

레이더 상수를 이용한 UHF 윈드프로파일러 표준화

이경훈* · 권병혁** · 윤홍주***

UHF Wind Profiler Calibration Using Radar Constant

Kyung Hun Lee* · Byung Hyuk Kwon** · Hong-Joo Yoon***

요약

기상청의 UHF 대역 윈드프로파일러 레이더는 바람의 연직 분포를 산출하는 장비로, 더 나은 성능을 위해 보정이 필요하다. 보정은 강수에 민감한 UHF 레이더의 특징을 이용하고, 레이더 사이트에서 우량계로 측정된 시간별 일련의 지상 강우 강도를 기준으로 한다. 장비 보정을 하지 않으면 청천에서도 바람 벡터에 오차가 발생할 수 있으므로, 레이더 상수 결정 방법에 따라 정기적으로 보정 작업이 수행되어야 한다. 레이더 산출 바람을 라디오존데로 관측한 바람과 비교하여, 최적의 레이더 상수가 바람의 정확도 향상에 이바지하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

The UHF band wind profiler radars of the Korea Meteorological Administration (KMA), which produces the vertical profile of the wind, need to be calibrated for better performance. The capabilities of the radar in detecting even light precipitation were used for the calibration of which reference takes the hourly series of ground rainfall rate measured by a rain gauge at the radar site. This calibration must be renewed regularly according to the methodology implemented in this work since errors occur on the wind vectors in the clear sky without reflectivity calibration. Comparing the wind by wind profiler with that by radiosonde, the optimal radar constant contributed to the improvement of wind accuracy.

키워드

Wind Profiler Radar, Calibration, Doppler Spectrum, Radial Velocity, Rain Intensity
윈드프로파일러 레이더, 보정, 도플러 스펙트럼, 시선 속도, 강우 강도

1. 서론

윈드프로파일러 관측과 자료 처리는 도플러 기상 레이더의 원격 탐사 이론과 과정을 공유한다[1-2]. 구체적인 차이점이라면 청천에서의 원격 탐사에 관한 것이며, 특히 파장의 함수로서 청천 에코의 검출 가능

성에 대한 평가이다. 특히 UHF 대역의 윈드프로파일러는 강수에 민감하므로 강수에 대해 보정이 이루어지면 청천에서도 성능이 향상된다. 그러나 현재 KMA에서 운용중인 윈드프로파일러는 이러한 일련의 보정 작업들이 행해지고 있지 않다.

윈드프로파일러 보정은 계산된 레이더 상수 매개

* 부경대학교 지구환경시스템과학부(lee_buzz@nate.com)

** 교신저자 : 부경대학교 환경대기과학과

*** 부경대학교 공간정보시스템공학과(yoonhj@pknu.ac.kr)

• 접수일 : 2020. 08. 15

• 수정완료일 : 2020. 09. 14

• 게재확정일 : 2020. 10. 15

• Received : Aug. 15, 2020, Revised : Sep. 14, 2020, Accepted : Oct. 15, 2020

• Corresponding Author : Dept. of environmental atmospheric sciences, Pukyong National University,

Email : bhkwon@pknu.ac.kr

변수로 수행된다. 연속적으로 방출된 실제 전력 또는 수신기의 응답에 관한 정보는 기록되지 않는다. 따라서 레이더가 기록되는 조정 가능한 매개 변수의 값과 어떻게 다르게 작동하는지는 알 수 없다. 도플러 스펙트럼에서 산출된 노이즈는 레이더의 작동을 평가할 수 있는 정성적이고 객관적 자료이다.

강우 강도를 평균 연직 속도와 반사도에 연결하는 Atlas et al.의 기본 가정은 Marshall-Palmer의 지수 법칙을 따르고, 대기의 연직 속도를 무시할 수 있다는 것이다[3-4]. 종말 속도는 Foote and du Toit의 공식에 의한 공기 밀도의 변화를 고려하여 고도를 고려한 Gunn and Kinzer의 직경 관계 함수로 주어진다[5-6]. Campistron et al.은 디즈드로미터(disdrometer)로 측정된 강우 강도(R)와 두 매개 변수(반사도와 연직 속도) 방법 $R(Z, W)$ 을 사용하여 추론된 선형 적합도를 보였다. Z와 W는 디즈드로미터로 측정되었고, 보정 방법이 매우 유효하다는 것을 확인할 수 있다[7]. 디즈드로미터가 없어서 연직 속도를 산출할 수 없으면, 대부분 R과 Z 사이의 경험식을 사용하여 기상 레이더를 보정한다. 이를 토대로 본 논문에서는 선형 연구들과 달리 지상 우량계만을 이용하여 윈드프로파일러 레이더 보정 작업을 수행하였다.

본문에서는 사용된 윈드프로파일러의 특성, 신호 처리, 편집 방법 및 관측 자료를 설명하고, 결과를 이해하는 데 필요한 측정 속성을 살펴본다. 마지막으로 레이더의 보정, 즉 레이더 상수 결정을 위해 후방 산란 전력으로부터의 강우 강도 또는 청천의 굴절 구조 상수와 같은 물리적 파라미터를 평가하고, 라디오 존데와의 비교를 통해 보정의 유효성을 검증한다.

II. 연구 방법

2.1 윈드프로파일러 레이더

KMA는 아홉 기의 1.29 GHz 윈드프로파일러를 운영하고 있다. Degréane-Horizon 사가 제작한 UHF 밴드 PCL1300 윈드프로파일러 레이더는 도플러 효과 측정을 사용하여 청천 또는 강우에서 연직 바람 프로파일을 도출한다. 신호는 8.5° 빔 개구의 다섯 개 어레이 안테나에 의해 연속적이고 주기적으로 송수신된다. 안테나 하나는 연직으로 향하고 나머지 네 빔은

천정에 대하여 17°씩 비스듬히 기울어져 있다. 90° 간격의 방위각으로 배열되고, 약 23.3 cm 파장의 펄스로 방출된다. 피크 전력은 4 kW이고, 다른 작동 매개 변수는 제한된 범위에서 조정이 가능하다.

스펙트럼이 정리되면 시간과 고도를 따라 연속되는 기상 에코의 연속성 검사를 수행한다. 청천 또는 강우 에코가 동시에 존재하면 인식의 어려움이 커지고 특별한 절차가 적용된다. 이 문제는 강우의 시작과 끝 시점에서만 중요하다. 매우 가벼운 강우 중에도 비 에코가 우세하고 청천 에코를 가린다[8]. 다섯 방향에서 측정된 시선 속도를 사용하는데 특히, 연직 속도는 연직 빔에 의한 직접 측정 또는 4개의 경사 빔에 의해 산출될 수 있다[9-10].

2.2 자료

윈드프로파일러 보정을 위해 2013년 6월부터 2014년 1월까지 창원에서 관측한 자료를 사용하였다. 그림 1은 저층 모드의 관측에서 산출된 주요 매개 변수의 시간에 따른 연직 분포를 보여준다. 비가 내리면 강한 반사율, 큰 스펙트럼 폭, 강한 잡음 파워 밀도, 연직 속도의 강한 음의 값 및 수직의 검출로 인한 음의 비대칭 계수를 확인할 수 있다. 또한, 상층에서 수평 풍속이 강하게 나타난다. 연직속도 분포에서 강한 하강 속도를 확인할 수 있다. 고도 3 km 이상에서는 1.5 ms^{-1} 의 강한 하강 기류가 나타난다.

KMA에서 제공한 시간당 강우량 자료는 파일에 기록된 1시간 전의 강우량(mm)으로 누적되었다. 이 자료는 강우 강도(mmh^{-1})로 변환되고, 레이더 획득 시간으로 보간되어 1시간씩 일정한 값을 유지한다.

2.3 관측

레이더 방정식은 레이더에 의해 수신된 전력(P_r)을 안테나의 시선 방향으로 거리(r)에 중심을 둔 목표물의 후방 산란 특성과 관련시킨다. 단위 부피 속의 개별 표적의 단면적 후방 산란의 합으로 정의되는 후방 산란 특성은 레이더 반사율(η)로 주어진다. 거리 r에서 레이더에 의해 수신된 전력은 제한된 빔 폭과 반 펄스 길이(h/2)에 대응하는 부피에 포함된 후방 산란 벡터의 합이다. 레이더 방정식의 성립을 위해 일반적으로 레이더 반사율 η 가 체적 내에서 균질하고, h/2가 r에 비해 작다고 가정한다. 또한, 안테나의 방사

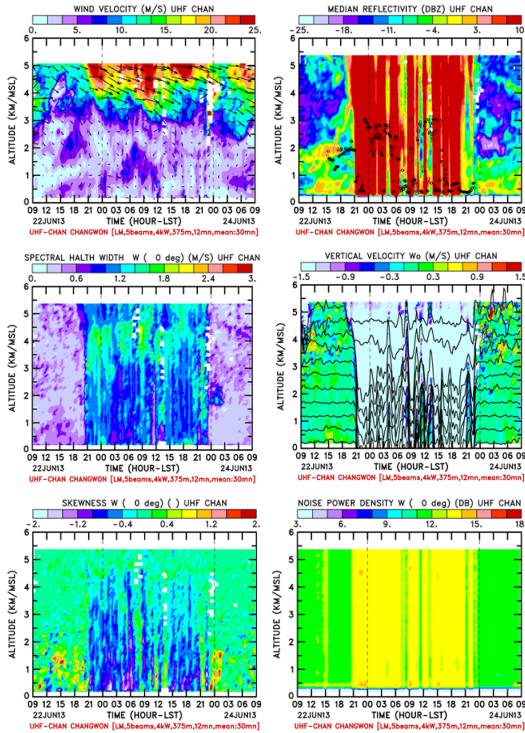


그림 1. 2013년 6월 22일 09 LST부터 6월 24일 09 LST까지 윈드프로파일러로 관측한 자료.

Fig. 1 Observations of the wind profiler from 09 LST on Jun. 22 to 09 LST on Jun. 24 2013.

패턴이 원형 가우스 모양이고, 측정이 안테나의 근거리를 넘어서 이루어진다고 가정한다. 이러한 조건에서 수신되는 전력은

$$P_r = \left[\frac{P_e G_r \lambda^2 h G_0 \theta^2 \alpha_a \alpha_c \alpha_r}{1024 \pi^2 \text{Ln}(2)} \right] \frac{\beta \eta}{r^2} \quad (1)$$

P_e 가 펄스의 피크 전력인 경우, G_r 은 수신기의 이득, λ 는 레이더의 파장, h 는 펄스의 길이, G_0 는 빔 축에 대해 등방성 안테나의 이득, θ 는 빔의 입체 각도이다. α_a , α_c , α_r 및 β 는 1보다 작은 계수이며, 안테나, 송신기, 수신기 및 대기에서의 파의 왕복 감쇠를 각각 나타낸다. β 를 제외하고 위에 나열된 모든 매개 변수는 측정에서 얻을 수 있지만, 그 값은 사용자 또는 외부 원인에 의해 변경될 수 있다. UHF 및 VHF의 일반적인 대역인 약 20 km로 제한된 범위에서 β 의 값

은 매우 우수한 정밀도로 결정될 수 있다. 대괄호 안의 표현을 레이더 상수라고 하며, 장비의 주기적인 보정으로 산출된다. 식 (1)은 MKS 단위로 유효하고, 안테나 유형과 관계없이 다음과 같은 관계가 성립한다.

비가 내리면 레이더 과장(Rayleigh 근사치)에 비해 직경이 작은 구형 물방울을 가정하여 레이더 반사율이 결정된다.

$$\eta_r = \pi^5 \lambda^{-4} |K|^2 Z \quad (2)$$

굴절 지수 $|K|^2$ 은 산란체의 특성과 관련이 있으며, 물의 경우 0.93이다. 레이더 반사도 Z 는

$$Z = \int_0^\infty N(D) D^6 dD \quad (3)$$

D 는 물방울의 지름이고, $N(D)$ 은 단위 부피당 D 와 $D+dD$ 사이 지름의 물방울 수이다. 일반적으로 Z 는 지름의 단위로 mm를 사용하여 $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ 단위로 계산된다. $10 \log(Z)$ 를 취하면 결과 단위는 dBZ가 된다.

온도와 습도의 불균질성으로 인한 공기의 굴절률 변동에 따르는 후방 산란을 고려할 때, 레이더 반사율은 식 (4)와 같다.

$$\eta_b = 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad (4)$$

이 표현은 등방성 정상 상태의 난류와 Kolmogorov 관성 캐스케이드의 존재를 가정하여 얻을 수 있다. C_n^2 는 공기의 굴절에 대한 구조함수의 상수이다. 레이더는 $\lambda/2$ 규모의 불균일성에만 민감하다. $\lambda/2$ 는 관성 영역에 있어야 해서 점성 영역으로 아래쪽 경계를 표시하는 내부 스케일과 큰 소용돌이 생성 영역이 시작되는 위쪽 외부 스케일 사이에 있어야 한다.

일반적으로 기상 레이더에 대한 레이더 방정식은 레이더 반사율 η (m^{-1})의 함수가 아니라 후방 산란의 특성에 관계없이 dBZ로 주어진 레이더 반사도 Z 의 함수로 표현된다. 이러한 조건에서 식 (1)에 식 (2)를 대입하면,

$$10\log(P_r) \quad (5)$$

$$= 10\log\left[\frac{P_e G_r \lambda^{-2} h G_0 \theta^2 \alpha_a \alpha_e \alpha_r \pi^3 |K|^2 10^{-18}}{1024 \text{Ln}(2)}\right]$$

$$+ 10\log(\beta) - 20\log(r) + Z$$

dBZ로 표현된 레이더 반사도 Z 를 제외하고, 식 (5)의 다른 인자는 MKS 단위, 즉 와트, 미터, 라디안이다. 따라서 레이더 상수는

$$C_{rad} = \frac{P_e G_r \lambda^{-2} h G_0 \theta^2 \alpha_a \alpha_e \alpha_r \pi^3 |K|^2 10^{-18}}{1024 \text{Ln}(2)} \quad (6)$$

식 (2)와 식 (4)에서 C_n^2 는 레이더 반사도로 나타낼 수 있다.

$$C_n^2 = 7,489 \times 10^{-16} \lambda^{-11/3} Z \quad (7)$$

이 식에서 C_n^2 는 $m^{-2/3}$, λ 는 m , Z 는 $mm^6 m^{-3}$ 이다. 따라서 Z 가 0 dBZ인 경우, 24 cm의 파장에서 C_n^2 는 $1.4 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ 과 같다. 에코의 특성이 사용된 파라미터의 정의와 일치하지 않으면 Z 나 C_n^2 를 확인해야 한다.

2.4 보정

VHF 대역과 달리 UHF 대역에서, 수신단의 잔류 잡음은 레이더 내부(주로 나이키스트 열 잡음)에 원인이 있다. 레이더의 작동 변수가 변경되지 않으면 분석된 전체 기간에 시간과 높이에 따라 일정한 잡음이 나타나야 한다. 실제로 잡음을 계산하는 방법은 에코의 존재로 인해 약간의 변동을 유발할 수 있다. 유한 시계열에 작용하는 푸리에 변환은 가중치 윈도우를 사용하여 감쇠된 스펙트럼 피크의 확산을 유도한다. 경험적으로 청천에서 반향이 있는 경우에 잡음 변동은 작은 dB로 나타난다. 그러나 비가 내리면 수 dB의 신호 상승을 기대할 수 있다. 그림 1에서 비가 내릴 때, 연직 빔으로 관측한 노이즈의 시계열 연직 분포를 확인할 수 있다.

레이더를 보정하려면 적절한 기준 측정만 있으면 된다. 윈드프로파일러가 비에 의한 후방 산란 신호를 사용하여 강우량을 산출하고, 표준 우량계로 지표에서

측정된 강우량 R 과 비교하는 것이다. 윈드프로파일러 관측에서는 Z 만 얻을 수 있다. 레이더 보정은 지상에서 레인 게이지로 측정된 강우량과 시스템에서 산출된 값 사이의 차이를 최소화하기 위해 식 (5)의 레이더 상수를 조정하는 것으로 수행된다. 주어진 고도에서 각 관측 주기마다 5개의 시선 방향에서 측정된 반사도의 중앙값을 사용한다. 빗방울 낙하 속도 W 는 5개의 빔에서 산출된 속도이다. 윈드프로파일러 레이더 관측에서 W 와 Z 를 산출하고, Marshall-Palmer 법칙으로 R 을 계산할 수 있다.

III. 연구 결과

3.1 윈드프로파일러 레이더 상수 결정

결정할 레이더 상수는 높이와 무관하다고 가정한다. 이를 확인하기 위해 그림 2는 2013년 11월 7일 09 LST의 노이즈 연직 분포를 보여준다. 노이즈는 연직적으로 일정해야 하며, 그렇지 않은 경우에는 주로 원격 가변 수신기의 이득에 기인하는 것으로 본다. 그림 2에서 북쪽 경사 빔(352°)과 남쪽 경사 빔(172°)의 고도별 노이즈 크기는 다소 차이가 있지만 연직적으로 일정한 분포를 보여준다. 저층 모드에서 노이즈는 고도 700 m 이상에서 거의 안정적이며, 그 아래에서는 아주 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

지상의 우량계 측정 결과와 비교를 위한 레이더 강우 측정에 가장 적합한 고도를 결정하는 것이 매우 중요한 문제이다.

수많은 테스트 후 700 m가 최종적으로 레이더 강우 측정 높이로 결정되었다. 수신기의 측정 범위는 약한 비(이슬비) 에코보다 수십 dB 낮은 청천 후방 산란을 측정하는 데 맞춰져 있다. 따라서 비가 내리는 동안 레이더에 가까울수록 측정값이 포화할 위험이 있다. 포화가 도플러 속도의 측정을 현저하게 저하시키는 않는다. 수신기의 포화는 지상 강우량의 증가에 따라 레이더에 의해 측정된 반사도의 상한값으로 시계열에 반영된다. 강우강도가 20mmh^{-1} 이상이 되면, 고도 1 km에서 모두 포화되는 것을 확인하였다.

레이더 강우 측정 고도로 선택한 고도에서는 강우강도 20mmh^{-1} 까지 수신 신호의 포화가 나타나지 않는다. 이 높이는 일반적으로 용해 구역에서 2 km 이

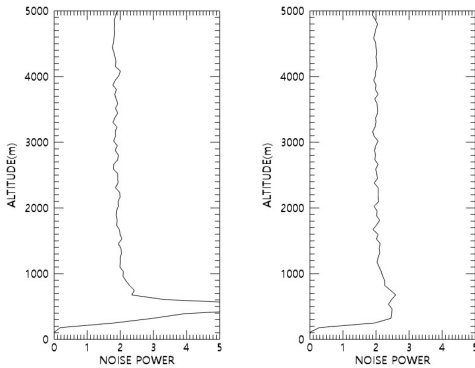


그림 2. 2013년 11월 7일 09 LST에 방위각 352° 및 172° 빔에 의해 측정된 청천 잡음의 연직 변화.
Fig. 2 Noise profile at 09 LST on November 7, 2013 excluding rain episodes observed by the beam in azimuth 352° and 172° in low mode.

상 떨어져 있어 낙하 입자 크기 스펙트럼이 안정화 되었다고 고려할 수 있다[11]. 그러나 비교적 높은 고도는 주로 레이더 기준 높이와 지면 사이의 증발 및 대류를 통해 비의 특성이 변경될 수 있으므로 오류의 위험이 증가한다. 보정 방법이 가장 불리한 가정은 공기의 연직 속도를 무시한다는 것이다. 일반적으로 층운형 강우, 즉 대류성 뇌우가 아닌 경우에 해당한다. 따라서 0°C 등은 고도에서 맑은 띠의 존재와 관련된 강우에만 적용될 수 있다.

레이더는 약 5분마다 프로파일을 생성하는 반면, 레인 게이지는 지난 1시간 동안 누적된 강우량을 1시간 단위로 제공한다. 따라서 레이더 측정의 시간 분해능을 낮춰서 레인 게이지의 분해능과 호환되도록 정리해야 한다(반대로는 불가능). 이를 위해, 최소 1시간 이상 지속된 강우만 정선하여 1시간에 걸쳐 평균하고, 1시간 누적 강우는 우량계 측정 30분 전 자료로 기록되었다.

이 보정 결과는 그림 3에서 볼 수 있다. 2013년 10월에서 2014년 1월까지 관측된 자료로 지상 우량계와 레이더로 측정된 강우량의 히스토그램을 나타낸다. 3600초로 평활화된 강우강도로 상관 계수가 향상되는 방향으로 선형 회귀를 반복하여 레이더 상수를 결정한다.

레이더 상수의 결정은 연속 근사에 의해 이루어진다. 먼저, 장기간의 강우를 찾고, 레이더 및 레인 게이

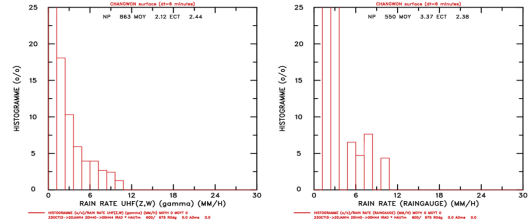


그림 3. 2013년 10월 23일부터 2014년 1월 20일까지 지상 강우 측정을 참조하여 창원 UHF 윈드프로파일러의 보정 결과. 히스토그램은 윈드프로파일러(왼쪽)와 지상 우량계(오른쪽)에 의한 강우 강도.

Fig. 3 Calibration of Changwon UHF wind profiler in low mode with reference to the rainfall measurements on the ground from Oct. 23, 2013 to Jan. 20, 2014. Histograms show the rainfall rate by the wind profiler (left) and by the rain gauge (right).

지 시계열의 최상의 시각적 중첩이 되도록 레이더 상수를 최대한 조정한다. 이 상수로 지상 레이더 대응에 대한 추가 정보를 제공한 다른 수치를 산출한다. 그런 다음 상수를 적절하게 조정하고 레이더 산출 결과와 지상 기준 측정값 사이에 최소 오차를 주는 값을 유지한다. 이러한 시험에 따라 레이더 상수는 약 0.1 dB의 방법론적 부정확성을 갖는 것으로 추정되는데, 이는 강우량의 10% 미만에 해당한다.

창원 윈드프로파일러의 경우는 레이더 상수가 87 dB로 결정되었고, 나머지 8기의 윈드프로파일러에 대한 레이더 상수도 61 - 117 dB 사이의 값으로 결정되었다.

3.2 민감도 결정

윈드프로파일러의 수신 전력은 청천과 구름 혹은 강수 입자에서 산란하는 신호의 합이다. 청천에서는 식 (4)와 같이 브래그 산란의 레이더 반사도로 표현되고, 구름이나 강수 입자의 산란 신호는 식 (2)의 레일리 산란의 레이더 반사도로 표현된다. 레이더의 민감도는 반사도 또는 거리의 함수로 관측 가능한 최소 C_n^2 로 평가될 수 있다. 청천에서 C_n^2 는 $\lambda^{-1/3}$ 에 따라 변동하는 반면에 강수에 의한 레이더 반사도는 λ^{-4} 에 의존하므로 윈드프로파일러는 강수보다는 청천 난류에 민감하게 반응한다. 따라서 윈드프로파일러의 주파수가 400 MHz 이상이 되어야 강우를 측정할 수 있다. 1,290 MHz에서는 약한 비가 내리는 경우에 C_n^2 와

반사도는 유사한 강도와 프로파일을 보여준다.

잡음에 가까운 약한 에코를 놓치지 않기 위해서 일반적으로 저층 모드에서는 2 km 미만에서 나타나는 강한 에코를 사용하지 않는다. 고도별 최소 전력에 대한 검색을 기반으로 감지 임계값을 결정하는 방법은 오류를 유발하기 쉽다. 수신기의 이득이 일시적으로 떨어지면 추정값이 아래쪽으로 바이어스된다. 이러한 유형의 문제를 피하기 위해 평균 1 dB보다 큰 스펙트럼 노이즈와 관련된 신호만 처리한다.

그림 4는 맑은 날 최종 결정된 레이더 상수를 적용한 보정 반사도와 C_n^2 의 연직 프로파일을 보여준다. 반사도로 맑은 날임을 확인할 수 있고, 대체로 약한

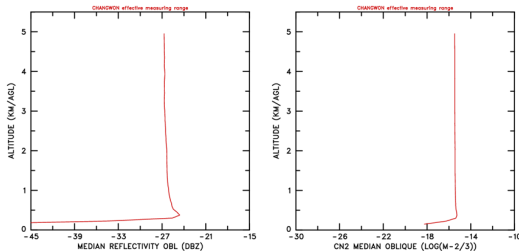


그림 4. 반사도의 중앙값(왼쪽)과 C_n^2 의 연직 분포.
Fig. 4 Vertical profiles of the median reflectivity (left) and the observable minimum C_n^2 .

안정층이나 경계층이 생성되지 않았다는 것을 보여 준다[12]. 레이더 성능을 검사하기 좋은 예로, 저층 모드에서 최소 레이더 반사도 -26 dBZ는 $3.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-23}$ 의 최소 C_n^2 에 해당한다.

3.3 바람 벡터 검증

윈드프로파일러를 보정하는 목적이면서 보정이 성공적으로 수행되었는지 확인하는 방법은 윈드프로파일러로 측정하고 산출한 바람 벡터를 라디오존데 자료와 비교하는 것이다. 레이더 측정값은 1시간 평균이고, 라디오존데의 측정값이 각 고도에서 순간 측정값임에도 두 관측 자료가 일치하여 윈드프로파일러 보정이 성공적으로 수행되었음을 확인할 수 있다(그림 5). 2 km 이상 고도에서 제조사 프로파일은 라디오존데 및 본 논문의 측정과 크게 다르다. 이 고도에 나타나는 강한 서풍의 동서 성분 벡터가 제조사 소프트웨어에서 정확하게 처리되지 않았기 때문이다. 이 결함은 자료 처리 구성을 조정하여 수정되어야 한다.

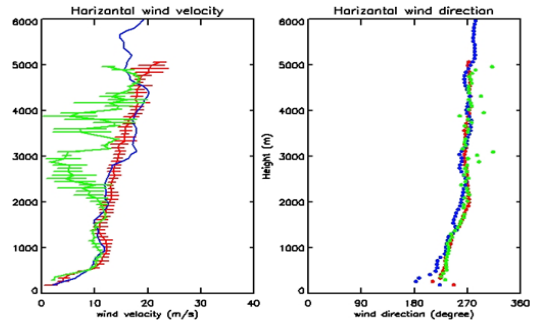


그림 5. 라디오존데(파란색 선)와 Degréane 소프트웨어(녹색 선) 및 레이더 상수를 보정(빨간색 선)하여 산출한 풍속(왼쪽)과 풍향(오른쪽)의 연직 분포.

Fig. 5 Vertical profiles of the wind speed (left) and the wind direction (right) obtained by radiosonde (blue line) and by measurements of wind profiler, processed by the Degréane software (green) and by the ABLE method (red).

IV. 결론

윈드프로파일러의 보정은 정기적으로 또는 자료 수집 조건이 변경되면 수행해야 한다. 윈드프로파일러와 지상의 강우계로 측정된 강우 강도를 비교하여 서로 일치하도록 작용하는 레이더 상수를 결정하여 각 장비와 설치 지점의 특성에 적합하게 윈드프로파일러가 보정되었다. 보정 원리는 보조 계측기로서 지상의 레인 게이지만 필요하므로 비전문가도 구현하기가 비교적 간단하다. 본 논문에는 시간별 누적 강우량이 사용되었다. 레이더의 해상도에 근접한 더 나은 시간적 해상도의 지상 강우 자료가 있다면 더 정확하고 수월한 윈드프로파일러 보정을 수행할 수 있다. 향후 다른 지점의 윈드프로파일러에 대해서도 보정 작업을 수행하고자 한다. 보정된 윈드프로파일러의 자료를 수치모델 자료동화 등에 활용한다면 초단기 예보 정확도 개선에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 방위사업청 및 기상청(과제번호: 17-CM-SS-23, KMA2017-04210)의 지원을 받아 수행되었습니다.

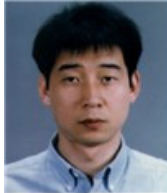
References

- [1] R. Doviak and D. Zrníc, Doppler radar and weather observations. Cambridge, Massachusetts, United States: Academic Press Inc, 2nd edition, 1993, pp. 562.
- [2] E. Gossard and R. Strauch, *Radar observation of clear air and clouds*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1983, pp. 280.
- [3] D. Atlas, R. Srivastava, and R. Sekon, "Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence," *Review of Geophysics and Space Physics*, vol. 11, no. 1, 1973, pp. 1-35.
- [4] J. Marshall and W. Palmer, "The distribution of raindrops with size," *J. Meteor.*, vol. 5, no. 4, 1948, pp. 165-166.
- [5] G. Foote and P. du Toit, "The terminal velocity of raindrops aloft," *J. Appl. Meteor.*, vol. 8, no. 5, 1969, pp. 249-253.
- [6] R. Gunn, and G. Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air," *J. Meteor.*, vol. 6, no. 4, 1949, pp. 243-248.
- [7] B. Campistron, B. Benech, J. Dessens, S. Jacoby-Koaly, E. Dupont, and B. Carissimo, "Performance evaluation of a UHF boundary layer radar in raining conditions based on disdrometer measurements," *8th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar*, Bangalore, India, 1997, pp. 334-337.
- [8] W. Jo, B. Kwon, and H. Yoon, "Partitioning Bimodal Spectrum Peak in Raw Data of UHF Wind Profiler," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 1, 2019, pp. 61-68.
- [9] W. Jo, B. Kwon, and H. Yoon, "Retrieval of Radial Velocity and Moment Based on the Power Spectrum Density of Scattered 1290 MHz Signals with Altitude," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1191-1198.
- [10] W. Jo, B. Kwon, and H. Yoon, "Clutter Fence Effect on Data Quality of Ultra High Frequency Radar," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 2, 2019, pp. 275-282.
- [11] M. Kim and B. Kwon, "Attenuation Correction of X-Band Radar Reflectivity Using Adjacent Multiple Microwave Links," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 13, 2020, pp. 2133.
- [12] J. Davis, "Consideration of atmospheric turbulence in laser systems design," *Appl. Opt.*, vol. 5, no. 1, 1966, pp. 139.

저자 소개

이경훈(Kyung Hun Lee)

2018년 부경대학교 환경대기과학 전공(이학석사)
2020년~현재 부경대학교 일반대학원 환경대기과학 전공 박사과정
※ 관심분야 : 대기과학, 원격탐사

권병혁(Byung Hyuk Kwon)

1994년 Joseph Fourier 대학교 지구유체역학 전공(이학석사)
1997년 Paul Sabatier 대학교 대기과학 전공(이학박사)
2000년~2001년 Alagoas 대학교 교수
2002년~현재 부경대학교 환경대기과학과 교수
※ 관심분야 : 대기과학, 원격탐사

윤홍주(Hong-Joo Yoon)

1983년 부경대학교 해양공학과 졸업(공학사)
1985년 부경대학교 대학원 해양학과 졸업(공학석사)
1997년 프랑스 그르노블 I 대학교 대학원 위성원격탐사전공 졸업(공학박사)
1999년~2002년 여수대학교 해양공학과 교수
2002년~현재 부경대학교 공간정보시스템공학 교수
※ 관심분야 : 해양 원격탐사, GIS

