

도플러 스펙트럼 대칭성을 이용한 바람 벡터 품질 관리

김민성* · 이경훈* · 권병혁** · 윤홍주***

Wind Vector Quality Control Using Symmetry of Doppler Spectral Peak

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

요약

1.29 GHz 윈드프로파일러 레이더는 청천의 바람 벡터 산출뿐만 아니라 강우 탐지에도 유용한 원격 관측 장비이다. 수평 바람 처리 과정에서 도플러 스펙트럼의 대칭성 검사는 필수 사항이다. 강우가 있을 때는 대칭성이 나타나지 않을 수 있기 때문에 연직속도의 크기에 따라 시선속도의 부호가 같아지는 것을 바람 산출 알고리즘에 반영하여야 한다. 2017년 여름철(6월, 7월) 창원 윈드프로파일러 자료로 브래그 산란과 레일리 산란에 의한 바람 벡터 산출 알고리즘을 개발하고, 대칭성을 고려하여 품질 관리된 윈드프로파일러 바람벡터를 6시간 간격의 라디오존데 자료와 비교하여 검증하였다.

ABSTRACT

The 1.29 GHz wind profiler radar is a remote observation device that is useful not only for calculating wind vectors in clear air, but also for detecting rainfall. The Doppler spectrum symmetry test is essential in the horizontal wind treatment process. Since asymmetry may be detected in rainfall cases, it is necessary to reflect in the wind calculation algorithm that the sign of the radial velocity is the same according to the magnitude of the vertical velocity. In the summer of 2017 (June, July), a wind vector calculation algorithm by Bragg scattering and Rayleigh scattering was developed using Changwon wind profiler data, and verified by comparing it with radiosonde data at 6 hour intervals.

키워드

Wind Profiler Radar, Doppler Spectrum, Scattering, Radial Velocity, Symmetry
윈드프로파일러 레이더, 산란, 도플러 스펙트럼, 시선 속도, 대칭성

1. 서론

도플러 레이더의 일종인 UHF (1.29 GHz) 윈드프로파일러는 바람 벡터 산출뿐만 아니라 대기경계층 연구와 구름 및 강수 특성 연구에도 활용된다. 강수 입자의 물리적 특성에 따른 윈드프로파일러 관측 결

과의 차이로부터 강수 형태의 연직 분포를 구분할 수 있다[1]. 강수 입자의 유무와 그 형태에 따라서 전자기 펄스파의 산란 특성이 달라지는데, 강수 입자가 없는 대기의 경우 Bragg 산란이 일어나며, 강수 입자는 Rayleigh 산란한다. 빗방울의 낙하 속도가 커지면서 빗방울의 공간 밀도가 줄어들고, 표면적이 감소하여

* 부경대학교 환경대기과학과(alstjd0451@nate.com)

* 부경대학교 환경대기과학과(lee_buzz@nate.com)

** 교신저자 : 부경대학교 환경대기과학과

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

• 접수일 : 2020. 08. 31

• 수정완료일 : 2020. 09. 22

• 게재확정일 : 2020. 10. 15

• Received : Aug. 31, 2020, Revised : Sep. 22, 2020, Accepted : Oct. 15, 2020

• Corresponding Author : Byung-Hyuk Kwon

Dept. of environmental atmospheric sciences, Pukyong National University,

Email : bhkwon@pknu.ac.kr

에코 파워가 약해진다. 강수 입자가 포함되지 않은 대기의 경우에는 대부분의 연직 바람은 $\pm 1 \text{ ms}^{-1}$ 를 초과하지 않으며, 난류 강도에 따라서 큰 에코 파워를 나타낸다. 강수 입자가 없는 맑은 대기의 경우에는 에코 파워와 낙하속도 사이에 상관성이 없으나, 눈의 경우에는 낙하속도와 에코 파워의 뚜렷한 상관관계가 존재하고, 비는 눈보다는 약한 상관관계가 나타난다 [1-2].

윈드프로파일러는 중규모 대류 시스템의 연직 운동을 직접 관측할 수 있을 뿐 아니라, 연직 방향의 시·공간 해상도가 높아서 강수 유형의 분류나 중규모 대류 시스템의 연직구조 분석에 활용된다[3-7]. 그러나 청천 또는 강수 에코가 동시에 존재하면 매우 약한 강우 에코도 청천 에코를 가릴 수 있어서 청천 난류를 인식하기 어렵다.

일반적으로 윈드프로파일러의 서로 반대 방향의 경사빔에서 산출되는 시선속도의 부호는 반대이다. 그러나 강우로 인해 도플러 속도의 연직 성분이 커지면 경사빔의 수평 시선속도에 영향을 미쳐서 이 대칭성이 유지되지 않을 수 있다. 본 연구에서는 강우 신호가 바람 벡터 오류를 유발하는 원인을 분석하고, 정확한 풍속과 풍향을 산출하는 방법을 제시한다. 또한, 강우가 빈번한 여름철 관측 자료를 중심으로 라디오존데 관측 결과와 비교 검증한다.

II. 연구 방법

2.1 자료 처리

연속 자료 수집은 반복적인 연직빔과 4개의 경사빔 관측으로 이루어지는 주기를 기반으로 한다. 한 주기에서 각 안테나는 연속적으로 동작하고, '저층 모드'와 '고층 모드'가 반복된다. 시선 방향의 분해능을 낮추면 펄스의 길이를 증가시킬 수 있어서 레이더의 감도를 증가시킬 수 있다. 실제로 윈드프로파일러는 펄스 반복 주파수를 조정하여 기존의 스캐닝 레이더와 비교하면 감도가 상당히 향상될 수 있다.

이산 푸리에 변환은 Hanning 윈도우를 적용하여 128개 주파수에 적용되었다. 탐지성을 높이기 위해 35개의 연속 스펙트럼을 실시간으로 평균했다. 저층 모드에서 펄스 길이는 750 m이며, 71개의 측정 게이트

는 레이더로부터 66 m 고도에서 시작하여 71.67 m 간격이다. 펄스 반복 주파수는 20 kHz이며, 최대 관측 거리는 약 5.1 km이다.

실시간으로 강우가 탐지될 때, 부차적인 에코를 최소화하여 최대 관측 거리를 확보하기 위해 펄스 반복 주파수는 감소된다. 비가 오는 동안 수신기의 포화를 피하기 위해 10 dB의 감쇠가 자동으로 삽입된다. 코히어런트 적분의 수를 조정함으로써, 도플러 주파수 범위는 신호의 속도, 즉 최고의 속도 분해능을 가장 잘 맞추기 위해 가변적이다. 다섯 빔의 관측 주기는 약 5분이다. 연속성 검사는 15분의 시간 분해능에 해당하는 3회 연속 주기에 걸쳐 중앙값 선택으로 수행된다. 다양한 시선 방향으로 이루어진 측정의 조합은 수평 균질성을 가정하여 각 사이클에서 3개의 바람 성분에 대한 연직 프로파일을 산출할 수 있다. 기상 조건에 따라 최대 감지 고도는 가변적이다.

바람 정보는 도플러 스펙트럼에서 산출된다. 먼저, 각 스펙트럼에서 평균 노이즈 레벨을 결정한다. 노이즈 임계값에서 나오는 특정 최소 인접 스펙트럼 선으로 정의된 3 - 5개의 가장 강력한 개별 피크를 검색한다. 각 피크에 대해 평균 도플러 속도(시선속도)에서의 에코 파워(반사도)와 표준 편차(스펙트럼 폭의 1/2)에 해당하는 분포의 처음 세 모멘트를 산출한다. 선택적으로, 비대칭 계수인 3차 모멘트를 추가하기도 한다[8].

선택된 피크에서, 기상 피크는 가장 강하지 않을 수 있고, 나타나지 않을 수도 있다. 비기상 피크는 시선속도 제로 라인 중심에 나타나는 지형 에코, 무선 간섭, 레이더에 의해 생성된 2차 신호, 비행기, 식물 파편, 곤충과 같은 미확인 비행 물체의 에코에서 발생할 수도 있다. 또한, 두 개의 기상 피크가 동시에 존재할 수 있다. 하나는 공기의 굴절을 변동 때문이고, 다른 하나는 UHF 레이더가 수증기에 매우 민감하기 때문이다. 여러 개의 에코가 합쳐져서 단일 피크가 나타날 수도 있다[9]. 특히, 하층에서 약한 시선속도가 시선속도 0 ms^{-1} 주변에서 지형 에코에 묻혀 나타날 수도 있다. 약한 이중 피크를 인식하고 분리할 수 있는 고성능 처리가 필요하다. 에코를 정렬하고 기상 피크가 있는 경우 이를 인식하는 것은 윈드프로파일러 신호 처리에서 가장 중요한 단계이다. 이 단계에는 많은 기준과 절차가 포함되며, 이 모든 절차를 일반적인

로 콘센서스(consensus)라고 한다.

이 연구에 사용된 데이터는 도플러 스펙트럼으로부터 재처리되었다. 지형 에코 외에도 비기상 에코는 자연적으로 산발적이며, 일반적으로 한 주기에서 다음 주기까지 지속하지 않는다. 비기상 피크를 제거하는 효율적이고 간단한 방법은 여러 연속 사이클의 정보를 결합하는 것이다. 시간 해상도를 떨어뜨리지만, 측정 품질의 향상이라는 이점이 있다. 비기상 에코의 제거 또는 적어도 최소화는 이전 5개의 연속 주파수에 대한 스펙트럼 파워의 중앙값을 취함으로써 수행된다. 먼저, 잡음과 각 스펙트럼의 평균 전력 레벨 및 표준 편차는 세그먼트 방법에 따라 계산된다. 평균 노이즈 표준 편차의 2.5배에 해당하는 파워 이상의 스펙트럼 파워는 물리적 신호로 간주한다. 이 스펙트럼에서 가장 강한 4개의 피크를 선택하여 4개의 모멘트를 산출한다. 800 m 미만의 게이트에서 시선속도 제로와 그 양쪽의 두 시선속도의 파워를 제거함으로써 지형의 영향을 최소화한다. 제거된 주파수의 파워는 인접한 주파수의 파워로 내삽하여 대체된다. 그런 다음 이중 피크의 존재를 검색하고 분리한다. 신호대잡음비, 스펙트럼 표준 편차 및 도플러 시선속도의 임계값을 기반으로 한 테스트를 수행하여 부적합 피크를 제거한다.

스펙트럼이 정리되면 시간과 고도를 따라 연속되는 기상 에코의 연속성 검사를 수행한다. 다섯 방향에서 측정된 시선속도를 사용하는데 특히, 연직속도는 연직 빔에 의한 직접 측정 또는 4개의 경사 빔에 의해 산출될 수 있다. 주변 지형 때문에 자료 오염이 예상되는 경우에는 시선속도와 경사빔 파워에 대한 연직빔 파워의 비인 중형비 그리고 스펙트럼의 비대칭도를 점검해야 한다. 지형 클러터로 판별되어 제거될 수 있는 범위는 시선속도의 절대값이 0.2 m/s 이하, 중형비 -3 dB 이하, 그리고 비대칭도의 절대값이 0.3 이하이다[10].

창원에서 수행된 윈드프로파일러 관측 기간은 2017년 6월부터 7월까지 2개월이다. 강우가 발생하면, 강한 반사도와 큰 음의 연직속도가 나타난다. 또한 수직이 탐지되어 비대칭 계수가 음의 방향으로 편향되는 것을 확인할 수 있다. 윈드프로파일러 관측으로 산출한 바람 벡터는 같은 지점에서 6시간 간격으로 비양한 라디오존데 관측 결과와 비교 검증된다.

2.2 시선속도의 대칭성

시선속도(V_r)는 실제 바람을 시선 방향축에 내린 정사영으로 정의되어 레이더 방향으로 양의 부호 그리고 방사빔의 진행 방향으로 음의 부호가 부여된다. 그림 2에서 경사빔의 시선속도(V_{rE} , V_{rW})를 구할 때, 바람 벡터(V)와 시선 방향의 사잇각 β 를 알 수 없기 때문에 수평 바람 벡터(V_h)와 연직속도(w)를 이용한다. 수평 바람 벡터는 식 (1)과 같이 바람의 동서 성분과 남북 성분으로 나타낼 수 있다(그림 2).

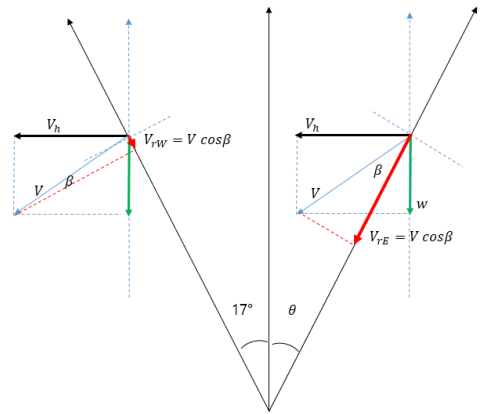


그림 1. 연직빔과 17° 기울어진 동쪽빔과 서쪽빔에 대한 바람 벡터와 시선속도.

Fig. 1 Wind vectors and radial velocity on the east and west oblique beams to the vertical beam by 17°.

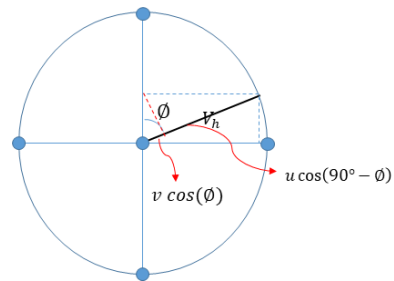


그림 2. u, v 그리고 방위각으로 나타내는 수평 바람 벡터.

Fig. 2 Horizontal wind vector in function of u, v and azimuth.

시선속도(V_r)는 식 (2)와 같이 연직속도를 경사빔에 내린 시선속도 성분과 수평 바람을 경사빔에 내린

시선속도 성분의 합으로 표현할 수 있다. 동, 서, 남, 북 방향의 방위각 ϕ 가 각각 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ 이므로 식 (2)는 5개 빔에 대한 시선속도로 식 (3) - 식 (7)과 같이 표현된다. 식 (3) - 식 (7)을 연립하여 동서성분의 바람 u 와 남북성분의 바람 v 를 산출한다.

$$V_h = u \cos(\phi) + v \sin(\phi) \quad (1)$$

$$V_r = w \cos(\theta) + V_h \sin(\theta) \quad (2)$$

$$= w \cos(\theta) + u \sin(\theta) \sin(\phi) + v \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$V_{rE} = w \cos(\theta) + u \sin(\theta) \quad (3)$$

$$V_{rW} = w \cos(\theta) - u \sin(\theta) \quad (4)$$

$$V_{rS} = w \cos(\theta) - v \sin(\theta) \quad (5)$$

$$V_{rN} = w \cos(\theta) + v \sin(\theta) \quad (6)$$

$$V_{rZ} = w \quad (7)$$

연직 풍속은 수평 풍속에 비해 매우 작기 때문에 마주 보는 경사빔의 시선속도는 반대 부호로 결정된다. 그러나 강한 대류나 강수가 발생하여 그림 2와 같이 연직속도가 크면 시선속도의 부호가 같아진다.

III. Results

3.1 시선속도 대칭성

일반적으로 청천에서 나타나는 시선속도의 대칭성은 7월 3일 15 LST의 사례인 그림 3에서 확인된다. 동쪽빔의 고도 2 km 주변의 첨두를 대칭성을 고려하여 보정하여 스펙트럼 첨두를 결정하면 그림 4와 같이 바람 벡터를 개선할 수 있다. 그림 4에서 파란색 선과 점은 각각 라디오존데로 관측된 풍속(왼쪽)과 풍향이다. 빨간색 선과 점은 각각 윈드프로파일러에서 산출된 풍속(왼쪽)과 풍향(오른쪽)이다. 윈드프로파일러 자료는 스펙트럼 처리 단계에서 비기상 클러스터를 제거한 후 산출한 결과이며 아래 그림은 대칭성을 고려하여 보정 한 후의 풍속과 풍향이다. 대칭성 보정 전의 풍속은 라디오존데와 일치하지 않는다. 풍향은 4 km 고도까지 대체로 일치하지만, 그 이상의 고도에서는 일치하지 않는다.

그림 3의 2 km 부근에서 동쪽빔과 서쪽빔의 시선속도가 같은 부호이고, 이는 산출 바람의 오류를 유발

한다. 대칭성 보정 후에 풍향은 모든 고도에서 일치하게 된다. 풍속은 4.5 km 이하의 고도에서 전체적으로 개선되었으며, 그 이상의 고도에서는 대기 신호가 약해서 풍속이 산출되지 않는다.

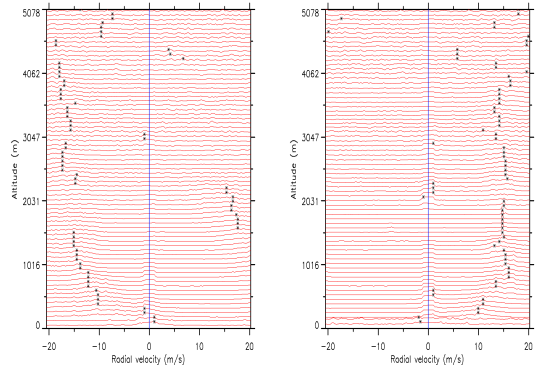


그림 3. 동쪽(좌)과 서쪽(우)의 경사빔에서 결정된 고도별 스펙트럼 첨두(*).

Fig. 3 Vertical profile of spectral peaks (*) from the east (left) and west (right) oblique beams.

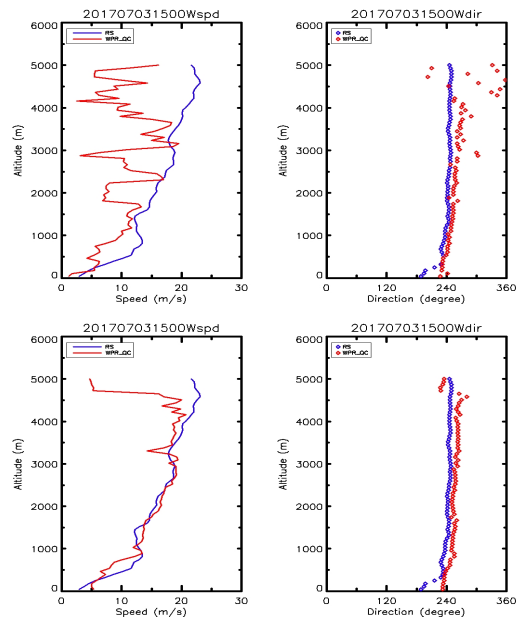


그림 4. 대칭성 보정 알고리즘 적용 전(위)과 후(아래)의 풍속과 풍향의 연직 분포.

Fig. 4 Wind speed and direction without (top) and with (bottom) a symmetry correction.

3.2 비대칭 침두

수평 풍속에 대한 연직 풍속의 비로 대칭성 적용을 판단할 수 있다. 그림 1에서 연직 풍속은 $V_h \tan 17^\circ$ 이므로 수평 풍속의 약 1/3보다 작으면 동쪽빔과 서쪽빔의 시선속도 부호는 다르다. 스펙트럼 단계의 자료 처리 과정에서는 수평 풍속과 연직속도를 알 수 없기 때문에 연직빔의 시선속도로 경계 조건을 설정한다. 빗방울의 낙하속도가 더해져서 연직속도가 커진다. 이슬비의 경우에도 약 1.5 ms^{-1} 의 연직 속도가 관측된다[11].

그림 5는 6월 29일 21 LST 1.4 mmh^{-1} 의 비가 내릴 때, 동쪽빔과 서쪽빔의 스펙트럼 침두 분포이다. 동쪽빔과 서쪽빔의 스펙트럼 침두는 모두 같은 부호이다. 고도 4 km 이상 고층에서는 대기 신호가 약해서 침두가 연속적으로 잡히지 않는 것으로 보인다.

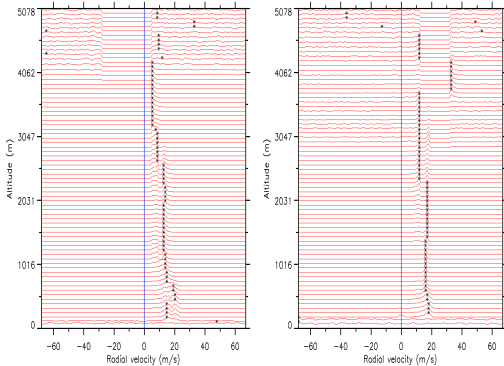


그림 5. 비가 내릴 때, 동쪽(좌)과 서쪽(우)의 경사빔에서 결정한 고도별 스펙트럼 침두(*).

Fig. 5 Vertical profile of spectral peaks (*) determined from the east (left) and west (right) oblique beams in a case of rainfall.

그림 6은 그림 5의 스펙트럼에서 침두 결정 후에 대칭성 보정 전·후의 바람이다. 강수 사례의 경우에 대칭성 보정 후에 오히려 매우 큰 바람 벡터를 산출한다. 비가 내리면 연직 방향의 시선속도가 커지므로 마주하는 경사빔의 시선속도 부호가 같게 된다. 따라서 시선속도가 대칭을 이루도록 보정 할 필요가 없다.

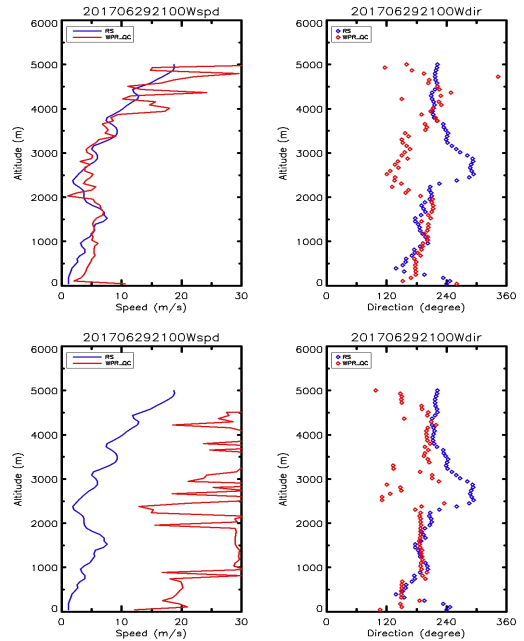


그림 6. 비가 내릴 때, 대칭성 보정 알고리즘 적용 전(위)과 후(아래)의 풍속과 풍향의 연직 분포.

Fig. 6 Vertical profile of wind speed and direction without (top) and with (bottom) a symmetry correction algorithm in a case of rainfall.

IV. 결론

창원 기상대에서 운용하는 UHF 윈드프로파일러 PCL1300의 스펙트럼 침두의 대칭성을 조사하였다. 2017년 여름철에 연직빔의 시선속도를 기반으로 청천 사례와 강수 사례를 선정하였다. 청천에서는 마주하는 경사빔의 시선속도가 대칭을 이루도록 보정하고, 강수 사례에서는 비대칭을 유지하도록 하는 알고리즘을 사용하여 더욱 정확한 바람 벡터를 산출하였다. 알고리즘의 성능은 라디오존데 결과와 비교하여 검증되었다. 현업에서 필요한 의사결정의 경계값 산출을 위해 더 많은 사례와 지점에 대한 추가 실험이 요구된다.

감사의 글

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

References

- [1] F. Ralph, P. Neiman, and D. Ruffieux, "Precipitation identification from Radar wind profiler spectral moment data: Vertical velocity histograms, velocity variance, and signal power-vertical velocity correlations", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 13, no. 3, 1996, pp. 545-559.
- [2] S. Baek, C. Cho, and H. Song, "Analyses of Precipitation Cases Using Wind Profiler," *Journal of Korean Meteorological Society*, vol. 41, no. 1, 2005, pp. 1-16.
- [3] K. Gage, C. Williams, and W. Ecklund, "UHF wind profilers: A new tool for diagnosing tropical convective cloud systems", *Bulletin of the American meteorological society*, vol. 75, no. 12, 1994, pp. 2289-2294.
- [4] K. Gage, C. Williams, and W. Ecklund, "Application of the 915 MHz profiler for diagnosing and classifying tropical convective cloud systems," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 59, no. 1, 1995, pp. 141-151.
- [5] W. Ecklund, K. Gage, and C. Williams, "Tropical precipitation studies using 915 MHz wind profilers," *Radio scienc*, vol. 30, no. 4, 1995, pp. 1055-1064.
- [6] K. Reddy, T. Kozu, Y. Ohno, K. Nakamura, A. Higuchi, K. Reddy, P. Srinivasulu, V. Anandan, A. Jain, P. Rao, R. Rao, G. Viswanthan, and D. Rao, "Planetary boundary layer and precipitation studies using Lower atmospheric wind profiler over Tropical India," *Radio scienc*, vol. 37, no. 4, 2002, pp. 1-30
- [7] D. Atlas and C. Williams, "The Anatomy of a continental tropical convective storm," *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 60, no. 1, 2003, pp. 3-15.
- [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] R. Gunn and G. Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air," *Journal of Meteorology*, vol. 6, 1949, pp. 243-248

저자 소개

김민성(Min-Seong Kim)

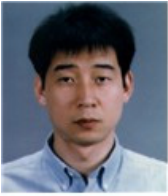


2019년 부경대학교 환경대기과학과 졸업(이학사)
 2019년~현재 부경대학교 지구환경 시스템과학부 환경대기과학
 ※ 관심분야 : 대기과학, 원격탐사

이경훈(Kyung-Hun Lee)



2016년 부경대학교 환경대기과학과 졸업(이학사)
 2016년~현재 부경대학교 지구환경 시스템과학부 환경대기과학
 ※ 관심분야 : 대기과학, 원격탐사



권병혁(Byung-Hyuk Kwon)

1994년 Joseph Fourier 대학교 지구
유체역학 전공(이학석사)

1997년 Paul Sabatier 대학교 대기과
학 전공(이학박사)

2001년~2002년 Alagoas 대학교 교수

2002년~현재 부경대학교 환경대기과학과 교수

※ 관심분야 : 대기과학, 원격탐사



윤홍주(Hong-Joo Yoon)

1983년 부경대학교 해양공학과 졸
업(공학사)

1985년 부경대학교 대학원 해양학
과 졸업(공학석사)

1997년 그르노블 I 대학교 위성원
격탐사(공학박사)

2002년~현재 부경대학교 공간정보시스템공학 교수

※ 관심분야 : 해양 원격탐사, GIS

