 발생하는 레일리 산란은 전파 파장의 4제곱에 반비례하기 때문에 약한 강수 환경에서도 강하게 산란된다. 따라서 1.29 GHz의 UHF 윈드프로파일러는 수 mm h⁻¹이상의 강수 환경에서도 강수 신호의 스펙트럼 침투가 뚜렷하게 관측된다. 이와 같이 강수에 의한 스펙트럼 침투의 뚜렷한 관측은 Fig. 3과 같이 무강수 사례보다 UHF 윈드프로파일러의 고도별 자료수집률을 상승시켰다. 약한 비는 윈드프로파일러의 관측 감도를 향상시켜서 5.0 km 고도까지 대기 난류 운동을 뚜렷하게 관측할 수 있는 긍정적인 역할을 하였고, 보통 비 이상의 강수는 대기 난류 운동 신호보다 강수 신호를 더욱 뚜렷하게 감지하여 관측 오차를 유발

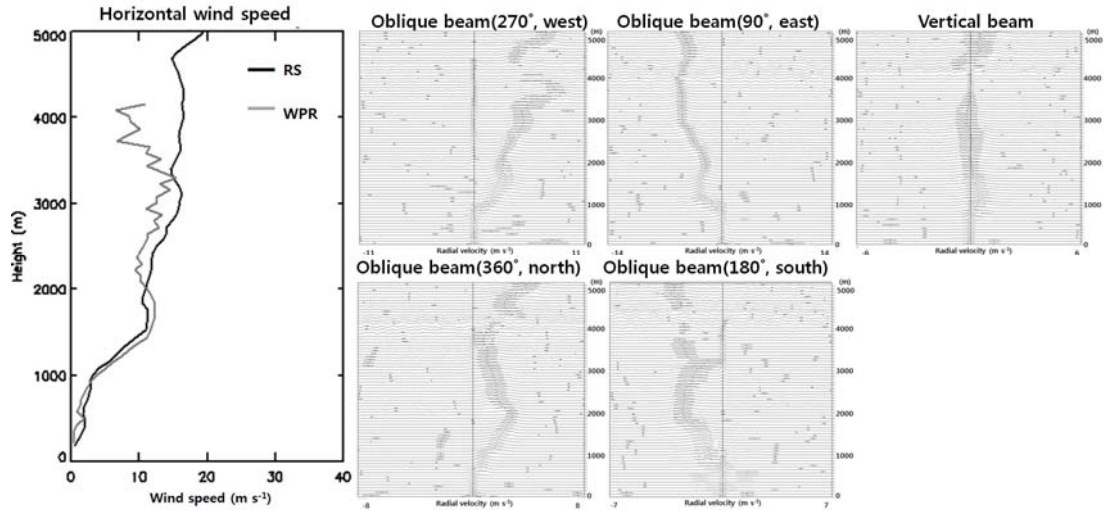


Fig. 7. Vertical profiles of horizontal wind speed and Doppler spectrum from wind profiler at 20LST 17 June 2013.

시키는 부정적인 역할을 하였다.

Fig. 7에서는 2013년 6월 17일 20LST 무강수 사례에 대한 윈드프로파일러와 라디오존데의 수평풍속 비교 결과 및 윈드프로파일러의 도플러 스펙트럼을 제시하였다. 윈드프로파일러의 연직빔에 대한 도플러 스펙트럼에서 알 수 있듯이 본 연구 사례에서는 고도별로 강수가 발생하지 않았다. 윈드프로파일러의 동쪽 경사빔을 제외한 모든 빔에서는 고도 1.0 km 미만과 고도 2.0 km 이상에서 시선속도 0.0 m s^{-1} 에 대한 침두가 발생하였다. 유일하게 동쪽 경사빔에서는 이와 같은 침두가 발생하지 않았다. 강릉 윈드프로파일러 설치 지점을 중심으로 서쪽은 복잡한 산악 지역이고, 동쪽은 평평한 해안 지역임을 고려했을 때, 동쪽 경사빔을 제외한 모든 빔의 도플러 스펙트럼에서 나타난 시선속도 0.0 m s^{-1} 부근의 침두는 지형클러터이다. 지형클러터가 발생했던 구간에서 윈드프로파일러 수평풍속은 라디오존데와 큰 차이가 발생하였다. 고도 2.0 km 이상에서 윈드프로파일러의 과소 측정이 나타났으며, 고도 3.3 ~ 4.2 km에서 윈드프로파일러의 수평풍속은 급격하게 감소하였다. 이와 같이 도플러 스펙트럼에서 지형클러터를 대기신호로 판단할 경우, 윈드프로파일러의 수평풍속은 과소 측정된다. 무강수 사례의 약 3.5 ~ 4.5 km 고도에서 발생한 윈드프로파일러의 급격한 오차 증가는 지형클러터에 의한 것으로 판단된다.

지형클러터는 일반적으로 일정한 고도에서 연속적으로 발생한다. Fig. 8은 전체 연구기간 동안 강릉 윈드프로파일러 연직빔의 지형클러터 유무를 시계열로 나타낸다. 지형클러터 시계열에서 0은 지형클러터가 발생하지 않은 경우를 의미하고, 1과 2는 각각 하층(2.5 km 미만)과 전체 고도에서 발생한 지형클러터를 의미한다. 지형클러터는 2013년 6월과 7월에 연속적으로 발생하였다. 다만, 강수가 발생한 기간에는 지형클러터가 발생하지 않았다. 윈드프로파일러의 주방사부에서 산란된 강한 강수 신호는 부방사부에서 산란된 지형클러터 신호보다 월등히 강하게 수신되기 때문이다. 대기 중의 강수 입자는 무강수 사례에 발생한 지형클러터에 대한 영향을 감소시키는 역할을 한 것이다. 이와 같은 강수에 의한 특징은 약한 비의 강수 환경에서 윈드프로파일러의 고도별 관측 정확도를 향상시키는 긍정적인 역할로 작용한다.

전체 연구기간 동안 강릉 윈드프로파일러의 각 빔에서 발생한 지형클러터의 빈도는 Table 6과 같다. 동쪽 빔을 제외한 모든 빔에서 지형클러터가 발생하지 않은 경우는 약 16%에 불과하였고, 동쪽 빔은 약 50% 정도 지형클러터가 발생하지 않았다. 특히, 동쪽 빔은 상층에서 지형클러터가 전혀 발생하지 않은 반면, 동쪽 빔을 제외한 모든 빔에서는 40 ~ 70% 정도 상층에서 지형클러터가 발생하였다. 상층에서 발생한 지형클러터는 주변 수

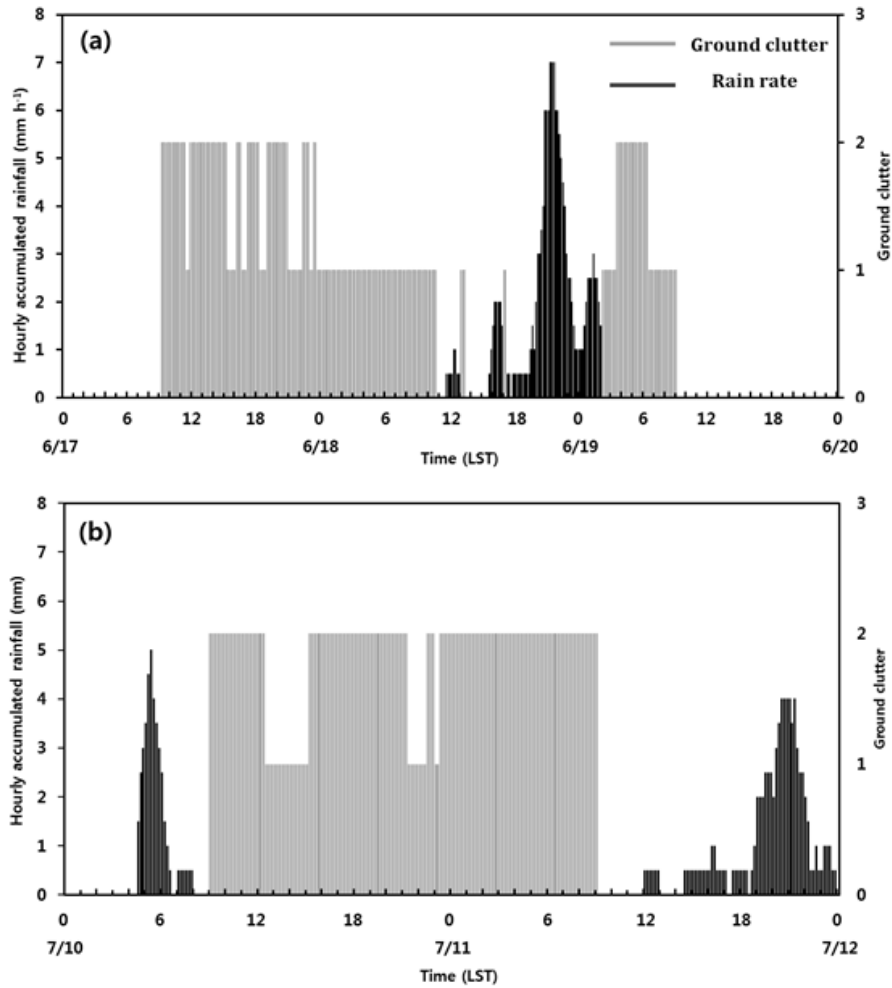


Fig. 8. Hourly accumulated rainfall on the surface and ground clutter (0: no clutter, 1: low level clutter, 2: all level clutter) for vertical beam (a) from 17 to 19 June 2013 and (b) from 10 to 11 July 2013.

Table 6. Occurrence frequency of ground clutter in five beams

Classification	Vertical beam (%)	Oblique beam (%)			
		360 (north)	90 (east)	180 (south)	270 (west)
No clutter	16.4	16.9	49.8	15.5	15.7
Low level clutter (< 2.5 km)	34.5	43.1	50.2	15.5	20.2
all level clutter	49.0	40	0.0	69.0	64.0

km 정도 떨어져 있는 산악 지형에 의해 산란된 부방사부의 신호가 수신되었기 때문이다.

5. 요약 및 결론

강릉의 윈드프로파일러 자료의 정확성 검증을 위하여 2013년 여름철 라디오존데 특별 관측을 수행하였다. 라디오존데 특별 관측은 2013년에 장마가 시작되었던 6월 18일부터 36시간 동안 강릉 윈드프로파일러 지점 부근에서 2시간 간격으로 수행되었고, 7월 10일부터 무강수 사례에 대하여 27시간 동안 3시간 간격으로 수행되었다. 기상상태에 따라 3시간 이내로 조밀하게 관측된 고층기상관측자료는 여름철 강릉의 윈드프로파일러 검증을 위한 기준자료로 활용되었다.

윈드프로파일러의 정량적인 검증은 정확도 평가와 품질 평가를 통해서 수행되었고, 윈드프로파일러의 도플러 스펙트럼을 이용하여 오차의 원인을 파악 및 개선하였다. 윈드프로파일러의 정확도는 MB, RMSE, 그리고 NRMSE와 같이 라디오존데와의 고도별 오차 분포를 통해서 나타내었다. 전체 연구 기간의 윈드프로파일러 고도별 오차는 고도 약 2.0 ~ 3.5 km 구간과 고도 약 3.5 ~ 4.5 km 구간에서 뚜렷하였다. 고도 약 2.0 ~ 3.5 km 구간에서 윈드프로파일러는 과대 측정하였고, 고도 약 3.5 ~ 4.5 km 구간에서 과소 측정하였다. 두 구간에서는 라디오존데 수평풍속의 30% 이상의 오차가 발생하였고 윈드프로파일러 오차의 불연속성이 다른 고도에 비하여 상대적으로 뚜렷하였다. 두 구간에서 윈드프로파일러 오차의 특징은 강수유무에 의해 그 특성이 구분되었다.

강수 사례에서 윈드프로파일러의 오차는 2.5 km 고도에서 라디오존데 수평풍속의 약 60% 오차가 발생하였고, 이는 무강수 사례의 3배에 해당되는 오차이다. 즉, 전체 연구 기간에서 발생한 윈드프로파일러의 과대 측정된 구간(고도 약 2.5 ~ 3.5 km)은 강수 사례에서 발생한 과대 측정에 의한 것이다. 강수는 윈드프로파일러의 과대 측정으로 인한 오차의 원인이지만, 강수의 강도에 따라 윈드프로파일러 관측 정확도에 부정적인 영향과 긍정적인 영향을 미쳤다. 2.5 mm h⁻¹ 이상의 보통 비 경우, 도플러 스펙트럼에서 대기 난류 운동의 신호보다 강수에 의한 침투 신호가 뚜렷하게 나타났고, 강수 신호로부터 결정된 윈드프로파일러의 수평풍속은 라디오존데의 수평

풍속에 비하여 과대 측정되는 결과를 보였다. 보통 비 이상의 강한 강수 환경에서 윈드프로파일러의 오차는 평균적으로 4.6 m s⁻¹으로 무강수 사례보다 64% 정도 높았다. 2.5 mm h⁻¹ 미만의 약한 비는 윈드프로파일러의 관측 감도를 향상시켜서 대기 난류 운동을 뚜렷하게 관측할 수 있도록 돕는 역할을 하였다. 약한 비에 의한 윈드프로파일러의 관측 오차는 1.4 m s⁻¹으로 무강수 사례보다 50% 정도로 낮았다. 또한 대기 중의 강수 입자는 무강수 사례에 나타났던 지형클러터로 인한 침투를 제거하는 역할을 하였다. 윈드프로파일러의 주방사부에서 산란된 강한 강수 신호는 부방사부에서 산란된 지형클러터 신호보다 월등히 강하게 수신되기 때문이다. 이와 같은 강수에 의한 특징은 약한 비의 강수에서 윈드프로파일러의 고도별 관측 정확도를 향상시키는 긍정적인 역할로 작용한다.

무강수 사례의 고도 약 3.5 ~ 4.5 km 구간에서는 라디오존데 수평풍속의 약 60%까지 윈드프로파일러의 오차가 발생하였다. 즉, 전체 연구 기간에서 발생한 윈드프로파일러의 과소 측정 구간(고도 약 3.5 ~ 4.0 km)은 무강수 사례에서 발생한 과소 측정에 의한 것이다. 이 구간은 자료의 품질도 매우 낮았다. 고도 2.8 km 이상부터 확률 오차가 6.0 m s⁻¹까지 급격하게 증가하면서 자료의 연속성이 현저하게 낮아졌다. 고도 4.0 km에서 자료의 연속성은 가장 낮게 나타났고, 자료수집률은 70%에서 30%로 급격하게 감소하였다. 무강수 사례에서 윈드프로파일러의 과소 측정 구간에서 발생한 큰 오차는 윈드프로파일러의 낮은 자료 품질과 연관되었다. 이 구간에서 낮은 자료 품질의 원인은 지형클러터였다. 윈드프로파일러의 도플러 스펙트럼 분석을 통해서 윈드프로파일러의 과소 측정 구간에서는 지형클러터로 인한 침투가 연속적으로 발견되었다. 강릉 윈드프로파일러 설치 지점을 중심으로 동쪽을 제외한 모든 영역은 복잡한 산악 지역이고, 동쪽은 고도가 낮은 해안 지역이다. 윈드프로파일러의 동쪽 경사빔을 제외한 모든 경사빔의 도플러 스펙트럼에서는 고도 2.5 km를 기준으로 상층에 산악 지형에 의한 지형클러터의 침투 신호가 약 40 ~ 70%의 빈도로 연속적으로 발생하였고, 동쪽 경사빔에서는 상층에 지형클러터의 침투 신호가 발생하지 않았다. 즉, 동쪽 경사빔을 제외하고 모든 경사빔의 도플러 스펙트럼에서 발생한 0.0 m s⁻¹ 부근의 침투는 수 km 떨어진 산악 지형에서 산란된 부방사부의 신호일 가능성이 높다.

강릉 윈드프로파일러는 상층에 나타난 지형클러터로 인하여 상층 자료의 정확성 및 품질이 낮게 나타났고, 대기 운동을 과소 측정하였다. 또한, 강수에 의해 윈드프로파일러 자료의 정확도는 무강수 사례에 비하여 0.6 m s^{-1} 정도 낮았다. 2.5 mm h^{-1} 이상의 보통 비 이상의 강수에 의해 발생한 과대 추정이 원인이었다. 하지만, 2.5 mm h^{-1} 미만의 약한 비에 해당되는 강수는 윈드프로파일러의 수신 감도 향상을 통한 대기 난류 운동의 뚜렷한 탐지 역할과 부방사부에서 산란되는 지형클러터의 침투 제거 역할을 통해서 윈드프로파일러의 관측 오차를 감소시켰다. 본 연구를 통해서 지형클러터로 인한 강릉 윈드프로파일러 자료의 문제점을 파악할 수 있었고, 강수가 윈드프로파일러 관측 정확도에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있었다. 지형클러터의 고도별 발생 빈도를 정량적으로 파악하여 윈드프로파일러 주변의 지형적 영향을 좀 더 세부적으로 파악할 필요가 있다.

강릉 윈드프로파일러는 자료의 정확성 및 품질 향상을 위한 노력이 더욱 요구될 것으로 판단된다. 특히, 지형클러터의 영향을 줄이기 위한 노력이 시급하다. 하드웨어 처리 방법 중 하나인 클러터 차폐막의 설치, 강릉 윈드프로파일러의 상하층 자료에 대한 정확성 및 품질을 개선할 수 있을 것이다. 또한, 강한 강수에 의한 윈드프로파일러 자료의 오염을 방지해야 한다. 강수로 인한 도플러 스펙트럼의 다중 침투를 윈드프로파일러의 자료 처리 알고리즘에서 효과적으로 다룰 수 있도록 알고리즘의 개선이 요구된다. 본 연구에서 수행한 윈드프로파일러의 정량적인 정확성 분석은 이와 같은 개선 연구를 위한 기반 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Baek, S.G., C.H. Cho, J.H. Kim, and H.Y. Song, 2005: Analyses of precipitation cases using wind profiler. *Journal of Korean Meteorological Society*, **41**, 1-16.
- Cornman, L.B., R.K. Goodrich, C.S. Morse, and W.L. Ecklund, 1998: A fuzzy logic method for improved moment estimation from Doppler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1287-1305.
- Currier, P., 2003: DEGREWIND PCL 1300 processing computer user manual. DEGREANE HORIZON, 85.
- Dibbern, J., D. Engelbart, U. Goersdorf, N. Latham, V. Lehmann, J. Nash, T. Oakley, H. Richner, and H. Steinhagen. Operational aspects. In J. Dibbern, W. Monna, J. Nash, and G. Peters, 2001: COST Action 76 - Development of VHF/UHF wind-profilers and vertical sounders for use in European observing systems - Final report, pages 133-224. European Commission, Luxembourg, 2003. ISBN 92-894-4899-7.
- Griesser, T. and H. Richner, 1998: Multiple peak processing algorithm for identification of atmospheric signals in Doppler radar wind profiler spectra. *Meteorol. Zeitschr.*, N.F. **7**, 292-302.
- Holleman, I., H. van Gasteren, W. Bouten, 2008: Quality assessment of weather radar wind profiles during bird migration, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 2188-2198.
- Ishihara, M., Y. Kato, T. Abo, K. Kobayashi, and Y. Izumikawa, 2006: Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **84**, 1085-1096.
- Jung, P.S., Y.K. Lim, K.H. Kim, S.O. Han, and T.Y. Kwon, 2014: Characteristics of precipitation over the east coast of Korea based on the special observation during the winter season of 2012. *Journal of Korean Earth Science Society*, **35**, 41-53.
- Kitchen M., 1989: Representativeness errors for radiosonde observations. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, **115**, 673-700.
- Maruri, M., J.A. Romo, and L. Gomez, 2014: Aspects of quality control of wind profiler measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 135 - 148.
- Morse, C.S., R.K. Goodrich, L.B. Cornman, 2002: The NIMA method for improved moment estimation from Doppler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 274-295.
- Park, O.R., Y.S. Kim, and C.H. Cho, 2005: The Observing system experiments with the wind profiler and autosonde at Haenam. *Journal of Korean Meteorological Society*, **41**, 57-71.
- Park, S.Y., H.W. Lee, S.H. Lee, and D.H. Kim, 2010: Impact of wind profiler data assimilation on wind field

- assessment over coastal areas. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **4**, 198-210.
- Ralph, F. M., P. J. Neiman, and D. Ruffieux, 1996: Precipitation identification from Radar wind profiler spectral moment data: Vertical velocity histograms, velocity variance, and signal power-vertical velocity correlations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**, 545-559.
- Robert E. Barbré Jr., 2012: Quality control algorithms for the Kennedy Space Center 50-MHz Doppler radar wind profiler winds database. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **29**, 1731 - 1743.
- Steinhagen, H., A. Christoph, P. Czechowsky, U. Goersdorf, M. Gube-Lenhardt, J. Lippmann, J. Neisser, R. Ruester, G. Schmidt, W. Wergen, and J.G. Yoe, 1994: Field campaign for the comparison of SOUSY radar wind measurements with rawinsonde and model data. *Ann. Geophys.*, **12**, 746-764.
- Weber, B.L., D.B. Wuertz, D.C. Welsh, and R. McPeck, 1993: Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 452-464.
- Wilfong, T.L., D.A. Merritt, R.J. Lataitis, B.L. Weber, D.B. Wuertz, and R.G. Strauch, 1999: Optimal generation of radar wind profiler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 723-733.