Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 26, No. 3 (2016) pp. 461-471
http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.3.461
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

WISE 펄스 도플러 윈드라이다 품질관리 알고리즘 개발

박문수* · 최민혁
한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단

(접수일: 2016년 7월 18일, 수정일: 2016년 8월 11일, 게재확정일: 2016년 8월 27일)

Development of a Quality Check Algorithm for the WISE Pulsed Doppler Wind Lidar

Moon-Soo Park* and Min-Hyeok Choi
Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

(Manuscript received 18 July 2016; revised 11 August 2016; accepted 27 August 2016)

Abstract A quality check algorithm for the Weather Information Service Engine pulsed Doppler wind lidar is developed from a view point of spatial and temporal consistencies of observed wind speed. Threshold values for quality check are determined by statistical analysis on the standard deviation of 3-component of wind speed obtained by a wind lidar, and the vertical gradient of horizontal wind speed obtained by a radiosonde system. The algorithm includes carrier-to-noise ratio (CNR) check, data availability check, and vertical gradient of horizontal wind speed check. That is, data sets whose CNR is less than –29 dB, data availability is less than 90%, or vertical gradient of horizontal wind speed is less than $-0.028\ s^{-1}$ or larger than $0.032\ s^{-1}$ are classified as 'doubtful', and flagged. The developed quality check algorithm is applied to data obtained at Bucheon station for the period from 1 to 30 September 2015. It is found that the number of 'doubtful' data shows maxima around 2000 m high, but the ratio of 'doubtful' to height-total data increases with increasing height due to atmospheric boundary height, cloud, or rainfall, etc. It is also found that the quality check by data availability is more effective than those by carrier to noise ratio or vertical gradient of horizontal wind speed to remove an erroneous noise data.

Key words: Carrier-to-noise ratio (CNR), data availability, pulsed Doppler wind lidar, quality check, vertical gradient of horizontal wind speed

1. 서 론

기상변수의 연직 프로파일은 기상모델의 예측 성능 개선과 고해상도 기상 과정을 이해하는데 매우 중요한 역할을 한다. 기상모델의 예측 오차를 최소화하기 위한 방법 중 바람, 기온, 습도의 연직 프로파일의 자료동화가 가장 효과적이라는 연구가 있다(Simmons and Hollingsworth, 2002). 이는 기상변수의 시간 예측을 위해서는 난류 성분들의 연직 경도가 필요하며, 대부분의 중규모 기상모델에서 어느 고도에서의 난류 성분은 기상변수들의 연직 경도에 의해 결정되는 난류 종결 과정으로 계산되는 것과 관련된다(Stull, 1988; Pielke, 2002).

바람의 연직 구조를 관측하는 장비로는 존데를 풍선에 매달아 존데의 위치 정보로부터 바람 정보를 수신 받는 존데 시스템과 지상으로부터 다양한 파장대의 파를 발사하여 되돌아 오는 에코 또는 도플러 편이를 이용하여 바람의 연직 구조를 측정하는 소다(SODAR, Sound Detection and Ranging), UHF (Ultra

*Corresponding Author: Moon-Soo Park, Weather Information Service Engine, 81 Oedae-ro, Mohyeon-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, Korea
Phone: +82-70-4617-3769, Fax: +82-31-321-6470
E-mail: ngeograph2@gmail.com

High Frequency) 레이더, VHF (Very High Frequency) 레이더 등의 원격탐사 장비가 있다(Strangeways, 2003). 존데 시스템은 직접 존데가 풍선과 함께 이동하며 풍선의 위치 추적을 통해 풍향, 풍속을 측정하기 때문에 10 km 이상의 높은 고도까지 매우 정확한 값을 제공할 수 있으나, 연속 관측이 어려워 일반적으로 하루에 2 또는 4회 가량 관측한다. 반면, 원격탐사장비는 장비의 성능과 관측 환경에 따라 관측 고도와 정확도가 결정되지만, 연속 관측이 가능하다는 장점이 있다.

존데 시스템 또는 원격탐사 장비로부터 관측된 바람의 연직 프로파일 자료는 다양한 규모의 기상장 모델에 자료동화 또는 검증에 활용되고 있다. 일반적으로 존데 관측은 시간 해상도와 관측 고도를 고려할 때 급격하게 변화하는 구조가 아닌 중규모 이상의 모델에 적합하며, 원격탐사 장비는 급격하게 변화하는 악기상 등의 분석에 활용하기에 적합한 측면이 있다(Son, 2005; Jeong et al., 2010; Lim et al., 2014; Hong, 2015).

바람의 연직 프로파일 자료 산출을 위한 도플러 라이다 기술은 1990년대부터 꾸준히 개발되어 관측에 적용되고 있다(Frehlich et al., 1994; Huffaker and Hardestry, 1996; Soreide et al., 1997). 초기에 개발된 도플러 라이다는 수 백 m 내외의 고도까지 관측 자료를 제시함에 따라 대기의 최하층 연구 또는 풍력발전 단지 선정이나 평가와 맞물려 급격하게 발전하게 되었다. 이후, 1990년대 후반의 광통신 발달에 따른 헤테로다인 감지 기술을 응용하여 관측 최대 고도를 대기경계층 고도 또는 그 이상의 고도까지 가능할 정도로 높아졌다. 또한, 스캔 기능을 추가하여 천정에서 고도각을 변경하며 또는 고도각을 고정시킨 상태에서 방위각을 변경시키며 관측하는 등 관측 영역과 방향을 다양화하고 있다(Grund et al., 2001).

차세대도시농림융합기상사업단(WISE, Weather Information Service Engine)에서는 도시에서 나타나는 돌발홍수, 노면 결빙과 같은 재해 기상에 의한 피해를 저감시킬 목적으로 수도권에 고해상도 기상자료 산출을 위한 수도권 도시기상관측망을 구축하고 있으며(Choi et al., 2013; Chae et al., 2014; Kwon et al., 2014; Park et al., 2016), 그 중 펄스 도플러 윈드라이다를 구축하고 있다.

윈드라이다의 경우 후방 산란되는 신호 강도에 따라 풍속의 정확도가 결정되기 때문에 에어러솔이나 먼지와 같은 반사체가 희박한 경우 정확도가 떨어질 수 있으며 그 경우 노이즈 같은 관측값을 제공하기도 한다. 이 경우 사용자들에게 고품질 자료를 제공하기 위해서는 노이즈가 제거된 품질관리가 수행되어야 한다(Paschke et al., 2015).

본 연구에서는 WISE에 설치된 레오스피어사의 windcube200의 관측 원리, 자료의 종류 및 특성과 더불어 품질관리 알고리즘을 제시하고자 한다. 품질관리를 위한 임계값은 2014년 11월 14일부터 16일 사이에 경기도 부천관측소에서 관측된 존데 관측 자료와 2015년 9월 1일부터 30일까지 같은 지점에서 10분마다 관측된 윈드라이다 자료를 통계적으로 분석하여 결정하고자 한다. 아울러 개발된 품질관리 알고리즘을 2015년 9월 자료에 적용하여 고도별 각 검사 단계별 품질관리 효과를 제시하고자 한다.

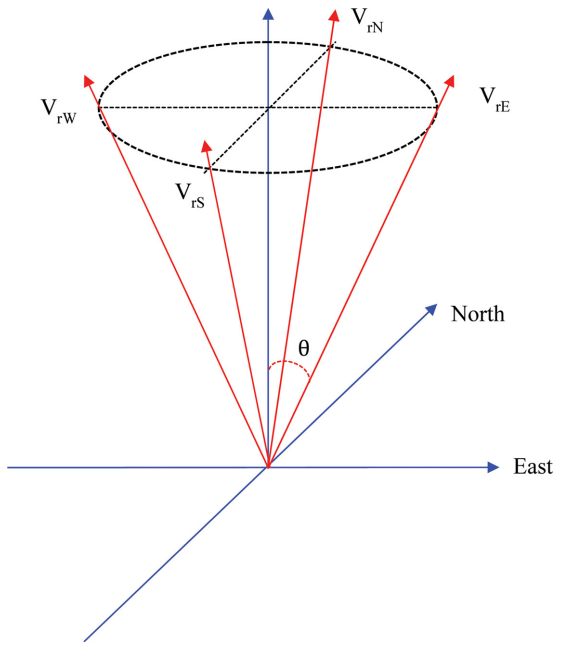

Fig. 1. Wind measurements of the WISE pulsed Doppler wind lidar.

2. WISE 윈드라이다

2.1 관측 원리

WISE 윈드라이다는 펄스 도플러 타입으로 프랑스 레오스피어사에서 제작된 모델명 windcube200이다. 지상에 설치된 윈드라이다에서는 각 고도별 천정에서 θ°(본 장비에서는 15° 내외) 기울어진 북, 동, 남, 서 네 방향의 시선 방향의 풍속 V_{rN}, V_{rE}, V_{rS}, V_{rW}를 각각 관측한다(Fig. 1). 각 고도별 동서 방향 풍속 u, 남북 방향 풍속 v, 연직 풍속 w을 식

$$u = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2\sin\theta}, \quad (1)$$

$$v = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2\sin\theta}, \quad (2)$$

$$w = \frac{V_{rN} + V_{rS} + V_{rE} + V_{rW}}{4\cos\theta} \quad (3)$$

에 의해 계산한다. 또한, 각 고도별 수평 풍속 V_h은

$$V_h = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

을 이용하여 계산하고, 풍향은 u와 v를 벡터적으로 해석하여 계산한다.

2.2 윈드라이다 성능

WISE 윈드라이다는 1.543 μm의 파장, 펄스 지속시간이 200 ns, 펄스 반복 주기가 20 kHz인 레이저를 사용하여, 관측은 100 m 고도부터 50 m 연직해상도로 6000 m 고도까지 관측 가능한 장비이다(Table 1). 장비 설정 반송파대 잡음비(Carrier-to-Noise Ratio, CNR)의 임계값은 –31 dB로 렌즈에 검은 종이를 덮었을 때의 값으로 정하였다.

WISE 윈드라이다는 풍속의 경우 100 m s^{-1}까지 0.5 m s^{-1}의 정확도로 측정 가능하며, 풍향의 정확도는 1.5°이다(Leosphere, 2012). 제조사에서는 한 달 동안

Table 1. Main specifications of the WISE pulsed Doppler wind lidar.

Variable	Value
Pulse duration	200 ns
Number of averaging spectra	90000
Carrier-to-Noise Ratio threshold	–31 dB
Sampling frequency	250 MHz
Wave length	1.54 μm
Vertical resolution	50 m
Minimum altitude	100 m
Maximum altitude	6000 m
Averaging time	10 min

200 m 고도에서 기준 장비와 납품 장비로 관측된 풍속과 풍향을 각각 비교하여 위의 정확도가 성립함을 증명한 바 있다. 그러나, 200 m보다 관측 여건이 나쁜 실제 대기의 더 높은 고도에서의 정확도는 제시된 값 보다 훨씬 낮은 경우가 많다. 왜냐하면 풍속의 정확도는 관측값의 표준편차가 비례하는 것으로 볼 수 있으며, 다시 후자는 CNR, 파장, 평균하는 자료의 수

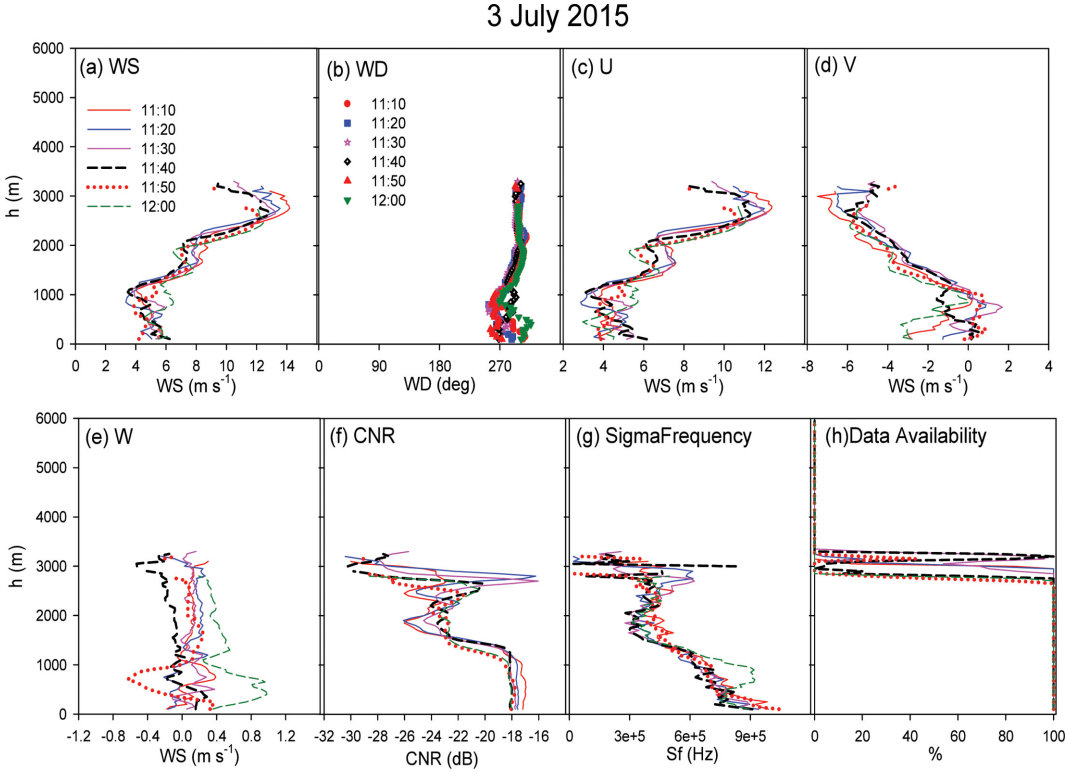

Fig. 2. Vertical profiles of (a) wind speed, (b) wind direction, (c) u-wind speed, (d) v-wind speed, (e) vertical wind speed, (f) carrier-to-noise ratio, (g) spectral broadening, and (h) data availability observed at the Bucheon site for the period from 1110 LST to 1200 LST on 3 July 2015 at every 10-min interval.

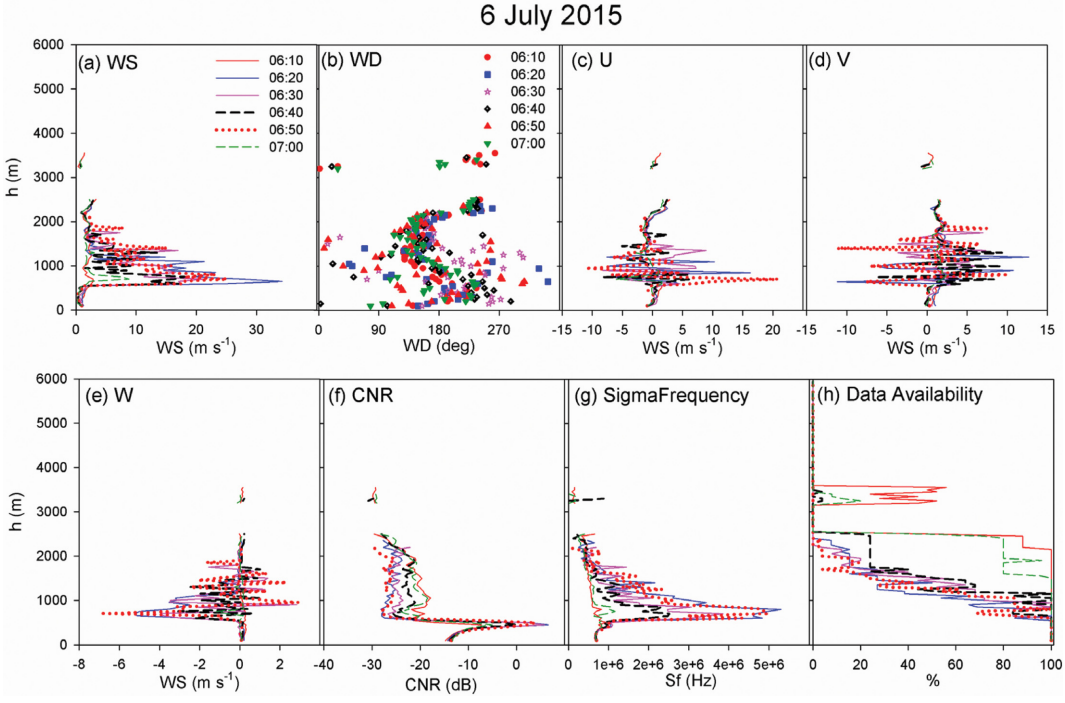

Fig. 3. The same as in Fig. 2 except for the period from 0610 LST to 0700 LST on 6 July 2015.

에 따라 결정되고(Lang and McKeogh, 2011), CNR은 고도가 높아질수록 급격하게 낮아지기 때문이다.

2.3 자료

WISE 윈드라이다에서는 약 24초 주기로 관측되는 실시간 자료와 10분 평균 자료의 두 종류 자료를 생산한다. 약 24초마다 각각 북, 동, 남, 서쪽 방향의 시선 방향 속도를 관측하고, 관측된 시선 방향 속도를 이용하여 동서 방향, 남북 방향, 연직 풍속을 Eqs. (1)-(3)과 같이 계산한다. 실시간 자료에는 각 고도별 CNR, 시선 방향의 풍속, 시선 방향 풍속의 표준 편차, 계산된 수평 풍속, 풍향, 동서방향 풍속, 남북 방향 풍속, 연직 풍속이 포함되어 있다. CNR이 임계값(–31 dB)보다 낮은 경우에는 오류로 처리하여 'NaN'으로 제공한다. 10분 평균 자료에는 각 고도별 수평 풍속, 수평 풍속의 표준 편차, 수평 풍속의 최댓값과 최솟값, 풍향, 동서 방향 풍속의 평균과 표준편차, 남북 방향 풍속의 평균과 표준편차, 연직 방향 풍속의 평균과 표준편차, CNR의 평균과 표준편차, CNR의 최댓값과 최솟값, 스펙트럼 확장의 평균과 표준편차, 그리고 자료 가용도를 포함한다.

Figure 2는 윈드라이다 관측 자료의 예로 2015년 7월 3일 1110 LST부터 1200 LST까지 10분 간격의 수평 풍속, 풍향, 동서방향 풍속, 남북방향 풍속, 연직 풍속, CNR, 스펙트럼 확장, 자료 가용도의 연직 프로파일을 나타낸 것이다. 1300 m 고도까지 CNR의 값은 –19 dB보다 큰 값을 보이다가 급격하게 –20 dB 이하로 떨어지며 2800 m 고도에서 갑자기 큰 값을 보였다(Fig. 2f). 자료 가용도는 지상 부근에는 100%를 유지하다가 2800~3000 m 고도에서 급격하게 감소하는 특징을 보인다(Fig. 2h). 동서방향, 남북방향 풍속은 거의 유사한 연직 프로파일을 보이고 있으며, 일부 구간을 제외하면 같은 고도값의 표준편차는 1.5 m s^{-1} 이하이다(Figs. 2c-d). 연직 풍속도 700 m 고도를 제외하면 0.5 m s^{-1} 이하의 표준편차를 보이며 거의 유사한 프로파일을 보이고 있다(Fig. 2e). 결과적으로 나타나는 수평 풍속도 각 고도에서 3000 m 이상 고도를 제외하면 표준편차가 1.2 m s^{-1} 이내로 거의 유사한 값을 보였다(Fig. 2a). 풍향은 하층을 제외한 나머지 고도에서 거의 유사한 값을 보였다(Fig. 2b).

Figure 3은 2015년 7월 6일 0610 LST부터 0700 LST까지 10분 간격으로 관측된 또 다른 자료의 예를 나타낸 것이다. 같은 시간대의 운고계 자료로부터 2500 m부터 3200 m 고도 사이에 구름이 있었으며, 400 m 고도에서 후방산란계수의 값이 크게 나타났음을 알 수 있다. CNR 값이 100 m 고도에서 약 –14 dB였으며, 고도가 상승하며 커져 400 m 고도에서 최댓값을 보이고 심지어 양의 값을 보이기도 한다(Fig. 3f). 이

론적으로 CNR은 양의 값을 가질 수 없기 때문에 이는 잘못된 자료로 판단할 수 있다. 스펙트럼 확장 역시 400 m 이상의 고도에서 매우 큰 값을 보이며(Fig. 3g), 자료 가용도도 급격하게 낮아지는 특성을 보인다(Fig. 3h). 동서방향과 남북방향 풍속 역시 450 m에서 1900 m 고도까지 시간에 따른 표준편차가 2 m s^{-1} 이상의 매우 큰 시간 변동을 보이고 있으며(Figs. 3c-d), 연직 풍속의 절댓값 역시 1 m s^{-1} 이상의 큰 값을 보이고 있다(Fig. 3e). 그에 따라 수평 풍속과 풍향도 매우 큰 시간 변동을 보여(Figs. 3a-b) 정상적인 값으로 보기 어렵다. 일반적으로 정상이 아니라고 할 수 있는 자료는 관측값이 물리 한계를 벗어나거나, 연직 방향으로 일관성이 작거나, 시간적인 일관성이 작은 경우를 의미한다(Chae et al., 2014).

3. 품질관리 알고리즘

3.1 알고리즘

품질관리의 수준은 자료의 종류와 활용 목적에 따라 다르게 결정될 수 있다. 만일 모델의 자료 동화에 활용하기 위해서는 잘못된 자료가 한 두 개가 있으면 바람장 산출에 매우 안 좋은 영향을 미칠 수 있기 때문에 최대한 많은 품질관리가 필요한 반면, 대기경계층의 특성 분석 등과 같이 연구에 활용하기 위해서는 고해상도 기상 특성을 제시해야 하기 때문에 최소한의 품질관리만 필요하다. 본 연구에서는 모델의 자료 동화 등에 직접 활용을 염두에 두었기 때문에 최대한 많은 품질관리를 수행하였다. 또한 추후 추가적인 자료 분석을 위해 원시자료는 그대로 보존하며 플래그만 추가하였다.

윈드라이다의 품질관리는 시간과 공간적인 일관성에 기초한다. 시간에 대한 일관성은 시간에 따른 풍속의 표준편차가 임계값보다 작아야 한다는 것을, 공간에 대한 일관성은 상층에서 풍속의 연직 경도가 임계값보다 작아야 한다는 것을 의미한다. 이런 관점에서 품질관리를 위한 변수로 CNR, 자료 가용도, 수평풍속의 연직 경도의 세 가지를 고려하였다. 다음 조건을 만족하는 경우 '정상'을, 만족하지 않는 경우 '의심'의 플래그를 추가하도록 하였다.

첫째, CNR의 값이 임계 CNR보다 커야 한다. CNR이 낮은 경우 자료의 품질이 급격하게 떨어지기 때문에 이에 대한 고려를 하였다. 품질관리를 위한 임계 CNR의 값은 자료의 통계 분석을 통해 결정하였다. 즉, CNR의 값이 임계 CNR보다 크면('정상') 플래그에 0을 더하고, 그렇지 않은 경우('의심') 플래그에 1을 더하도록 하였다.

둘째, 자료 가용도가 임계 자료 가용도보다 커야 한다. 자료 가용도가 낮은 경우는 유용성이 입증된 자료의 수가 작다는 것을 의미하기 때문에 배제되어야 한다. 임계 자료 가용도 역시 자료의 통계 분석을 통해 결정하였다. 즉, 자료 가용도의 값이 임계 자료 가용도보다 큰 경우('정상') 플래그에 0을 더하고, 그렇지 않은 경우('의심') 플래그에 10을 더하도록 하였다.

셋째, 수평 풍속의 연직 경도가 임계 경도값의 범위 내에 포함되어야 한다. 일반적인 상층 대기에서는 고도에 따라 풍속이 갑자기 크게 변하는 경우가 많지 않기 때문에 이를 고려하였다. 존데에서 관측된 동서방향과 남북방향 풍속의 연직 경도에 대한 통계 분석을 통해 풍속의 연직 경도의 임계값을 설정하였다. 즉, 동서방향 풍속과 남북방향 풍속의 연직 경도가 임계값 범위 내에 포함되면('정상') 플래그에 0을 더하고, 그렇지 않은 경우('의심') 플래그에 100을 더하도록 하였다.

플래그는 각 고도별 자료의 마지막 19번째 행에 추가하여, 000이면 '정상', 일의 자리가 1이면 CNR에 따른 '의심', 십의 자리가 1이면 자료가용도에 따른 '의심', 백의 자리가 1 또는 2 이면 풍속의 연직 경도 범위에 따른 '의심'을 의미한다.

3.2 풍속 표준편차

품질관리를 위한 임계값을 결정하기 위하여 2015년 9월 1일부터 30일까지 경기도 부천 관측소에서 10분마다 평균된 각 고도별 윈드라이다 자료를 사용하였다. 매시간 사용된 2개 이상 6개 이하의 자료에 대해 평균 CNR, 평균 자료가용도, 평균 동서방향 풍속, 평균 남북방향 풍속, 평균 연직방향 풍속, 동서방향 풍속의 표준편차 σ_u, 남북방향 풍속의 표준편차 σ_v, 연직방향 풍속의 표준편차 σ_w를 계산하였다. 세 방향 풍속의 표준편차의 합($\sigma_u+\sigma_v+\sigma_w$)을 σ_{wind}로 정의하였다. σ_{wind}는 일반적으로 대기 난류 변수로 활용되기도 하지만(Panofsky and Dutton, 1984), 본 관측의 목적이 돌풍 감시가 아닌 풍속의 측정이므로 상층에서 이 값이 크다는 것은 관측 풍속의 시간적 일관성이 낮아 자료의 품질이 낮을 수 있는 것으로 간주하였다.

분석에 사용된 자료는 총 33854개로 고도가 높아질수록 관측자료 비율이 감소하는 특성을 보였다. 분석기간 중 1.4 km 이하 고도에서는 95% 이상이 관측되었으며, 2.25 km에서 약 50%가 관측이, 3.0 km에서는 17%가 관측되었다(Fig. 4a). σ_u와 σ_v의 평균은 0.63 m s^{-1}와 0.64 m s^{-1}로 거의 유사하였으며, σ_w의 평균은 0.17 m s^{-1}로 수평방향 값보다 작았다(Fig. 4b). 수평풍속은 연직 풍속에 비해 10~100배 큰 것이 사실이지만, 윈드라이다에서는 수평 풍속과 연직 풍속을 직접 관측하지 않고, 천정 기준으로 약 15도 기울어진 각도의 북, 남, 동, 서 네 방향의 관측 시선 속도를 이용하여 Eqs. (1)-(4)를 이용하여 동서, 남북, 연직, 수

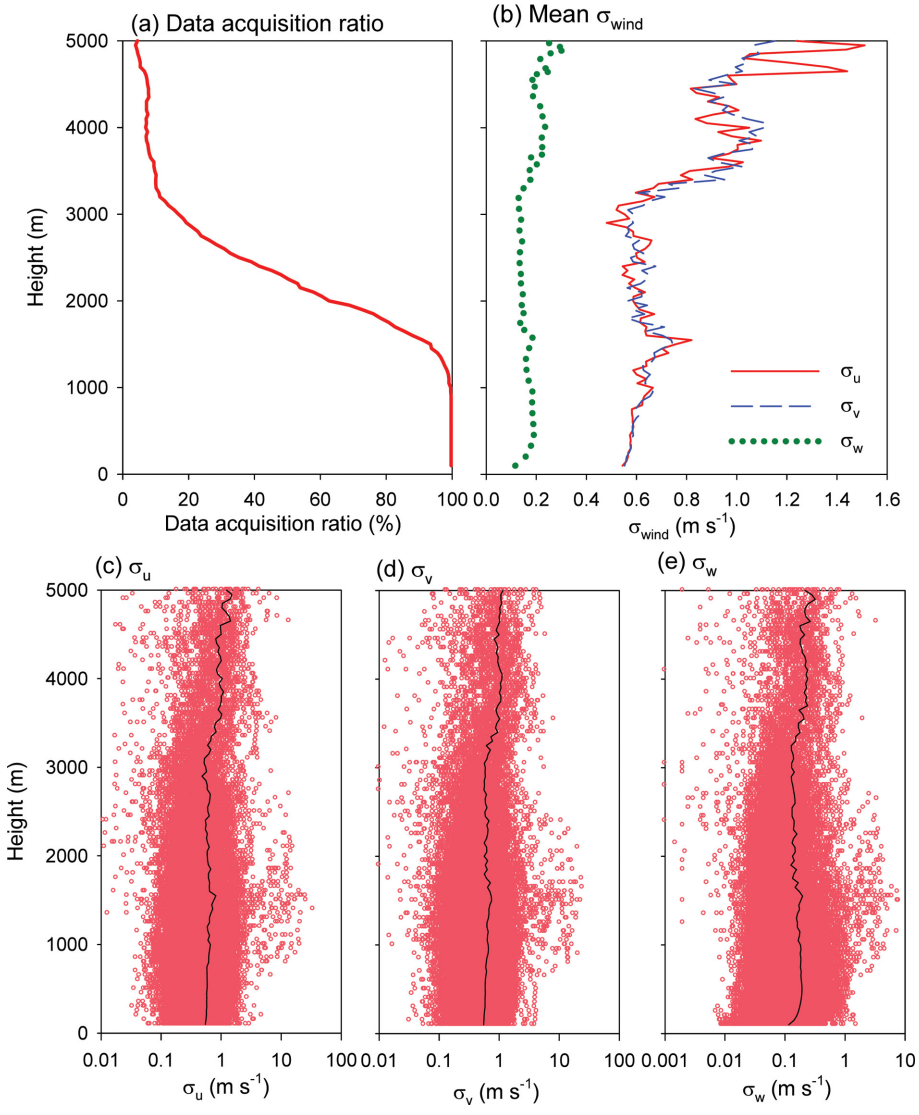

Fig. 4. (a) Data acquisition ratio, (b) height-averaged standard deviation of u, v, w-components of wind, averaged standard deviation of (c) σ_u (solid line), (d) σ_v, (e) σ_w with all data (open circle) from 100 m to 5000 m high at 50 m interval at the Bucheon station for the period from 1 to 30 September 2015.

평 풍속을 계산하기 때문에 σ_u/σ_w는 tan75°인 3.7의 값을 가지게 된다. 풍속의 표준 편차 값은 3 km 이내 고도에서는 약 1.5 km 고도에서 약간의 큰 값을 보이는 것을 제외하면 큰 변화가 없으며, 3 km에서 4 km 사이의 고도에서 각 성분의 값이 그 이하 고도에 비해 약 1.5배 가량 커졌다(Fig. 4b). Figures 4c-e는 각 고도에서의 표준편차를 모두 나타낸 것으로 풍속의 표준편차(σ_u, σ_v, σ_w)값이 0.8 km에서 2.2 km 구간에서 평균에서 벗어나는 큰 값이 다수 나타남을 확인할 수 있다. σ_{wind}의 평균은 1.44 m s^{-1}, 표준편차는 1.71 m s^{-1}였으며, σ_{wind}의 상위 95%는 3.10 m s^{-1}에 해당되고, 상위 90%는 2.48 m s^{-1}에, 상위 85%는 2.12 m s^{-1}에, 상위 80%는 1.86 m s^{-1}에 해당된다. 자료 중 노이즈 자료의 비율이 평균과 표준편차의 합에 해당하는 상위 84.1%에 해당하는 σ_{wind}의 기준값으로 2.1 m s^{-1}를 사용하였다.

3.3 CNR에 따른 자료의 분포 특성 및 임계 CNR의 결정

Figures 5a-b는 5 dB 간격으로 나타낸 CNR에 따른

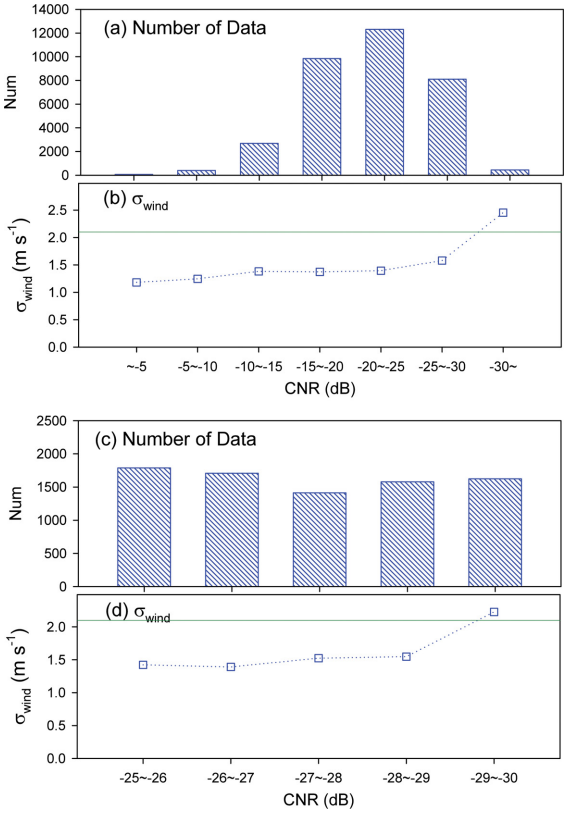

Fig. 5. (a) Number of data and (b) bin-averaged σ_{wind} at ranges 0~–31 dB with a bin size of 5 dB. (c) and (d) are the same as (a) and (b) except for at ranges –25~–30 dB with a bin size of 1 dB.

자료의 수와 σ_{wind}를 나타낸 것이다. 자료의 89% 이상이 –15 dB에서 –30 dB 사이에 위치하며, σ_{wind}는 –30 dB보다 작아지며 갑자기 커지는 특성을 보인다. –25 dB와 –30 dB 사이를 보다 세분화하여 살펴 보기 위해 1 dB 간격으로 자료의 수와 σ_{wind}를 나타내었다 (Figs. 5c-d). CNR의 값이 –25 dB에서 –29 dB까지 σ_{wind}는 약간씩 커지기는 하지만 2.1 m s^{-1} 이하로 거의 유사한 값을 보이지만, –29 dB보다 더 낮은 CNR 범위에서는 σ_{wind}가 2.1 m s^{-1} 이상으로 급격하게 커져 자료의 품질이 급격하게 떨어짐을 알 수 있다(Figs. 5c-d). 이를 근거로 임계 CNR은 –29 dB로 정했다.

3.4 자료가용도에 따른 자료의 분포 특성 및 임계 자료가용도의 결정

Figure 6은 0에서 100% 범위에 10% 간격으로 구분한 자료가용도의 분포 특성과 구간 평균 σ_{wind}를 나타낸 것이다. 자료 가용도가 100%인 자료는 전체의 71.8%로 가장 많으며, 90~100% 사이인 자료가 5.3%,

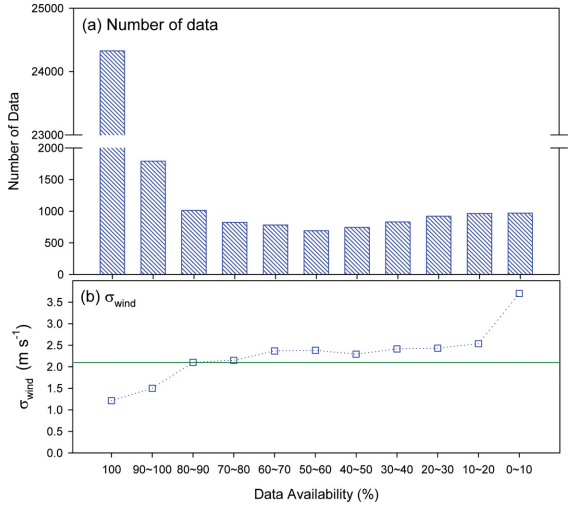

Fig. 6. (a) Number of data and (b) bin-averaged σ_{wind} at ranges 100% to 0% with a bin size of 10%.

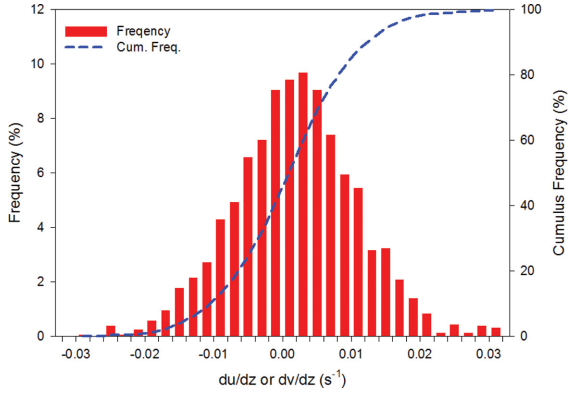

Fig. 7. Occurrence frequency and cumulus occurrence frequency according to the vertical gradients of u- and v-wind speeds with an interval of 0.002 s^{-1}.

그리고 10% 간격으로 나눈 나머지 구간 각각의 자료는 2~3%를 차지하고 있다(Fig. 6a). 각 구간 평균 σ_{wind}는 자료 가용도가 작아질수록 커지는 경향을 보였다 (Fig. 6b). 앞 절에서 설정한 σ_{wind}의 기준을 적용하면 자료가용도의 임계값은 90%로 설정하였다.

3.5 풍속의 연직 경도의 발생 빈도 특성 및 임계 연직 풍속 경도의 결정

윈드라이다에서 관측되고 있는 동서방향과 남북방향 풍속의 적정성의 기준을 제시하고자 윈드라이다 설치 지점인 경기도 부천에서 2014년 11월 14일 2100 LST부터 16일 1500 LST까지 6시간 간격으로 관측된

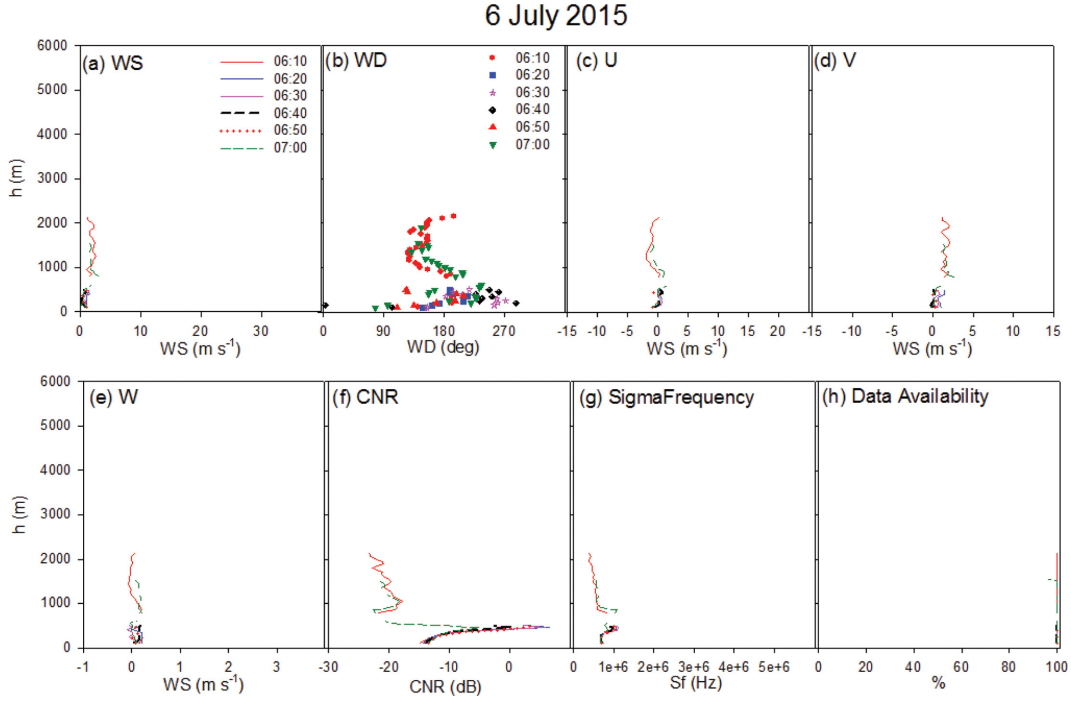

Fig. 8. The same as in Fig. 3 except for after quality checks.

존데 자료를 이용하여 풍속의 연직 경도의 특성을 분석하였다. 먼저 풍속과 풍향 자료를 동서방향 풍속과 남북방향 풍속으로 분리한 후, 내삽을 통해 윈드라이다와 같은 100 m 고도부터 5000 m까지 50 m 간격의 자료로 변환 후 이들의 연직 경도의 빈도수를 0.002 s^{-1} (50 m 상승할 때 0.1 m s^{-1} 차이에 대응)간격으로 분류하였다.

Figure 7은 0.002 s^{-1} 간격으로 나타낸 동서방향 풍속과 남북방향 풍속의 연직 경도의 발생 빈도와 누적 발생 빈도를 나타낸 것이다. 동서방향 풍속과 남북방향 풍속의 연직 경도의 평균은 0.0019 s^{-1} (50 m 높이 올라갈 때 0.095 m s^{-1} 상승)로 0보다 큰 값을 보이며, 99.9% 이상이 [–0.028 s^{-1}, +0.032 s^{-1}] 범위에 포함된다. 이를 토대로 –0.028~+0.032 s^{-1} 범위를 dU/dz의 유효 범위로 설정하였다. 지면과 가까운 지표층의 경우 급격한 풍속 변화가 가능하기 때문에 500 m 고도까지는 이 기준을 적용하지 않았다.

4. 품질관리 알고리즘 적용 결과

4.1 알고리즘 적용의 예

Figure 8은 Fig. 3에 제시된 자료에 CNR 검사, 자료가용도 검사, 수평 풍속 연직 경도 범위 검사의 품질관리 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 먼저, CNR 검사 후에 풍속, 풍향, 동서방향 풍속, 남북방향 풍속, 연직 풍속 등에 여전히 500~1000 m 사이의 고도에 노이즈 타입의 자료를 많이 포함하고 있었다. 이 검사를 통해 유효한 296개의 자료 중 19개가 의심으로 분류되었다. 둘째, 자료가용도 검사에서는 2000 m보다 높은 고도의 자료들이 의심으로 분류되어 제거되었으며, 여전히 500~1000 m 사이의 고도에 노이즈 자료들이 포함되어 있으나 CNR 검사 보다는 많이 제거되었다(Fig. 8). 즉, 이 검사를 통해 유효한 296개 자료 중 165개가 의심으로 분류되었다. 마지막으로, 풍속의 연직 경도 검사 후 대부분의 노이즈 자료들이 제거되는 것으로 나타났다(Fig. 8). 이 검사를 통해 296개의 자료 중 90개가 의심으로 분류되었다. 결론적으로, 각 검사에 중복되는 것들이 포함되어 있어 세 검사를 모두 수행하였을 때 유효한 296개의 자료 중 190개가 의심으로 분류되었다.

이 분석에 사용된 자료는 관측의 품질이 가장 안 좋은 경우 중 하나로 품질관리 이전에는 전체 자료를 쓸모 없는 것으로 처리될 수 있다. 그러나, 품질관리 알고리즘을 적용하여 유효한 동서방향과 남북방향 풍속을 찾은 후, 이들의 시간 평균을 취하고, 다시 이를 이용하여 시간평균 풍속과 풍향을 계산한다면 대략 2 km 고도까지의 유의미한 시간 평균 풍향, 풍속 자료를 확보할 수 있다. 따라서, 위의 자료가 '의심' 자료

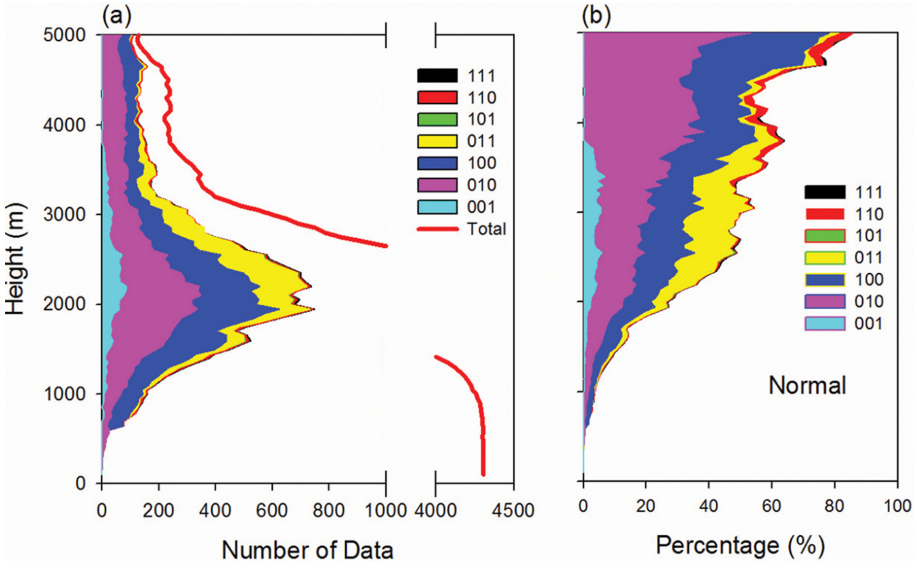

Fig. 9. (a) Number of each quality check flag and (b) ratios of data with each quality check flag to available data at each height for the period from 1 to 30 September 2015.

비율이 매우 높지만 품질관리를 통해 유의미한 시간 평균 바람의 계산이 가능하기 때문에 충분히 큰 의미를 가질 수 있다.

4.2 품질관리 알고리즘 적용

개발된 품질관리 알고리즘을 2015년 9월 1일부터 30일까지 부천관측소에서 관측된 자료에 적용한 결과 대부분의 노이즈 형태 자료들이 제거되어 공간적인 일관성과 시간적인 일관성을 유지함을 확인할 수 있었다. 관측 기간 중 고도별 품질관리 단계별 품질관리의 효과를 확인하기 위해 고도별 '의심' 자료의 수와 비율을 계산하였다(Fig. 9).

'의심' 자료의 수는 가장 하층인 100 m에서는 없으며, 약 2000 m 고도에서 최대를 보인 후 고도가 증가함에 따라 작아지는 특성을 보인다(Fig. 9a). 이는 전체 자료의 수가 지상에서 1000 m 고도까지 많다가 3000 m 고도까지 급격하게 감소한 후 그보다 높은 고도에서는 거의 일정하다는 것(Fig. 4a)과 대기 하층의 구름이나 강수, 대기경계층 고도 특성에 의해 고도가 증가함에 따라 자료의 품질이 급격하게 떨어지는 것과 관련된다. 즉, 윈드라이다에서 수신 받는 도플러 편이는 대기 중 에어러솔에 크게 의존하고, 에어러솔의 농도는 대기경계층 고도를 벗어나면 급격하게 감소하기 때문에 대기경계층 고도를 벗어나면 관측 자료의 품질이 급격하게 떨어진다(Pappalardo et al., 2004). 일반적인 대기경계층고도는 주간에 1~2 km 고도까지 성장하며, 야간에는 잔류층이 남아 있는 경우가 많아 에어러솔의 농도는 대기경계층고도, 야간에는 잔류층 고도까지 높은 경우가 많으며, 윈드라이다 관측 자료도 이 고도까지 관측되는 경우가 많다(Stull, 1988; Arya, 1999). 또한, 강수나 대기 하층(500~1500 m)에 짙은 구름이 있는 경우 그보다 상층에는 관측하기 어렵다. 그 결과, 고도별 '의심' 자료의 비율은 1000 m 고도에서 3.7%, 1500 m 고도에서 11.5%, 2000 m 고도에서 26.8%, 2500 m 고도에서 45.8%, 3000 m 고도에서 50.0%로 고도가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보인다(Fig. 9b).

품질검사 항목 중 CNR 검사에 따른 의심(플래그 001) 비율은 2000 m부터 4000 m 고도에서 4.0~6.0% 이내를 보였다(Fig. 9). 자료가용도 검사에 따른 의심(플래그 010) 비율은 2000 m 고도에서 10.0%를, 3400 m 고도에서 20.0%를, 3850 m 이상의 고도에서는 30% 이상을 보여 고도에 따라 증가하는 특성을 보였다. 풍속 경도 검사에 따른 의심(플래그 100 또는 200) 비율 역시 고도에 따라 증가하는 특성을 보였다. CNR 검사와 자료가용도 검사에 모두 의심(플래그 011) 비율은 2000 m에서 4000 m 고도에서 크며, 그 이하와 이상 고도에서는 작아지는 특성을 보였다.

5. 요약 및 결론

이상에서 차세대도시농림융합기상사업단에 도입된 펄스 도플러 윈드라이다로부터 고품질 자료를 산출하기 위한 품질관리 방법을 제시하고 품질관리

를 위한 각 단계별 임계값을 결정하고, 2015년 9월 한 달 동안 관측 자료에 적용하여 그 효과를 살펴보았다.

품질관리 알고리즘은 CNR 검사, 자료가용도 검사, 수평풍속의 연직 경도 검사의 3단계로 나뉘어 각 단계별 '의심'과 '정상'에 따른 플래그를 부여하여 각 고도별 자료의 마지막에 추가하도록 하였다. CNR 검사와 자료가용도 검사를 위한 임계값은 2015년 9월 1일부터 30일까지 부천관측소에서 관측된 자료 중 풍속의 표준편차를 통계적으로 분석하여 결정하였으며, 수평 풍속의 연직 경도 임계값은 2014년 11월 14일 2100 LST부터 16일 1500 LST까지 6시간 간격으로 존데로 관측된 자료의 확률분포를 분석하여 결정하였다. 즉, CNR 검사에서는 임계 CNR인 –29 dB 이하의 자료를 '의심'으로 분류하였고, 자료가용도 검사에서는 임계 자료가용도인 90% 이하의 자료를 '의심'으로 분류하였고, 풍속의 연직 경도 검사에서는 $-0.028\ s^{-1}$~$0.032\ s^{-1}$의 범위를 '정상'으로, 이를 벗어난 자료는 '의심'으로 분류하였다.

개발된 품질관리 알고리즘을 2015년 9월 1일부터 30일까지 부천관측소에서 관측된 자료에 적용하여 고도별 품질관리 단계별 품질관리 효과를 살펴본 결과 '의심' 자료 수의 절댓값은 2000 m 부근 고도에서 가장 크나, 관측 자료 중 '의심' 자료의 비율은 고도가 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다. '의심' 분류 전체 자료 중 자료가용도가 기여하는 것이 가장 크며, 풍속의 연직 경도와 CNR의 기여도는 거의 유사한 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 품질관리 방법론은 장비의 종류와 설치 환경에 따라 다를 수 있다. 또한 품질관리를 위해 사용된 임계값들은 특정 지점의 특정 기간의 통계값에 기초하기 있기 때문에 기간에 따라 다르게 산정되어야 한다. 또한, 특이 기상 현상이 있을 경우 본 알고리즘 적용 후 노이즈 자료들이 제거되지 않거나 또는 너무 과도하게 제거되는 경우가 발생할 수 있다. 전자의 경우에는 존데와의 비교 분석, 고도별 풍속과 풍향의 24시간 가량의 시계열 분석, 연직 프로파일의 시계열 분석, 인접한 다른 지점 자료와의 공간 분석 등을 통한 수동의 추가 품질관리가 필요하며 후자의 경우에는 품질관리 임계값 조정이 필요할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업(KMIPA-2012-0001-1)의 지원으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구에서는 WISE 사업으로 구축된 장비에서 산출된 자료를 활용하였습니다.

REFERENCES

Arya, S. P., 1999: *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press, 310 pp.

Chae, J.-H., M.-S. Park, and Y.-J. Choi, 2014: The WISE quality control system for integrated meteorological sensor data. *Atmosphere*, **24**, 445-456 (in Korean with English abstract).

Choi, Y., S.-L. Kang, J. Hong, S. Grimmond, and K. J. Davis, 2013: A next-generation weather information service engine (WISE) customized for urban and surrounding rural areas. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, ES114-117.

Frehlich, R. G., S. M. Hannon, and S. W. Henderson, 1994: Performance of a 2-μm coherent Doppler lidar for wind measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 1517-1528.

Grund, C. J., B. M. Banta, J. L. George, J. N. Howell, M. J. Post, R. A. Richter, and A. M. Weickmann, 2001: High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 376-393.

Hong, J. S., 2015: *A study on the characteristics of heavy rainfall on the west coastal using a wind profiler-focused on Gunsan case analysis.* Master Thesis, Chosun University, 49 pp.

Huffaker, R. M., and R. M. Hardestry, 1996: Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid state and CO_2 coherent laser systems. *Proc. IEEE*, **84**, 181-204.

Jeong, J.-H., S. Lo, S.-K. Song, and Y.-K. Kim, 2010: The application of wind profiler data and its effects on wind distributions in two different coastal areas. *J. Environ. Sci.*, **19**, 689-701.

Kwon, T. H., M.-S. Park, C. Yi, and Y. J. Choi, 2014: Effects of different averaging operators on the urban turbulent fluxes. *Atmosphere*, **24**, 197-206 (in Korean with English abstract).

Lang, S., and E. McKeogh, 2011: LIDAR and SODAR measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purpose. *Remote Sens.*, **3**, 1871-1901.

Leosphere, 2012: *Windcube 200^{TM} user manual (version 2)*, 47 pp.

Lim, Y.-K., S.-K. Song, and S.-O. Han, 2014: Data assimilation effect of mobile rawinsonde observation using unified model observing system experiment during the summer intensive observation period in 2013. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 215-224.

Panofsky, H. A., and J. A. Dutton, 1984: *Atmospheric Tur-*

bulence – Models and Methods for engineering applications. John Wiley & Sons, 397 pp.

Pappalardo, G., and Coauthors, 2004: Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project 3. Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio. *Appl. Opt.*, **43**, 5370-5385.

Park, M.-S., S.-H. Park, J.-H. Chae, M.-H. Choi, Y. Song, and M. Kang, 2016: High-resolution urban meteorological observation network for user-specific meteorological information service in Seoul Metropolitan Area, Korea. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*, doi:10.5194/amt-2016-278.

Paschke, E., R. Leinweber, and V. Lehmann, 2015: An assessment of the performance of a 1.5 mm Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 2251-2266.

Pielke, R. A., 2002: *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, 676 pp.

Simmons, A. J., and A. Hollingsworth, 2002: Some respects of the improvement in skill of numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 647-677.

Son, D. S., 2005: The wind shear experiments with the wind profiler. Master Thesis, Kookmin University, 34 pp.

Soreide, D. C., R. K. Bogue, J. Seidel, and L. J. Ehernberger, 1997: The use of a lidar forward-looking turbulence sensor for mixed-compression inlet ustart avoidance and gross weight reduction on a high speed civil transport. NASA Technical Memorandum, 104332.

Strangeways, I., 2003: *Measuring the Natural Environment*. Cambridge University Press, 534 pp.

Stull, R. B., 1988: *An Introduction to the Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 666 pp.