

1290 MHz 산란 신호의 고도별 파워 스펙트럼 밀도에 기반한 시선 속도와 모멘트 산출

조원기* · 권병혁** · 윤홍주***

Retrieval of Radial Velocity and Moment Based on the Power Spectrum Density of
Scattered 1290 MHz Signals with Altitude

Won-Gi Jo* · Byung-Hyuk Kwon** · Hong-Joo Yoon***

요 약

윈드프로파일러 레이더는 고정점에서 대기물리 신호와 바람 벡터의 연직 프로파일을 제공한다. 바람 벡터는 제조사의 자료 처리 프로그램으로 산출되기 때문에 품질 관리에 한계가 있다. 따라서 바람 벡터의 품질을 향상시키기 위해서 원시 스펙트럼 자료의 이해와 활용이 이루어져야 한다. 바람 벡터의 원시 자료는 바이너리 형태로 저장되는 파워 스펙트럼 밀도이다. 본 연구에서는 원시 자료를 실수형 스펙트럼 밀도로 변환하는 알고리즘을 완성하고 스펙트럼 기반 0차와 1차 모멘트를 구현하여 원시 자료의 활용을 평가하였다.

ABSTRACT

The wind profiler radar provides a standing profile of the wind vector and the atmospheric physical signal for the fixed point. Since the wind vector is calculated by the manufacturer's data processing program, the quality control of the data is limited. Therefore, understanding and exploiting the raw spectrum data need to improve the quality of the wind vector. The raw data of the wind vector is the power spectral density stored in binary form. In this study, an algorithm was completed to transform the raw data into the real spectral density, and the use of raw data was evaluated by retrieving zero-order and first-order moments of the spectral based on the spectrum quality control.

키워드

Power Spectrum Density, Raw Data, Wind Profiler Radar, Wind Vector
파워 스펙트럼 밀도, 원시 파일, 윈드 프로파일러 레이더, 바람 벡터

1. 서 론

윈드프로파일러 레이더(Wind Profiler Radar, WPR)는 대기경계층뿐 만 아니라 그 이상의 고도에서 수평 풍속, 풍향, 수직 풍속 및 난류에 대한 연속적이

고 실시간의 수직 프로파일을 안정적으로 제공한다 [1]. 자료 산출은 공기 중의 비균질성에서의 전자기 펄스의 후방 산란 된 신호에 대한 도플러 스펙트럼 분석에 기초한다. 특히 바람 벡터는 빔 스윙 방식을 사용하여 유도된다. 대한민국 기상청은 상층의 바람

* 부경대학교 지구환경시스템과학부(brilliantwg@gmail.com)

** 교신저자 : 부경대학교 환경대기과학과

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

• 접수일 : 2018. 11. 09

• 수정완료일 : 2018. 11. 27

• 게재확정일 : 2018. 12. 15

• Received : Nov. 09, 2018, Revised : Nov. 27, 2018, Accepted : Dec. 15, 2018

• Corresponding Author : Byung-Hyuk Kwon

Dept. of environmental atmospheric sciences, Pukyong National University,

Email : bhkwon@pknu.ac.kr

벡터를 관측하기 위해 한반도 전역에 걸쳐 WPR를 운용하고 있다. WPR은 상층 대기의 움직임을 지속적으로 관측하고, 수치예보의 정확도를 높이고 위험기상을 분석하기 위한 기초 자료로 사용된다[2-4].

WPR의 활용 가치를 높이기 위하여 Kim et al.은 WPR과 기상 레이더로 한반도 내 조밀한 공간 해상도의 관측망을 형성하였고[5], WPR 자료는 기본적으로 제조사에서 제공하는 소프트웨어로 산출되기 때문에 설치 장소의 특이 사항이나 국지 기상의 특성을 고려하는데 한계가 있다. WPR 자료의 품질 관리와 정확도 향상을 위한 비교 자료가 라디오존데로 측정된 상층 바람 벡터이기는 하지만[6], 이 비교 검증 방법은 관측 비용과 시간 해상도를 고려하면 비효율적인 방법이다.

Jo et al.은 제조사의 GUI(Graphical User Interface) 소프트웨어에서 처리되기 전 단계의 원시 자료에서 바람 벡터의 오차 원인을 조사하여 자료의 품질을 개선하는 자료 처리 프로그램의 운용 방법을 개선하였다[7]. WPR에서 산출되는 바람의 원시 자료는 I/Q 신호에서 간섭 적분된 고도별 파워 스펙트럼이다. PSD가 저장된 원시 자료는 제조사와 장비의 사양에 따라 다양한 양식으로 저장되어 있어서 파일 구조를 이해하고 저장된 자료를 처리할 수 있는 적합한 프로그램 개발이 필요하다.

최근 강릉 기상청과 제주도 태풍센터에서 운용되고 시작한 LAP3000 윈드프로파일러의 원활한 자료 처리를 위하여 1장에서는 WPR와 원시 파일의 활용을 다루었다. 2장에서 Scintec사 LAP3000의 원시 스펙트럼 자료의 구조를 파악하고 바이너리로 인코딩된 원시 스펙트럼 자료를 실수로 변환하였고, 3장에서는 PSD의 정확도를 평가하기 위하여 시선속도와 스펙트럼 모멘트를 산출하고 제조사의 자료 처리 소프트웨어 SRUN의 결과와 비교하였다. 향후 WPR의 관측 오류를 줄이고 활용도를 높이기 위하여 원시 파일의 품질 개선 기법의 개발이 필요하다.

II. 자료와 방법

2.1 LAP3000

Scintec사의 1290 MHz WPR인 LAP3000은 연속적

인 풍속, 풍향의 연직 분포와 연직 속도와 대기경계층의 난류의 분포를 실시간으로 제공한다. 자체 개발한 새로운 Digital IF Processor로 바람 프로파일러 신호 처리에서 이전에는 볼 수 없던 특성을 제공한다. 개선된 간섭잡음제거(Advanced Coherent Noise Suppression, ACNS), 수직 신호 오버 샘플링, 16 칩 바이너리 펄스 코딩, Gaussian 매칭 필터 및 자유롭게 프로그래밍 할 수 있는 고도 게이트를 결합한다. 수직 범위 해상도는 50 m보다 미세한 값으로 설정할 수 있다. ACNS는 특이 무선 주파수 간섭을 제거하고, 수신 자료의 품질을 향상시켜서 측정 고도 범위가 확장되며 시스템 출력을 사용자의 특정 요구에 맞게 조정할 수 있다. LAP3000의 패치 배열 안테나에는 움직이는 부분이 없으므로 장기적인 안정성을 보장하고 안전 위험을 피할 수 있다. 송신 신호는 연직 방향과 지구 좌표계의 남북 및 동서에 대해 u와 v의 기상학적 정의와 일치하게 설정할 수 있으며, 각 범 사이를 빠르게 전환하면 복잡한 지형에서도 관측 정확도가 향상될 수 있다. 안테나 보온 시스템은 시원한 조건에서 장비의 성능을 향상시키는 데 도움이 된다. 극초단파(Ultra High Frequency, UHF)를 사용하기 때문에 최저 100 m에서 최고 4,000 m까지 연직 범위에서 최소 40 m 고도 간격으로 대기를 스캔하고, 시간과 고도에 대하여 고해상도의 상층 대기 자료를 제공한다(Table. 1).

표 1. LAP3000의 장비 사양
Table 1. Basic specifications for LAP3000

Parameters	Specification	Unit
Frequency	1,290	MHz
Antenna gain	28.2	dBi
Beam number	5	
Pulse width	250~3,000	ns
Lowest sampled height	100	m
Highest sampled height	4,000	m
Range resolution	40~1,000	m
Wind speed accuracy	< 1	m/s
Wind direction accuracy	< 10	degree

WPR 관측 자료는 자료 처리 프로그램 SRun을 통하여 확인할 수 있다. SRun은 장비와 컴퓨터를 네트워크로 연결하여 관측 자료를 실시간으로 감시할 수 있다. 장비와 컴퓨터가 네트워크 연결이 되어 있지 않더라도 사용자의 설정에 따라 신호를 처리할 수 있고, 관측 자료를 문자와 이미지를 표출하고 저장할 수 있어 분석에 매우 용이하다. 이 소프트웨어의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 소프트웨어 SRun 사양
Table 2. Software SRun specifications

Description	Specification
Data output	Horizontal wind speed and direction, wind components u, v and w, standard deviations of wind, backscatter, spectra, moments, time series of I/Q samples, quality levels
Real-time monitoring	Real-time monitoring variables
Automatic self-test	Automatic hardware test under controlled conditions
Control and configuration	Graphical user interface
Displays in real-time	Wind barb and vector plots, time vs. height color plots, profile plots, time series plots, spectra plots and tabular displays
Data export in real-time	Network output via FTP, TCP, UDP or shared folder
Reprocess capability	Reprocess of time series, spectra, moments or main data
Automation capability	Command-line interfaces for automated measurement control, change of configuration and data reprocess

2.2 파일의 구조

Scintec사의 원시 스펙트럼 자료는 하나의 파일에 하루 동안 측정된 자료가 저장된다. 원시 파일은 저층

관측 방식(Low mode)과 고층 관측 방식(High mode)으로 구분되어 생성된다. 각 방식의 스캐닝 주기는 10분이며, 한 번의 스캐닝에서 4개의 경사빔 자료와 2개의 연직빔 자료를 생성한다. 매일 00시 00분 50초에 관측을 시작하게 설정 되었다. 빔별 관측은 동쪽 저층, 동쪽 고층, 북쪽 저층, 북쪽 고층, 연직 저층, 연직 고층, 남쪽 저층, 남쪽 고층, 서쪽 저층, 서쪽 고층, 연직 저층, 연직 고층의 순서로 이루어진다. 각 빔의 관측 시간은 50초로 일주 관측 주기는 600초이다. 파일 내용은 각각의 변수를 설명하는 헤더와 표준 변수, PSD, 상세 변수로 구성된다(Table. 3).

표 3. 원시 파일에 저장된 변수
Table 3. Variables in raw file

Variables	
	Observation time
	Beam direction
	Height above ground level
	Height above sea level
Standard variables	Number of height levels
	First height level
	Height level spacing
	Number of spectral points
	Begin index of spectra
	Frequency resolution of spectrum
	Velocity resolution of spectrum
BASE64 format	Power Spectrum
	DC power
	Intermittency indicator
	Interpolated points around DC
	Number of coherent integrations
	Number of incoherent integrations
	Number of FFT points
Detailed variables	Period between two pulses
	Pulse length
	Number of pulse coding bits
	Radio frequency
	Power calib TX
	Power calib RX
	Antenna Tilt Angle
	Antenna Azimuth Angle
	Technical error flags

표준 변수는 관측 시간, 관측 고도 수, 스펙트럼 지표 수 등 관측 정보를 알 수 있는 11개의 변수로 구성된다. PSD는 ASCII 문자열 포맷(BASE64)의 하나인 바이너리 코드 형태이고, 고도 수와 스펙트럼 지표 수 곱의 개수 수만큼 저장되어 있다. 상세 변수는 범기울기, 방위각 등 15개의 변수로 구성된다(Table. 3).

2.3 디코딩 및 실수 변환

PSD는 BASE64 바이너리 코드로 저장되어 파일의 용량을 약 40% 줄이는 효과가 있다. 파워 스펙트럼 밀도의 문자열을 BASE64 포맷으로 디코딩(Decoding)하고, 리틀-엔디안(Little-endian)을 적용하여(Fig. 1) IEEE754 기법으로 실수로 변환시킨다. IEEE 754 플로팅은 일반적으로 사용되는 방법으로 4개의 1바이트를 1개의 실수로 변환한다(Fig. 2).

ASCII 코드 변환표에 따라 나열된 문자열에서 각 문자들을 2진수로 디코딩하고, 나열된 순서대로 4바이트를 묶어서 한 세트로 구분한다. 리틀-엔디안으로 한 세트를 재배열하고, IEEE 754 기법으로 실수로 변환한다.

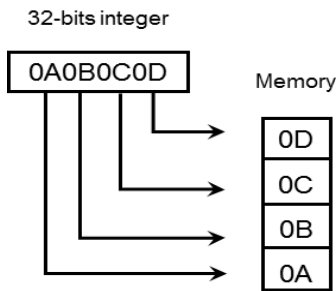


그림 1. 리틀-엔디안 구조
Fig. 1 Structure of Little-endian

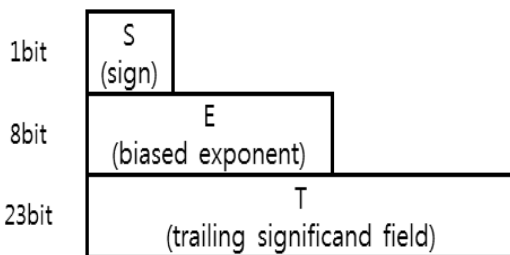


그림 2. IEEE 754 실수 변환 포맷
Fig. 2 IEEE 754 floating-point format

2.4 스펙트럼

모멘트는 어떤 종류의 물리적인 효과가 하나의 물리량만 아니라 그 물리량의 분포 상태에 따라서 결정될 때 정의되는 함수의 형태를 가진 정량적인 값을 의미한다. 스펙트럼 모멘트는 함수의 형태가 파워 스펙트럼 밀도의 확률 분포이며, 과장 및 주파수 영역의 난류 에너지와 역학적인 특징을 보여준다. 임의의 고도에서 산출된 주파수에 대한 파워 스펙트럼 분포를 보여주는 Fig. 3에서 파워 스펙트럼 밀도의 잡음 레벨 이상에서 최대 강도로 나타나는 첨두(Peak) P_p 주변의 면적에 해당하는 수신 전력 P_r (0차 모멘트)과 첨두 신호에 대응하는 시선 속도(1차 모멘트)로 표현된다[8]. 시선 속도(Radial velocity)란 물체가 운동할 때 극좌표, 원통좌표 또는 구면좌표의 중심에서 시선 또는 방사 방향으로 측정된 물체의 속도를 의미한다. 도플러 레이더와 관련해서는 도플러 속도라고도 하며, 도플러 레이더의 시선 방향에서 접근하거나 후퇴하는 목표물의 운동을 나타내는 속도를 말한다. 물체의 운동 방향이 시선 방향과 90°일 때는 물체가 운동하더라도 시선 속도는 0 m/s로 관측된다[9].

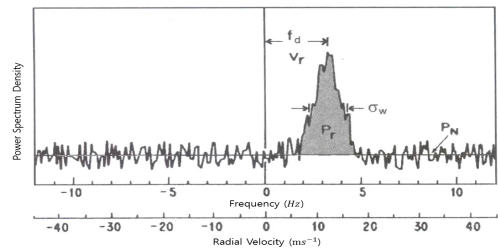


그림 3. 스펙트럼 모멘트(P_r : 수신 전력, V_r, f_d : 시선 속도, σ_w : 스펙트럼 폭, P_N : 잡음 전력)
Fig. 3 Spectral moments (P_r : Received power, V_r : Radial velocity, σ_w : Spectral width, P_N : Noise power)

$$P_r = \int P_p dv \tag{1}$$

$$V_r = \int v P_p dv / P_r \tag{2}$$

수신 전력 P_r 은 P_p 의 첨두에 대해 적분하여 산출한다. 시선 속도 V_r 은 각 구간의 P_p 에 시선 속도 v 의 가중치를 부여한 후, 적분하고 수신 전력 P_r 로 나눈 크기이다. 여기서, 가중치 v 는 주파수와 시선 속도

해상도의 곱이다. 수신 전력과 시선 속도를 구하는 방법은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다[10].

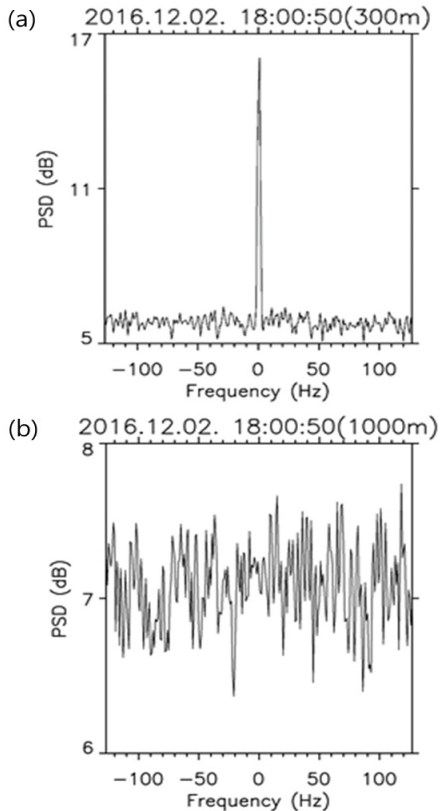


그림 4. (a) 고도 300 m와 (b) 고도 1,000 m에서 산출한 파워 스펙트럼 밀도 분포
Fig. 4 Power spectrum density distribution (a) at the altitude of 300 m and (b) 1,000 m

III. 결과

3.1 파워 스펙트럼 밀도

시선 속도와 0차 모멘트를 산출하기 위해서는 우선 각 고도에서 최대 첨두를 선택하고 그 주변의 4-5 주파수 영역에 해당하는 ± 1 m/s의 범위를 결정한다. 식 (1)과 그림 3에서 나타내는 것과 같이 시선 속도를 중심으로 잡음 레벨과 PSD로 이루어지는 면적이 1차 모멘트고, 최대 첨두까지의 크기가 시선 속도가 된다. 각 고도에서 최대 첨두의 PSD로 표준화하여 나타내면 그림 5와 같다. 2016년 12월 2일 1800 LST에

LAP3000으로 관측한 자료에 따르면 하층에서는 시선 속도가 연속성 있게 산출되어 600 m까지 0 m/s 주변에서 첨두(+)가 결정되었다. 고도 600 m에서 1,100 m까지는 비기상 에코의 영향으로 시선 속도가 매우 크거나 연속 연속성이 결여된 첨두로 결정되었다. 이는 바람 벡터 산출에 사용할 수 없는 스펙트럼 자료이기 때문에 오차 수정이 필요하다. 비기상 에코에 의해 오염된 자료를 수정하는 여러 과정과 품질관리 방법 중에서 연속 자료의 연속성에 근거한 오차 수정 방법을 적용하였다. 기본적인 오차 수정 알고리즘이 제조사가 제공하는 소프트웨어에서 작동하지만 산란체가 없는 고도에서 보내오는 수신 신호가 약해서 발생하는 그림 5a와 같은 사례에서는 보정 효과가 미약하다. 따라서 본 연구의 목적인 원시 자료를 이해하고 처리할 수 있는 기술이 반드시 필요하다.

자료가 수신되는 가장 낮은 고도부터 상하층의 연속 충밀립을 비교하여 부호가 급격히 바뀌는 고도에서 선택된 첨두를 버리고, 두 번째 첨두를 선택하여 연속 충밀립을 비교하는 과정을 반복한다. 연속성 검사를 적용한 결과는 그림 5b와 같이 1,500 m까지 모든 고도에서 ± 50 m s⁻¹ 범위 내에서 시선 속도가 결정된다. 이는 겨울철 풍속의 경향을 벗어나지 않는다.

3.2 원시 자료 처리 결과 평가

원시 자료의 PSD의 활용 가능성을 확인하기 위하여 대기의 난류 에너지와 역학적인 특징을 나타내는 스펙트럼 모멘트와 시선 속도를 산출하고 제조사의 스펙트럼 모멘트 및 시선 속도와 각각 비교하였다. 그림 5 (b)와 같이 수정된 시선 속도를 제외한 원시 자료 기반 산출 모멘트와 시선 속도만 비교하였다. 각 고도에서 동일 고도에서 수신 전력과 시선 속도의 상관 계수는 모두 0.99로 일치하였다(그림 6). 제조사에서 제공하는 소프트웨어의 한정된 오류 자료 검출에 의존하지 않고 능동적으로 연구 목적에 맞는 자료의 품질 검사를 할 수 있는 기반을 마련하였다.

IV. 결론

자연 현상을 이해하기 위해 고가의 관측 장비 도입이 증가하고 있다. 대기의 역학적 연속 구조를 감시하

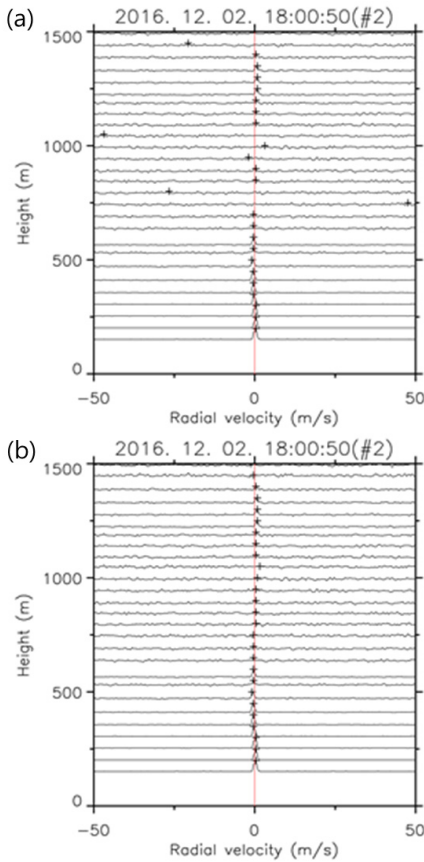


그림 5. 각 고도에서 표준화된 PSD의 첨두로 결정된 시선 속도(+). (a) 비기상 신호에 의해 오염된 PSD (b) 비기상 신호 제거된 PSD

Fig. 5 Radial velocity (+) as the peak from normalized PSD. (a) PSD contaminated by non meteorological signal and (b) PSD eliminated non meteorological signal

는 윈드프로파일러 레이더는 세 제조사의 외국 제품이 국내에서 운용되고 있다. 원시 자료를 이해하지 못하면 관측 자료의 품질 관리가 불가능하며, 제조사별로 서로 다른 구조의 자료를 유기적으로 활용할 수 없다. 본 연구에서는 Scintec사의 윈드프로파일러 레이더인 LAP3000의 원시 파일을 이해하고 스펙트럼 모멘트를 산출하여 원시 파일 내 파워 스펙트럼 밀도의 활용 가능성을 보였다. 제조사의 소프트웨어가 제공하는 바람 벡터로 품질을 개선하는 데는 한계가 있다. 바람의 원시 자료는 파워 스펙트럼 밀도이므로 파

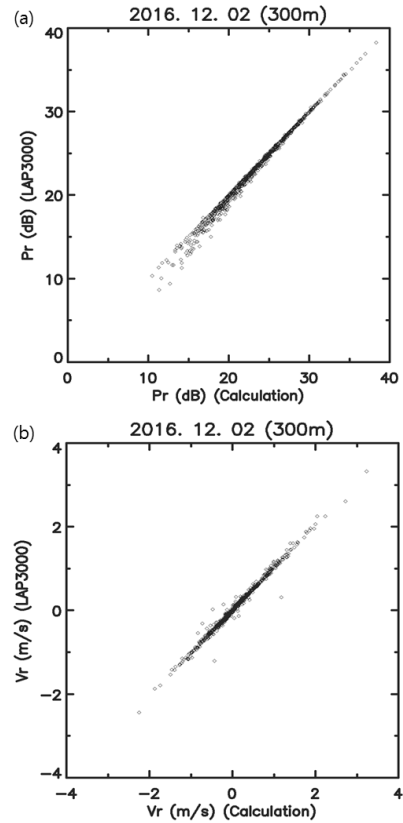


그림 6. LAP3000의 소프트웨어 SRun으로 산출한 스펙트럼 모멘트와 원시 자료로 산출한 스펙트럼 모멘트의 비교 (a) 수신 전력(0차 모멘트), (b) 시선 속도(1차 모멘트)

Fig. 6 Comparison spectral moments between from the software SRun of LAP3000 and from the raw data. (a) received power, (b) radial velocity

워 스펙트럼 밀도의 품질이 향상되면 시선 속도 및 바람 벡터의 품질을 향상시킬 수 있다. 일반적으로 산란계가 부족한 겨울철의 원시 스펙트럼 자료를 이용하여 0차 모멘트와 1차 모멘트를 정확하게 산출하였다, 또한 다중 에코가 나타나는 고도 영역에서 제품의 소프트웨어로 제어할 수 없는 시선 속도의 오차를 보정하였다. 윈드프로파일러 레이더의 원시 파일에 대한 연구와 활용 범위를 넓혀서 원시 자료로부터 2차 및 3차 모멘트의 산출을 할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연구」(KMIPA2018-06310) 및 BK21 플러스 사업 지구환경재해시스템사업단의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

[1] M. Maruri, J. A. Romo, and L. Gomez, "Aspects of quality control of wind profiler measurements," *Atoms. Meas. Tech.*, vol. 7, no. 1, 2014, pp.135-148.

[2] I. Holleman, H. van Gasteren, and W. Bouten, "Quality assessment of weather radar wind profiles during bird migration," *J. of Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 25, no. 12, 2008, pp.2188-2198.

[3] M. Ishihara, Y. Kato, T. Abo, and K. Kobayashi, "Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency," *J. of the Meteorological Society of Japan*, vol. 84, no. 6, 2006, pp.1085-1096.

[4] E. Robert, Jr. Barbré, "Quality control algorithms for the Kennedy Space Center 50-MHz Doppler radar wind profiler winds database," *J. of Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 29, no. 12, 2012, pp.1731-1743.

[5] P. Kim, K. Kim, B. Campistrom, H. Yoon, and B. Kwon, "UHF and S-band Radar Networks," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 2, 2018, pp.305-312.

[6] K. Kim, M. Kim, S. Seo, P. Kim, D. Kang, and B. Kwon, "Quality evaluation of wind vectors from UHF wind profiler using radiosonde measurements," *J. of Environmental Science Int.*, vol. 24, no. 1, 2015, pp.134-150.

[7] W. Jo, B. Kwon, P. Kim, M. Kim, and H. Yoon, "Quality Control of the UHF Wind Profiler Radar," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 2, 2018, pp.277-290.

[8] B. Heo, *Wind Profiler and Atmospheric Sounding*. Seoul: Hongrung publishing company, 2014.

[9] Korean Meteorological Society, and Korea

Meteorological Administration, *Glossary of Atmospheric Science*. Seoul: Sigmamapress, 2014.

[10] R. F. Woodman, "Spectral Moment Estimation in MST Radars," *Radio Sci.*, vol. 20, no. 6, 1985, pp.1185-1195.

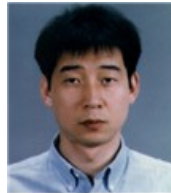
저자 소개

조원기(Won-Gi Jo)



2017년 부경대학교 환경대기과학과 졸업(이학사)
 2017년~현재 부경대학교 일반대학원 지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공 석사과정
 ※ 관심분야 : 대기과학, 미기상학

권병혁(Byung-Hyuk Kwon)



1986년 연세대학교 천문기상학과 졸업(이학사)
 1994년 Joseph Fourier 대학교 지구유체역학 전공(이학석사)
 1997년 Paul Sabatier 대학교 대기과학 전공(이학박사)

2001년~2002년 Alagoas 대학교 교수
 2002년~현재 부경대학교 환경대기과학과 교수
 ※ 관심분야 : 대기과학, 미기상학

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 여주대학교 해양공학과 교수
 2002년~현재 부경대 공간정보시스템공학과 교수
 2013년 (사)한국클라우드센터럴파크 이사
 2014년 한국전자통신학회 부회장
 2015년 공간정보 Big Data 센터장
 2015년 행정공간정보화연구소 소장
 2016년 (사)한국생태공학회 회장
 ※ 관심분야 : 해양 원격탐사, GIS

