

ORIGINAL ARTICLE

지형에코 제거를 통한 UHF 윈드프로파일러의 바람벡터 개선

김광호 · 김박사 · 김민성¹⁾ · 강동환 · 권병혁^{1)*}

부경대학교 지구과학연구소, ¹⁾부경대학교 환경대기과학과

Improvement in Wind Vector from UHF Wind Profiler Radar through Removing Ground Echo

Kwang-Ho Kim, Park-Sa Kim, Min-Seong Kim¹⁾, Dong-Hwan Kang, Byung Hyuk Kwon^{1)*}

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

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract

Ground echo is radar return from stationary targets such as buildings and trees. Wind vectors from the wind profile radar in Gangneung are affected by ground echoes due to the complex mountainous terrain located to the west and the south. These ground echoes make a spurious peak close to the direct current (DC) line signal in Doppler spectra. Wind vectors polluted by ground clutters were determined from spectra of oblique beams. After eliminated the terrain echoes, the accuracy of wind vector compared with radiosonde was improved about 68.4% and its relative coefficient was increased from 0.58 to 0.97.

Key words : Wind profiler radar, Doppler spectra, DC removal, Ground echo

1. 서론

윈드프로파일러(Wind Profiler Radar, WPR)는 대기의 바람벡터의 방향과 크기를 관측하는데 이용되는 중요한 관측 기기이며, 기상학적인 연구에 많이 활용되고 있다(Hardy, 1990; Monna, 1998). WPR은 수 분의 시간분해능과 수십미터의 공간분해능으로 바람의 연직구조를 제공할 수 있기 때문에 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). 국내에서는 수치모델의 자료동화 및 검증연

구와 재해기상분석(e.g. 집중호우, 폭설)에 관한 연구가 수행되었다(Park et al., 2005; Won et al., 2006; Park et al., 2010; Jung et al., 2014).

WPR는 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 성분을 결정한다. WPR 자료는 펄스파의 송수신 과정에서 지형에코, 라디오간섭, 새에코, 그리고 복합적 에코와 같은 다양한 비 대기 신호에 의해 오염될 수 있기

Received 7 October, 2015; Revised 5 January, 2016;

Accepted 7 January, 2016

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

때문에(Skolnik, 1980; Wilczak, 1995), 도플러 스펙트럼에서 비 대기 신호의 제거 및 개선이 선행되어야 한다.

WPR의 안테나에서 특정 방향으로 전파를 집중시켜 방사하는 빔을 주방사부(main lobe)라고 하고, 주방사부 주변으로 방사되는 약한 전파 빔을 부방사부(side lobe)라고 한다. WPR의 관측 고도는 주방사부에서 송신된 전파가 다시 수신되기까지 걸린 시간으로 결정된다. 수평 방향에 존재하는 물체도 WPR과 거리를 두고 있으면 그 거리에 상응하는 고도의 신호로 관측된다. WPR의 주방사부는 천정을 향해 방사되는데 비하여 부방사부는 다양한 고도각과 방위각으로 방사되기 때문에 지상의 다양한 물체(건물, 자동차, 산 등)에 부딪혀 산란된다. WPR의 지형에코는 부방사부에서 수신된 강한 지형에코에 의해 주방사부의 대기 신호가 묻혀버리는 경우에 발생한다.

지형에코 제거 방법은 클러터 펜스와 같은 하드웨어 방법과 자료처리를 통한 소프트웨어 방법으로 구분할 수 있다. 소프트웨어 방법 중 가장 전통적인 방법은 Strauch et al.(1982)에 의한 직류(Direct Current, DC) 성분 제거 방법이다. 직류 성분은 주파수가 0 Hz인 신호 혹은 평

균 시선속도가 0 m s^{-1} 인 신호를 의미하며, 고도별로 시선속도가 0 m s^{-1} 인 지점을 통칭하여 DC 라인(line)이라고 한다. 지형에코는 정지해있는 물체에서 산란되는 신호이기 때문에 DC 성분으로 나타난다. 지형에코에 의한 DC 성분은 WPR의 도플러 스펙트럼에서 DC 라인 부근에 좁게 혹은 넓게 퍼져서 나타나는 특징이 있으며, DC 성분 제거 방법은 DC 라인 주변의 지형에코를 도플러 스펙트럼에서 제거하는 것을 의미한다.

우리나라는 복잡한 산악지형으로 이루어져 있기 때문에 우리나라에 설치된 WPR은 비 대기 신호 중 산악지형에 의한 지형에코에 더욱 주의해야 한다. 현재 국내의 WPR은 창원기상대와 군산기상대를 제외하고 클러터 펜스가 설치되어 있지 않기 때문에 소프트웨어 방법을 통한 자료처리가 이루어져야 한다. 국내 WPR 중 강원지방기상청의 WPR은 서쪽과 남쪽의 복잡한 산악지형으로 인하여 지리적으로 지형에코가 발생하기 쉬운 곳에 위치한다(Fig. 1). 반경 5 km 이내에는 해발 200 m 이하의 산악지형이 분포하고, 반경 5 ~ 10 km에는 해발 400 ~ 600 m의 산악지형이 곳곳에 분포한다. 반경 10 km부

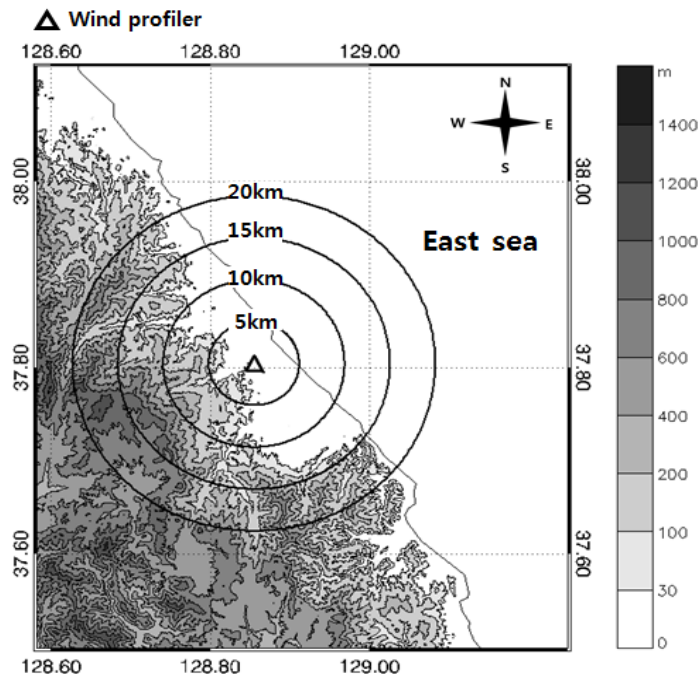


Fig. 1. Topographic contour around Gangneung and position of Gangneung PCL 1300.

터는 대부분 800 m 이상의 산악지형으로 이루어져있다. 강원지방기상청의 동쪽과 북쪽은 반경 5 km 이내에 해발 30 m 이하의 평탄한 지형으로 이루어져있고, 동쪽으로 반경 5 km 밖으로는 해안이다. 본 연구에서는 강원지방기상청의 UHF WPR의 도플러 스펙트럼을 분석하여 지형에코를 확인하였고, DC 성분 제거 방법을 적용하여 지형에코를 제거하였다. 지형에코 제거 전과 후의 WPR의 바람벡터 오차는 라디오존데(Radio Sonda, RS)의 관측 자료를 기준으로 통계적으로 검증되었고, 지형에코 제거에 따른 개선 효과를 정량적으로 제시하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 강원지방기상청에 설치된 프랑스 Degreane사의 UHF WPR(PCL 1300)의 관측 자료를 이용하였다. PCL 1300은 저층 관측 방식(low mode)과 고층 관측 방식(high mode)으로 관측한다. 이와 같은 관측 방식은 WPR에서 방사하는 전파의 펄스폭(pulse

width)과 펄스반복주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)의 가변적인 설정에 의해 구분된다. 펄스폭과 PRF는 WPR의 공간적 관측해상도와 유효관측고도에 영향을 준다. 펄스폭이 길수록 관측해상도는 낮아지고, PRF가 작을수록 유효관측고도는 높아진다. 이러한 특징에 의해서 저층 관측 방식은 관측해상도가 높고 유효관측고도가 낮으며, 고층 관측 방식은 관측해상도가 낮고 유효관측고도가 높다. Table 1과 같이 PCL 1300은 총 71개 고도의 바람벡터를 수집하며, 저층 관측 방식의 관측해상도와 유효관측고도는 각각 72 m, 9700 m이고 고층 관측 방식은 각각 164 m, 15000 m이다.

PCL 1300의 바람벡터 정확도 개선을 위하여 관측 해상도가 높은 저층 관측 방식의 자료를 이용하였고, 고층 관측 방식의 자료는 PCL 1300의 지형클러터 영향을 검증하기 위해 활용되었다. 10분 간격으로 수집되는 PCL 1300 자료의 비교 및 검증을 위하여 Table 2와 같이 강원지방기상청에서 RS를 27회 비양하였다. RS 자료는 6

Table 1. Operational configuration of low and high mode strategy for PCL 1300

Parameter	Low mode	High mode	Unit
Frequency	1290	1290	MHz
Peak power	4.5	4.5	kW
Beam number	5	5	
Pulse width	500	1000	ns
Pulse Repetition Frequency	16	10	kHz
Nyquist velocity	12.84	12.84	m s ⁻¹
Number of FFT points	128	128	
Lowest sampled height	72	72	meter
Highest sampled height	5100	11700	meter
Range resolution	71.68	164.85	meter
Number of height gates	71	71	

Table 2. General information of intensive observation periods

Instruments	Periods (LST)	Temporal resolution (minute)	Vertical profiles
Wind profiler	09LST 17 ~ 09LST 19 June 2013	10	279
	09LST 10 ~ 09LST 11 July 2013	10	144
Radiosonde	18LST 17 ~ 10LST 18 June 2013	120	9
	13LST 18 ~ 08LST 19 June 2013	120	9
	09LST 10 ~ 09LST 11 July 2013	180	9

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

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

월 17일부터 19일까지 2시간 간격으로 18회 수집되었고 7월 10일부터 11일까지 3시간 간격으로 9회 수집되었다. RS는 독일 GRAW사의 DFM-06 모델을 사용하였고(Table 3), GRAW사에서 개발한 GRAWMET 소프트웨어에서 처리된 자료를 이용하였다.

지형에코의 DC 성분 제거 방법은 Fig. 2와 같이 PCL 1300의 도플러 스펙트럼 자료를 이용한다. 우선 DC 라인 주변에서 지형에코에 해당되는 몇 개의 FFT 분석점을 결정한다. 전통적인 방법에서는 일반적으로 5개 이하의 FFT 분석점을 이용하며, 본 연구에서는 5개의 분석점을 이용하였다. PCL 1300은 연직빔과 4개의 경사빔으로 구성되는데, 결정된 FFT 분석점에 기록된 속도 성분의 값은 빔별로 제거된다. 제거된 분석점의 속도 성분은 보존된 2개의 인접한 분석점의 속도 성분을 보간하여 대체된다. 이와 같이 지형에코가 제거된 도플러 스펙트럼을 통해서 실제 대기 신호의 첨두를 결정한다. 결정된 첨두를 신호를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선속도를 추정하고, U, V, W의 바람벡터를 산출한다. 지형에코 제거를 통해서 산출된 바람벡터는 RS의 바람벡터를 기준으로 Table 4의 검증 방법을 이용하여 검증되었다.

3. 연구 결과

강원지방기상청의 PCL 1300은 서쪽과 남쪽의 복잡한 산악지형으로 인하여 지리적으로 지형에코가 발생하기 쉬운 곳에 위치한다. 지형에코가 발생한 경우에 WPR의 도플러 스펙트럼에서는 DC 성분이 특정 고도에서 연속적으로 발생한다. 강원지방기상청의 PCL 1300에서는

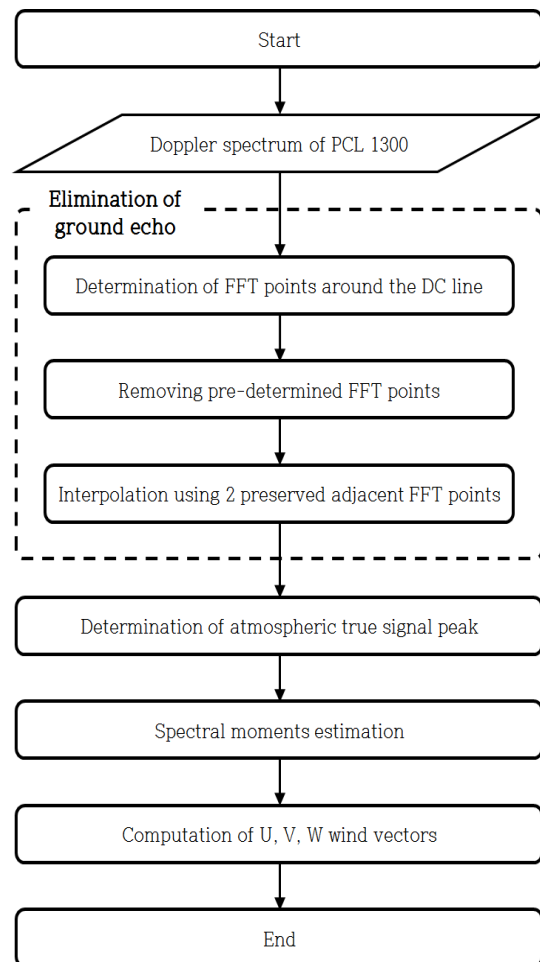
**Fig. 2.** Method of spectral moment estimation through removing ground echo.

Table 4. Lists of skill score for accuracy validation of wind vectors of PCL 1300

Description	Variables	Statistic definition
Mean RS	\bar{R}	$\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N V_R$
Mean WPR	\bar{W}	$\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N V_W$
Correlation Coefficient	CORR	$\frac{\sum_1^N (V_R - \bar{V}_R)(V_W - \bar{V}_W)}{\sqrt{\sum_1^N (V_R - \bar{V}_R)^2} \sqrt{\sum_1^N (V_W - \bar{V}_W)^2}}$
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_1^N (V_R - V_W)^2}$

V_W : Measured by Wind Profiler Radar (WPR)

V_R : Measured by RadioSonde (RS)

이와 같은 특징이 뚜렷하게 나타났다. 대표적으로 2013년 6월 17일 20LST에 관측된 PCL 1300의 서쪽(270°) 경사빔과 남쪽(180°) 경사빔의 도플러 스펙트럼에서는 고도 1 km 미만의 하층과 2 ~ 4.5 km의 상층의 넓은 영역에 걸쳐서 DC 성분을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 마주보는 경사빔의 도플러 스펙트럼은 일반적으로 청천대기에서 대칭적인 분포를 보이지만, Fig. 3에서 270° 경사빔과 마주보는 동쪽(90°) 경사빔에서는 DC 성분이 발생하지 않았다. 270° 경사빔의 도플러 스펙트럼은 청천대기에서 일반적으로 나타나는 정상적인 고도별 분포를 보였다. 180° 경사빔과 북쪽(360°) 경사빔은 270° 경사빔과 90° 경사빔에서 나타나는 특징과 유사하였다. 270°와 180° 경사빔에서 발생한 DC 성분은 대기 신호가 아님을 알 수 있었다. 즉, 청천대기에서 마주보는 경사빔 간의 비대칭성은 DC 성분이 지형에코임을 증명하는 첫 번째 근거이다.

PCL 1300을 중심으로 반경 5 km 이내에 해발 100 m 이하의 낮은 산악 지형으로 이루어져 있음에도 불구하고 저층 관측 방식에 대한 상하층의 도플러 스펙트럼에서는 DC 성분이 발생하였다. 저층 관측 방식의 상층에서 나타난 DC 성분은 UDC (Upper DC)라고 명명하고, 하층에서 나타난 것은 LDC (Lower DC)라고 명명하였다. UDC와 LDC는 반경 5 km 이내에 존재하는 낮은 산악 지형 보다 PCL 1300의 유효 관측 고도에 해당되는 반경 밖의 높은 산악지형에 의해 발생한 것으로 판단된다. 유

효 관측 고도보다 먼 거리에 있는 지형이 관측될 수 있는 이유는 전파거리 접힘 현상 때문이다. 전파거리 접힘은 WPR의 유효 관측 고도보다 높게 있는 산란체의 고도가 실제 고도보다 낮게 산출되는 것을 의미한다. 일반적으로 PRF를 길게 하여 유효 관측 고도를 높게 설정함으로써 전파거리 접힘을 대비하지만, 먼 거리에서도 강한 신호를 내보내는 지형에코는 전파거리 접힘을 발생시킬 수 있다. 유효 관측 고도는 식 (1)과 같이 PRF를 통해서 계산될 수 있다. 강원지방기상청의 PCL 1300의 저층 관측 방식과 고층 관측 방식에 의한 유효 관측 고도(h_e)는 각각 9.7, 15 km이다.

$$h_e = \frac{c}{2PRF}, (c: \text{velocity of light}) \quad (1)$$

Fig. 3의 270° 경사빔에서 발생한 UDC는 Fig. 4의 고층 관측 방식에서 나타나지 않았다. Fig. 5는 Fig. 3과 4의 사례에 관측된 RS 바람벡터와 PCL 1300의 바람벡터를 비교한 결과이다. 저층 관측 방식에서 UDC가 나타났던 고도의 PCL 1300의 동서 성분 바람벡터(U)는 RS에 비하여 과소 추정된 반면, 고층 관측 방식에서는 UDC가 사라짐으로써 RS의 U와 일치하였다. 이 차이는 서쪽으로 반경 10 km 이내의 낮은 산악지형에서 발생한 부방사부의 지형에코가 주방사부에서 관측된 대기 신호에 묻힌 것을 의미하며, 고층 관측 방식의 유효 관측 고

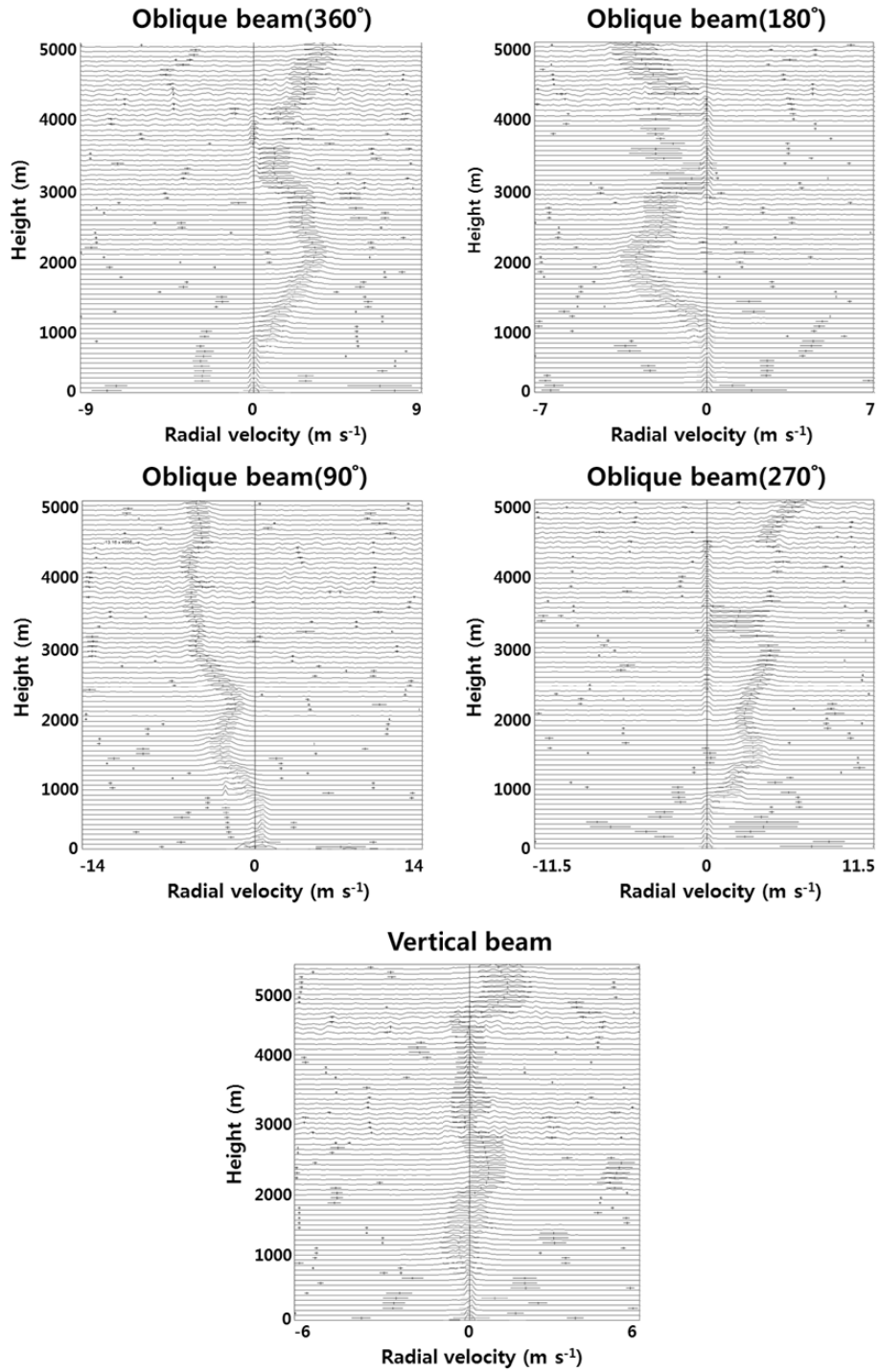


Fig. 3. Doppler spectra of PCL 1300 before removing ground echo in low mode on 20 LST Jun. 17, 2013.

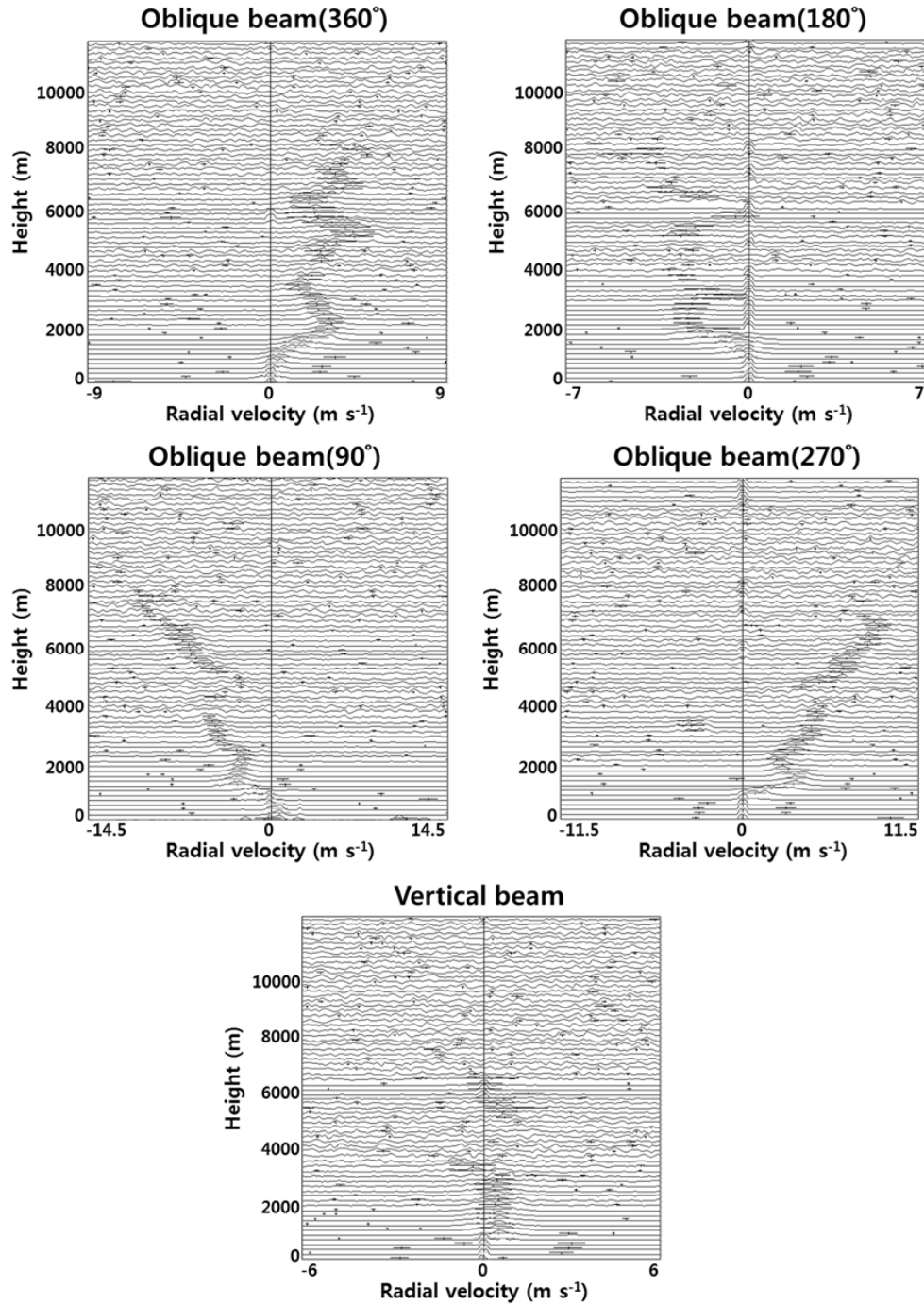


Fig. 4. Doppler spectra of PCL 1300 before removing ground echo in high mode on 20 LST Jun. 17, 2013.

도, 15 km 반경 밖의 지형에코는 전파거리 접힘 고도에서 U의 대기 신호보다 약한 것으로 추정된다. UDC는 저층 관측 방식의 유효 관측 고도, 9.7 km 반경 밖에 존재하는 해발 600 ~ 1000 m 이내의 산악지형에 의해 발생된 것으로 판단할 수 있으며, 전파거리 접힘의 특성에 의해 해 반경 약 10 ~ 15 km 이내에서 발생한 2차 지형에코에 의한 신호로 판단된다. 즉, 저층 관측 방식과 고층 관측 방식에서 발생하는 DC 성분의 유무와 RS를 기준으로 산출된 바람벡터의 연직 분포 차이는 DC 성분이 지형에코임을 증명하는 두 번째 근거임과 동시에 전파고도 접힘 현상에 의한 2차 지형에코의 근거가 된다.

Fig. 3의 180° 경사빔에서 발생한 UDC는 Fig. 4의 고층 관측 방식에서도 나타난다. PCL 1300을 중심으로

반경 10 km 이내에 남쪽의 지형은 서쪽보다 평탄하며, 산악지형도 적게 분포한다. 그럼에도 불구하고 고층 관측 방식에서 270° 경사빔보다 UDC가 두드러지게 발생한 이유는 U와 남북 성분 바람벡터(V)의 크기 차이 때문이다. U는 V에 비해 매우 강하기 때문에 V의 브래그 산란은 U보다 약하다. 270° 경사빔의 강한 대기 신호에 묻혀서 나타나지 않았던 2차 지형에코는 V의 약한 브래그 산란에 의해 180° 경사빔의 대기 신호와 동시에 나타난 것으로 판단된다.

90° 경사빔을 제외한 나머지 경사빔에서 LDC가 발생한 원인도 이와 유사하다. PCL 1300을 중심으로 반경 1 km 이내에는 해발 30 m 미만의 평탄한 지형으로 이루어져 있음에도 불구하고 LDC가 발생하였다. 고도 1 km

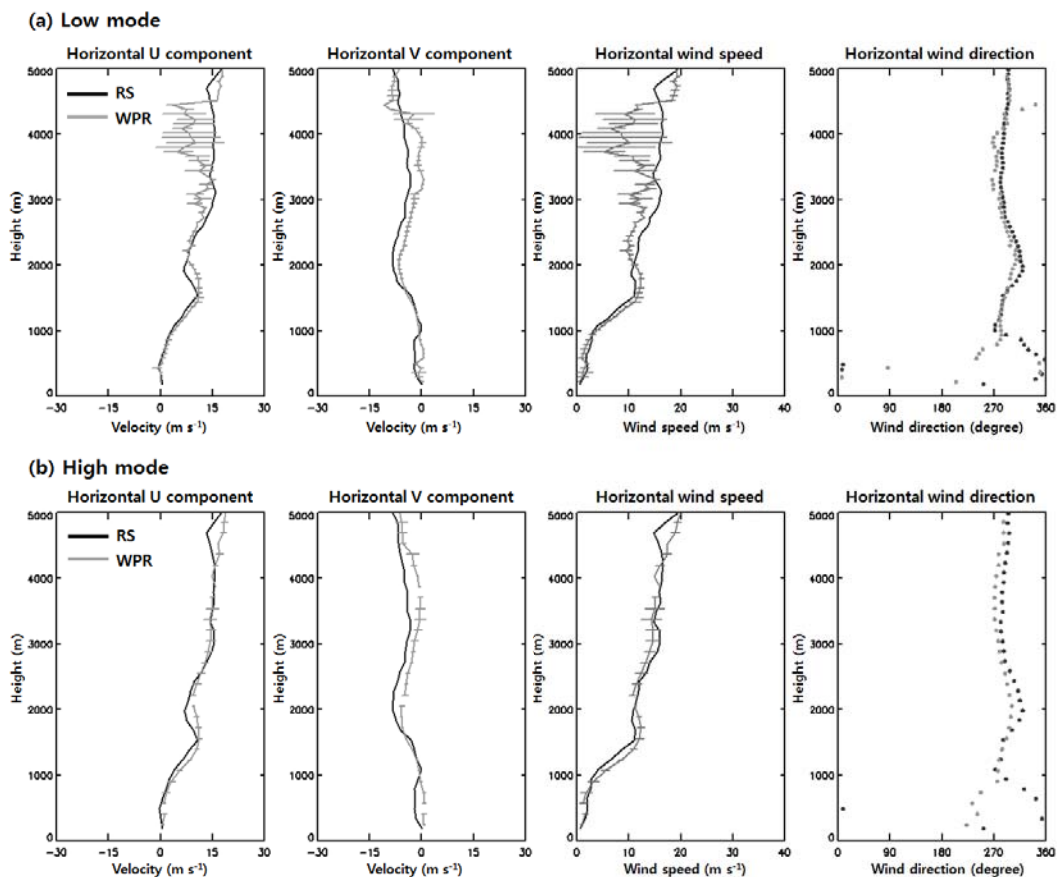


Fig. 5. Vertical profiles of horizontal wind components for RS (black line) and PCL 1300 (gray line) before removing ground echo in (a) low mode and (b) high mode on 20 LST Jun. 17, 2013.

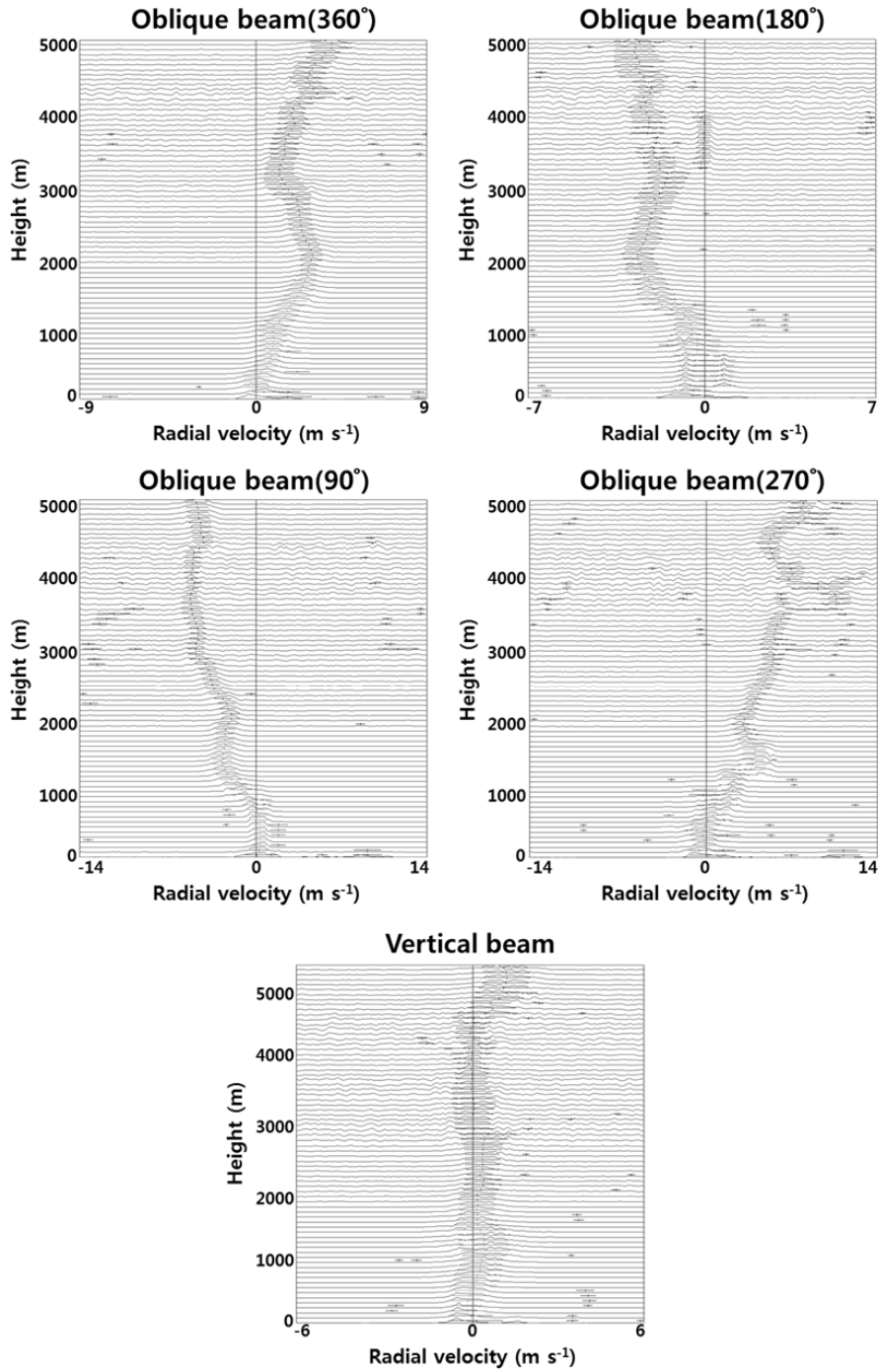


Fig. 6. Doppler spectra of PCL 1300 after removing ground echo in low mode on 20 LST Jun. 17, 2013.

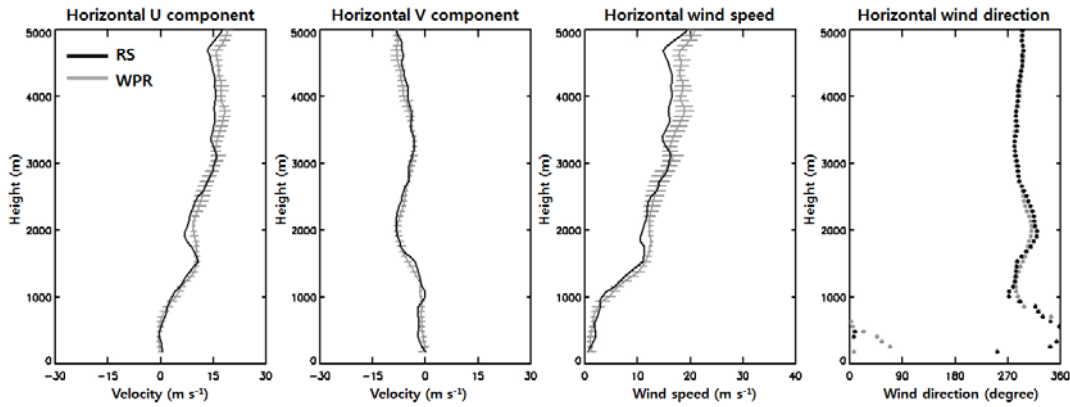


Fig. 7. Vertical profiles of horizontal wind components for RS (black line) and PCL 1300 (gray line) after removing ground echo in low mode on 20 LST Jun. 17, 2013.

미만의 시선속도가 약 2 m s^{-1} 미만으로 낮은 경우에 약한 대기의 움직임으로 인하여 브래그 산란이 약하게 일어난다. 하층의 약한 브래그 산란으로 인하여 약화된 대기 신호는 2차 지형에코에 묻혀서 LDC가 발생한 것으로 판단된다. 특히, 풍속이 급격하게 증가하는 고도 1 km 부근에서는 대기 운동이 활발해지면서 시선속도 0 m s^{-1} 부근의 침투가 사라졌다.

청천대기에서 강릉 PCL 1300의 도플러 스펙트럼에 나타난 UDC와 LDC는 전파거리 접힘 현상에 의해 발생한 2차 지형에코로 판단되고, 이를 제거하여 PCL 1300의 정확도를 개선하였다. Fig. 6은 Fig. 3의 UDC와 LDC를 제거하고 재산출된 도플러 스펙트럼이다. 가장

큰 특징은 UDC와 LDC가 모든 빔에서 제거됨으로써 2차 지형에코에 의해 묻혀있던 대기 신호가 뚜렷하게 나타난 것이다. UDC와 LDC를 제거하기 전에 나타났던 마주보는 경사빔 간의 도플러 스펙트럼의 비대칭성은 사라지고 고도별로 대칭성이 뚜렷하게 나타났다. DC 성분을 제거한 후에 뚜렷하게 나타나는 대기 신호는 UDC와 LDC가 지형에코임을 증명하는 가장 확실한 근거이다.

지형에코가 제거된 도플러 스펙트럼을 통해서 Fig. 7과 같이 U, V, 풍속, 그리고 풍향을 산출하였고, RS의 바람벡터와 비교하였다. UDC의 고도에서 과소 추정되었던 PCL 1300의 U, V는 지형에코의 제거로 인하여 뚜렷하게 개선되었다. 지형에코를 제거하기 전에는 U가 과소

Table 5. Accuracy of PCL 1300 before and after removing ground echo for each profile

Events	Periods (LST)	RMSE (m s^{-1})		Improvement rate(%)
		Before improvement	After improvement	
1	20LST 17 June 2013	3.6	1.5	58.3
2	06LST 19 June 2013	6.0	0.8	86.6
3	10LST 10 July 2013	8.0	1.4	82.5
4	12LST 10 July 2013	3.4	2.1	38.2
5	18LST 10 July 2013	4.4	2.2	50.0
6	21LST 10 July 2013	5.8	1.9	67.2
7	00LST 11 July 2013	3.7	2.3	37.8
8	03LST 11 July 2013	7.5	1.6	78.7
9	06LST 11 July 2013	7.6	1.9	75.0
10	09LST 11 July 2013	8.3	2.6	68.7

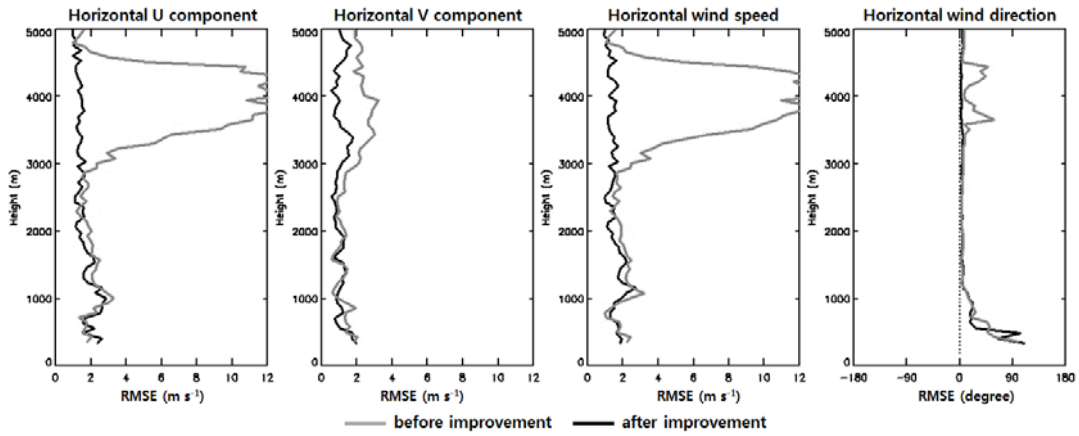


Fig. 8. Vertical variations of total RMSE for PCL 1300 before (gray line) and after (black line) removing ground echo for 10 events in Table 5.

추정됨에 따라 북풍 계열의 풍계가 나타났고, 최대 90° 까지 풍향의 오차가 발생하였지만, 과소 추정되었던 U, V가 개선됨에 따라 PCL 1300의 풍향은 RS와 정확하게 일치하였다. 지형에코를 제거하기 전의 풍속에 대한 RMSE는 3.6 m s⁻¹이었고, 제거 후에는 1.5 m s⁻¹로 약 50% 이상 PCL 1300의 풍속이 개선되었다. LDC의 고도에서는 하층의 풍속이 3 m s⁻¹ 미만으로 매우 약했기 때문에 개선의 효과가 뚜렷하지 않았다.

특정 사례를 통해 검증된 지형에코 제거를 이용한 개선 과정으로부터 RS 비양 시점을 기준으로 PCL 1300에 지형에코가 나타났던 사례를 Table 5와 같이 선별하였고, PCL 1300의 개선 전과 후의 풍속에 대한 RMSE를 통해서 지형에코 제거에 따른 개선 효과를 제시하였다. 지형에코로 인하여 최대 8.3 m s⁻¹까지 오차가 발생하였고, 개선 후에는 최대 오차가 2.6 m s⁻¹로 감소하였다. 개선 효과가 가장 크게 나타났던 사례는 사례 2였으며, 86.6%의 오차 개선 효과를 보였다. 지형에코로 인한

WPR의 풍속 오차는 실제 풍속에 비례하기 때문에 지형에코에 대한 정확한 오차 개선이 이루어진다면 WPR 풍속에 대한 개선 효과는 상층이 하층보다 크다.

이와 같은 특징에 의해 PCL 1300의 오차 개선 효과는 Fig. 8과 같이 지형에코가 상층의 넓은 고도에서 뚜렷하게 발생할수록 크게 나타났다. Fig. 8에서는 Table 5의 사례를 통합하여 PCL 1300의 RMSE를 고도별로 산출하였다. 1 km 이하의 하층은 지형에코가 발생했음에도 불구하고 약한 풍속에 의해 개선 전과 후의 풍속 차이가 1 m s⁻¹ 미만이고 도플러 스펙트럼에서 지형에코 외에 대기 신호도 뚜렷하게 수신되어서 PCL 1300의 개선효과가 크지 않았던 반면에 고도 3 km 이상의 상층에서는 지형에코에 대한 개선 효과가 뚜렷하였다. 지형에코에 의해 12 m s⁻¹까지 발생하였던 풍속의 오차는 지형에코의 제거에 의해 2 m s⁻¹ 미만으로 감소하였다. 상층의 지형에코로 인한 풍향의 오차는 약 50° 까지 발생하였지만 지형에코의 제거에 의해 풍향의 오차는 5° 미만으로 감

Table 6. Total accuracy of PCL 1300 before and after removing ground echo for 10 events in Table 5

Wind components	Before improvement		After improvement		Improvement rate(%)
	RMSE (m s ⁻¹)	CORR	RMSE (m s ⁻¹)	CORR	
Wind speed	6.0	0.58	1.9	0.97	68.4
U component	6.1	0.62	1.9	0.98	69.4
V component	2.1	0.85	1.4	0.94	32.2

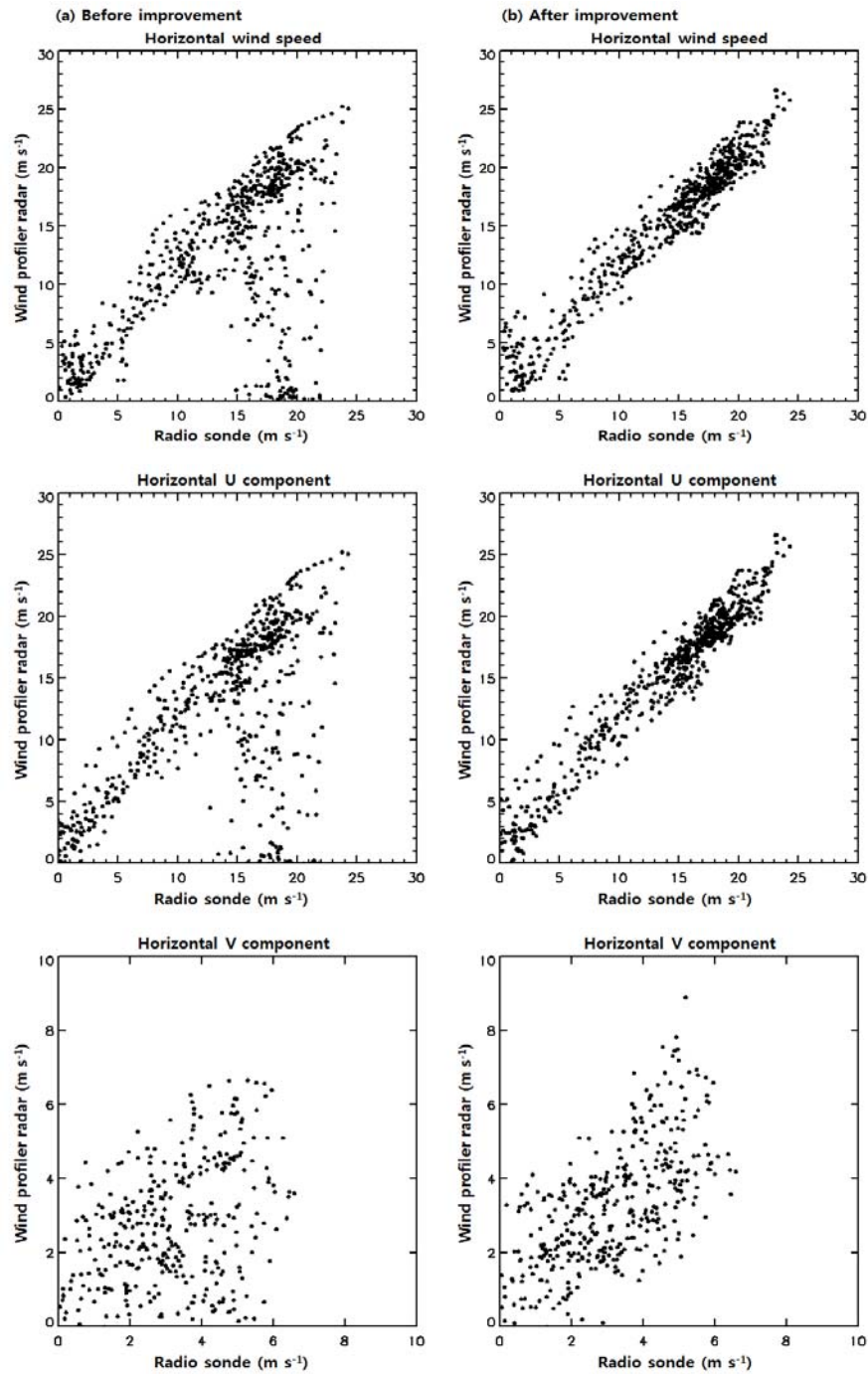


Fig. 9. Scatter plots of horizontal wind components between RS and PCL 1300 before and after removing ground echo for 10 events in Table 5.

소하였다. 하층 풍향의 오차는 지형에코의 제거와는 무관하게 개선 전과 후의 차이가 없었다. 하층 풍향의 오차는 U, V의 크기보다 부호에 영향을 크게 받는다. 하층 U, V의 부호는 지표면의 영향에 의해 상층보다 시공간적인 불규칙성이 강하다. 이와 같은 특징에 의해 하층 풍속의 오차는 작지만 풍향의 오차는 크게 나타난다. 또한 PCL 1300의 풍속이 과대 추정된 경우는 지형에코에 의한 영향이 아니기 때문에 개선된 결과를 보이지 않았다.

Table 5의 전체 사례를 통해서 최종적으로 PCL 1300의 바람벡터에 대한 오차 개선 효과를 Table 6에서 제시하였다. PCL 1300의 풍속은 68.4% 개선되었고, RS 풍속과의 상관성은 0.58에서 0.97로 향상되었다. Fig. 9(a)에서 개선 전의 PCL 1300의 풍속은 15 m s^{-1} 미만에서 RS의 풍속과 선형적인 분포를 보였다. $15 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속에서는 지형에코에 의해 과소 추정되었지만, 지형에코 제거를 통해 RS의 풍속과 일치하게 되었다(Fig. 9(b)). PCL 1300의 U는 69.4% 개선되었고, RS와의 상관성은 0.62에서 0.98로 향상되었다. PCL 1300의 U는 풍속과 유사한 특징을 보였다. 12 m s^{-1} 미만의 크기에서는 RS와 선형적인 분포를 보이다가 $12 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 의 크기에서 과소 추정되었다. 지형에코 제거를 통해서 U에 대한 PCL 1300의 과소 추정은 뚜렷하게 개선되었다. PCL 1300의 V는 32.2% 개선되었고, RS와의 상관성은 0.85에서 0.94로 향상되었다. PCL 1300의 V는 U에 비하여 벡터의 크기가 작아서 개선 효과는 낮았다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 강원지방기상청의 PCL 1300에서 발생하는 이상 에코의 원인을 분석하였고, 원인 분석을 바탕으로 PCL 1300의 정확도를 개선하였다. PCL 1300은 서쪽과 남쪽의 복잡한 산악지형으로 인하여 지리적으로 지형에코가 발생하기 쉬운 곳에 위치한다. 2013년 6월 17일 20LST에 관측된 PCL 1300의 270° 경사빔에 대한 도플러 스펙트럼에서는 고도 1 km 미만의 하층과 2 ~ 4.5 km의 상층의 넓은 영역에 걸쳐서 DC 성분이 발생되었다. 270° 경사빔과 마주보는 90° 경사빔에서는 DC 성분이 발생하지 않았다. PCL 1300의 동쪽은 서쪽의 산악지형과 달리 해안과 인접해있기 때문에 평탄한 지형으로 이루어져 있다. 이와 같이 청천대기에서 마주보는 경사

빔 간의 비대칭성은 DC 성분이 지형에코임을 증명하는 첫 번째 근거로 제시되었다.

PCL 1300은 펄스폭과 PRF를 조정하여 저층 관측 방식과 고층 관측 방식으로 관측한다. 저층 관측 방식에서 DC 성분이 나타났던 고도의 PCL 1300의 U는 RS에 비하여 과소 추정된 반면, 고층 관측 방식에서는 DC 성분이 사라짐으로써 RS의 U와 일치하였다. 이 차이는 서쪽으로 반경 10 km 이내의 낮은 산악지형에서 발생한 부방사부의 지형에코가 주방사부에서 관측된 대기 신호에 묻힌 것을 의미한다. DC 성분은 저층 관측 방식의 유효 관측 고도 밖에 존재하는 해발 600 ~ 1000 m 이내의 산악지형에 의해 발생한 것으로 판단할 수 있으며, 전파거리 접힘의 특성에 의해 반경 약 10 ~ 15 km 이내에서 발생한 2차 지형에코에 의한 신호로 판단된다. 즉, 저층 관측 방식과 고층 관측 방식에서 발생하는 DC 성분의 유무와 RS를 기준으로 산출된 바람벡터의 연직 분포 차이는 시선속도 0 m s^{-1} 부근의 침투가 지형에코임을 증명하는 두 번째 근거임과 동시에 전파고도 접힘 현상에 의한 2차 지형에코의 근거가 되었다.

이와 같은 근거로 DC 성분을 제거하여 PCL 1300의 정확도를 개선하였다. 특히 DC 성분을 제거한 후에 뚜렷하게 나타나는 대기 신호는 DC 성분이 지형에코임을 확인하였다. 지형에코로 인한 WPR의 풍속 오차는 실제 풍속에 비례하기 때문에 지형에코에 대한 정확한 오차 개선이 이루어진다면 WPR 풍속에 대한 개선 효과는 상층이 하층보다 컸다. 이와 같은 특징에 의해 PCL 1300의 오차 개선 효과는 지형에코가 상층의 넓은 고도에서 뚜렷하게 발생할수록 크게 나타났다. 1 km 이하의 하층은 지형에코가 발생했음에도 불구하고 약한 풍속에 의해 PCL 1300의 개선효과가 크지 않았던 반면에 고도 3 km 이상의 상층에서는 지형에코에 대한 개선 효과가 뚜렷하였다. PCL 1300의 풍속은 개선 전에 15 m s^{-1} 미만에서 RS의 풍속과 선형적인 분포를 보였지만 $15 \sim 25 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속에서는 지형에코에 의해 과소 추정되었다. 지형에코 제거를 통해 PCL 1300의 풍속은 과소 추정이 개선되면서 RS의 풍속과 일치하게 되었고, PCL 1300의 바람벡터에 대한 오차는 약 2.0 m s^{-1} 미만으로 줄었다. 최종적으로 PCL 1300의 풍속은 68.4% 개선되었고, PCL 1300의 U, V는 각각 69.4%, 32.2% 개선되었다.

본 연구 결과를 통해서 강원지방기상청의 PCL 1300

의 하드웨어 관측 정확도는 오차 약 2.0 m s^{-1} 미만으로 높은 것으로 판단된다. 개선 전에 발생한 약 6.0 m s^{-1} 의 관측 오차는 WPR의 하드웨어 오차로 판단하기 어렵다. 신호처리 단계에서 지형에코에 의한 자료의 오염에 의해 상층의 바람벡터가 과소 추정되었기 때문이다. PCL 1300이 대기 신호를 수신하지 못한 것이 아니라 지형에코를 대기 신호로 오인한 것이 원인이었다. 즉, PCL 1300의 하드웨어 관측 정확도를 객관적으로 평가하기 위해서는 지형에코와 같은 환경적인 요인이 제거된 대기 신호를 사용해야 하며, 수치모델 혹은 악기상 관측 등에 올바르게 활용되기 위해서도 이와 같은 신호처리 과정이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상See-At기술개발사업(KMIPA 2015-5030)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- 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, chap.17, 130-142.
- Holleman, I., van Gasteren, H., Bouten, W., 2008, Quality assessment of weather radar wind profiles during bird migration, J. Atmos. Oceanic Technol., 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, Journal of the Meteorological Society of Japan, 84, 1085-1096.
- Jung, P. S., Lim, Y. K., Kim, K. H., Han, S. O., Kwon, T. Y., 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.
- Maruri, M., Romo, J. A., Gomez, L., 2014, Aspects of quality control of wind profiler measurements, 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.
- Park, O. R., Kim, Y. S., Cho, C. H., 2005, The observing system experiments with the wind profiler and autsonde at Haenam, Journal of Korean Meteorological Society, 41, 57-71.
- Park, S. Y., Lee, H. W., Lee, S. H., Kim, D. H. 2010, Impact of wind profiler data assimilation on wind field assessment over coastal areas, Asian Journal of Atmospheric Environment, 4, 198-210.
- 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.
- Skolnik, M. I., 1980, Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill, 566.
- Strauch, R. G., Merritt, D. A., Moran, K. P., Earnshaw, K. B., van de Kamp, D., 1984, The colorado wind-profiling network, J. Atmos. Oceanic Technol., 1, 37-49.
- Weber, B. L., Wuertz, D. B., Welsh, D. C., McPeck, R., 1993, Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures, J. Atmos. Oceanic Technol., 10, 452-464.
- Wilczak, J. M., Coauthors, 1995, Contamination of wind profiler data by migrating birds: Characteristics of corrupt bird data and potential solutions, J. Atmos. Oceanic Technol., 12, 449-467.
- Won, H. Y., Cho, C. H., Baek, S. K., 2006, Classification of precipitation type using the wind profiler observations and analysis of the associated synoptic conditions: Years 2003-2005, Atmosphere, 16, 235-246.