

대설관측실험(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY) 기간 중 두 제조사 라디오존데 기온과 습도 센서 상호 비교

서원석^{1,2)} · 은승희¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 성대경¹⁾ · 이규민¹⁾ · 전해림¹⁾ ·
최병철³⁾ · 고아름⁴⁾ · 장기호⁴⁾ · 양승구⁵⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾한국해양과학기술원 부설 극지연구소,

³⁾국립기상과학원 관측예보연구과 재해기상연구센터,

⁴⁾국립기상과학원 응용기상연구과, ⁵⁾(주)진양공업

(접수일: 2015년 10월 15일, 수정일: 2016년 2월 17일, 게재확정일: 2016년 3월 18일)

Intercomparison between Temperature and Humidity Sensors of Radiosonde by Different Manufacturers in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) Campaign

Won-Seok Seo^{1,2)}, Seung-Hee Eun¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Dae-Kyeong Seong¹⁾, Gyu-Min Lee¹⁾,
Hye-Rim Jeon¹⁾, Byoung-Cheol Choi³⁾, A-reum Ko⁴⁾, Ki-Ho Chang⁴⁾, and Seung-Gu Yang⁵⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Korea Polar Research Institute, KIOST, Incheon, Korea

³⁾High Impact Weather Research Center, National Institute of Meteorological Research, Gangneung, Korea

⁴⁾Department of Applied Meteorology Research, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

⁵⁾Jinyang Industrial Co., Ltd., Anseong, Korea

(Manuscript received 15 October 2015; revised 17 February 2016; accepted 18 March 2016)

Abstract Radiosonde is an observation equipment that measures pressure (geopotential height), temperature, relative humidity and wind by being launched up from the ground. Radiosonde data which serves as an important element of weather forecast and research often causes a bias in a model output due to accuracy and sensitivity between the different manufacturers. Although Korean Meteorological Administration (KMA) and several institutes have conducted routine and intensive radiosonde observations, very few studies have been done before on the characteristics of radiosonde performance. Analyzing radiosonde observation data without proper understanding of the unique nature of those sensors may lead to a significant bias in the analysis of results. To evaluate performance and reliability of radiosonde, we analyzed the differences between two sensors made by the different manufacturers, which have been used in the campaign of Experiment on Snow Storm At Yeongdong (ESSAY). We improved a couple of methods to launch the balloon being attached with the sensors. Further we examined cloud-layer impacts on temperature and humidity differences for the analysis of both sensors' performance among various weather conditions, and also compared daytime and nighttime profiles to understand temporal dependence of meteorological sensors. The overall results showed that there are small but consistent biases in both temperature and humidity between different manufactured sensors, which could eventually secure reliable precisions of both sensors, irrespec-

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, 7 Jukheongil (123 Jibyun),
Gangneung, Gangwon 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

tive of accuracy. This study would contribute to an improved sounding of atmospheric vertical states through development and improvement of the meteorological sensors.

Key words: Radiosonde, ESSAY, Yeongdong, sensor, cloud

1. 서 론

라디오존데는 대기 상층의 기상요소(기온, 기압, 상대습도, 풍향, 풍속 등)를 자동적으로 측정하여 소형 송신기에 의해 지상으로 송신하는 장치를 말한다. 관측 센서는 $5\sim 8\text{ m s}^{-1}$ 의 속도로 상승하는 기구에 실려 20~30 km 상공까지 대기의 상태를 관측한다. 또한 라디오존데 관측 자료는 기상 예측을 위한 수치자료로 활용되고 있으며, 부가적으로 모델과 위성자료의 검증, 기후연구, 지역적인 기상상태 분석 등 다양한 분야에 활용되고 있다(Durre et al., 2006; Lee et al., 2012; Nam et al., 2014; Seo et al., 2015). 이와 같이 라디오존데는 기상연구에 있어서 기초적인 자료로써 중요한 부분을 차지하고 있지만, 같은 지점에서 관측하는 라디오존데 일지라도 라디오존데 센서가 변경되면 입력자료가 변경되어 다양한 모델의 결과에 오차를 유발할 수 있다(Eskridge et al., 2003).

기존의 라디오존데 오차 및 편차 비교 실험연구 결과를 보면 습도의 경우 Global Positioning System (GPS) 가강수량과 비교했을 때 과소 측정(건조 편차)하는 경향이 있는 데(Wang et al., 2002; Turner et al., 2003; Nakamura et al., 2004; Wang and Zhang, 2008), 이는 수치모델의 가강수량을 과소 모의할 수 있다(Lorence et al., 1996). 이러한 상대습도의 과소 관측 경향은 외국에 비해 활발하게 수행된 편은 아니지만 국내 일부 연구결과에서도 확인된 바 있다(Kwon et al., 2007; Kim et al., 2009). 특히 Kim et al. (2009)은 ECMWF 분석자료와 GPS 가강수량을 기준값으로 정하고 라디오존데 집중관측(KEOP-2007) 자료를 이용하여 기온과 상대습도를 비교한 결과 평균적으로 기온은 높게 측정하는 경향이, 상대습도는 낮게 측정하는 경향이 우세함을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 강릉에서 2013년 12월부터 2015년 3월까지 대설 관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY) 기간중에 라디오존데 관측을 수행하였고, 이 기간 중 서로 다른 제조사(본 연구에서는 A와 B사로 지칭함)의 라디오존데를 총 84회 비양하였다. 본 연구의 목적이 두 제조사의 성능 비교 평가가 아니기 때문에 제조사이름과 모델명을 명시하지 않았다. 라디오존데 센서간 비교를 위한 적절한 비양방법 제시와 초기 입력값에 따른 의존도, 기상조건 별 그리고 주야간 서로 다른 두 센서간의 기온이나 상대습도의 차이 등을 분석하였다. 또한 구름층이 존

재할 경우 라디오존데 수증기량과 MWR에서 추정된 가강수량(Integrated Water Vapor; IWV)과도 추가적으로 비교하였다. 이는 기준(reference) 센서와의 비교를 할 수 없기 때문에 센서들의 정확도 향상에 기여할 수는 없지만 센서간의 편차 분석을 통해 기기 성능 향상에 기여할 수 있을 것이라고 생각한다.

2. 분석 자료 및 방법

2.1 관측자료 소개

본 연구에서는 2013년 12월~2015년 3월까지 실시한 대설관측 캠페인(ESSAY) 기간 중에 강설 시작 전에는 6시간 간격, 강설기간 동안에는 3시간 간격으로 라디오존데 관측을 수행하였다. ESSAY-2014(2013년 12월~2014년 3월)에서는 라디오존데 관측시에 초기 지상 관측값으로 자동기상관측시스템(AWS) 자료를 사용하였고, ESSAY-2015(2014년 12월~2015년 3월)에서는 AWS 뿐만 아니라 건습구온도계, 통풍건습계, 자기온습도계 등 다양한 지상관측장비를 사용하였으며 라디오존데 비양 방법에도 변화를 주었다.

ESSAY 실험에서는 운고계(ceilometer)를 이용하여 운저고도(cloud base)를 추정하였고, 라디오존데 관측으로부터 온위(potential temperature; θ), 상당온위(equivalent potential temperature; θ_e), 혼합비(mixing ratio; q), 포화혼합비(saturation mixing ratio; q_s) 등의 열역학적인 특성과 운정고도(cloud top)를 산출하였다. 운정고도 산정 방법은 앞서 말한 라디오존데 관측으로부터 온위와 상당온위를 계산한 후, 구름층 내에서 온위는 잠열방출로 인해 다소 증가하는 반면 상당온위는 일정한 경향을 보인다는 특성을 고려하고 포화혼합비와 혼합비의 차이가 거의 없는 포화상태에서 건조한 대기 상태로 급변하는 위치를 운정고도로 추정하였다(뒤에 제시된 Fig. 3 하단의 상대습도 연직 구조 참조).

Table 1은 ESSAY 캠페인 기간 동안에 활용된 관측 기기에 대한 개요 및 사양을 정리한 것이다. 라디오존데는 A사와 B사에서 제작된 서로 다른 센서를 이용하여 비교 관측을 실시하였다. 같은 지점에서 동일한 요소에 대해 서로 다른 두 센서를 동시에 관측함으로써 두 센서간의 계통적인 차이가 나타났다면 둘 중 하나의 센서 오류로 인한 결측이 발생할 경우 일관성 있는 차이를 감안하여 결측으로 인한 자료의 손실을 줄일 수 있었다. 그리고 수증기량 비교를 위하

Table 1. Summary of primary instrumentations.

Instrument	Measured variable (unit)	Manufacturer (Model)	Accuracy
Radiosonde	T (°C), RH (%), P (hPa), WS (m s ⁻¹), WD (°)	A	T (± 0.2°C), RH (± 2%), P (± 1 hPa), WS (± 1 m s ⁻¹), WD (± 2°)
		B	T (± 0.5°C), RH (± 5%), P (± 1 hPa), WS (± 2 m s ⁻¹), WD (± 5°)
Ceilometer	Cloud base (m)	Väisälä (CL51)	± 1% (± 5 m)
MWR	IWV (mm)	Radiometer Physics GmbH (RPG-HATPRO)	± 0.2 kg m ⁻²

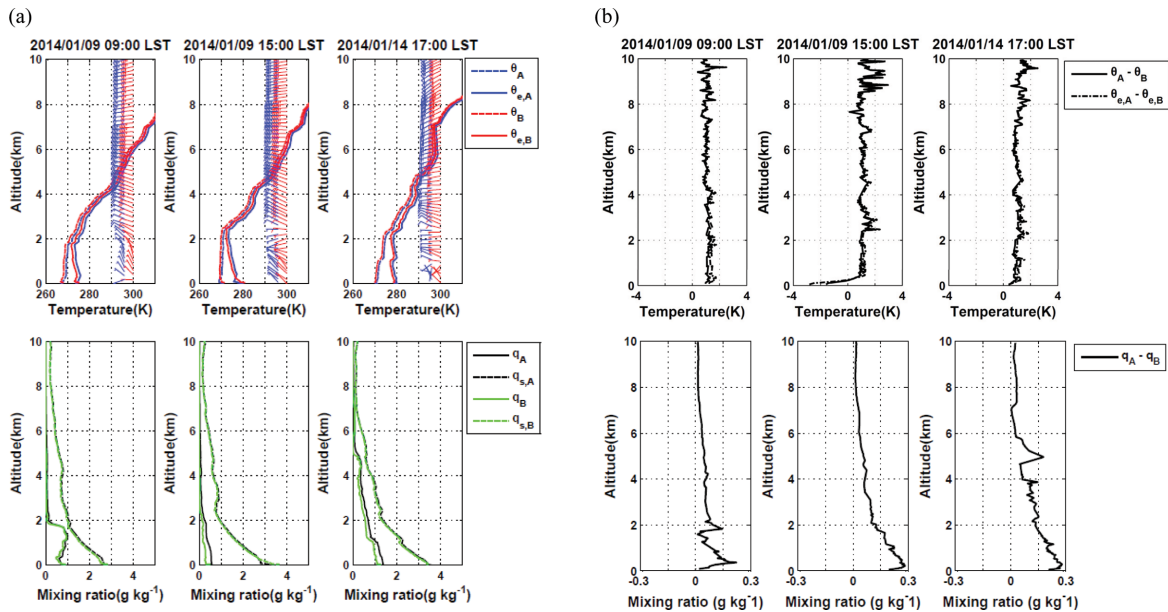


Fig. 1. Vertical profiles of potential temperature (θ_A (A manufacturer) and θ_B (B manufacturer)), equivalent potential temperature (θ_e), wind (flag), mixing ratio (q_A (A manufacturer) and q_B (B manufacturer)) and saturation mixing ratio (q_s). (b) Differences of potential temperature (θ) and equivalent potential temperature (θ_e), saturation mixing ratio (q_s) and mixing ratio (q) during the ESSAY campaign.

여 라디오존데와 마이크로파 복사측정기(Microwave Radiometer; MWR)를 활용하여 가강수량(각각 Precipitable Water Vapor (PWV)와 Integrated Water Vapor (IWV))을 추정하였다.

Figure 1은 ESSAY 기간에 3가지 사례를 선정하여 나타낸 관측 결과인데, 지상 10 km까지 온위, 상당 온위, 혼합비, 포화혼합비, 바람은 서로 다른 두 센서 간에 유사한 경향을 잘 보이고 있다. 하지만 A사와 B

사의 정량적인 차이(Fig. 1b)를 자세히 살펴보면 온도와 혼합비 모두 A사가 B사보다 일정하게 높은 것을 나타내고 있다. 온도는 고도에 상관없이 일정한 차이를 보이고 있으나, 특히 상대습도는 지표면 부근의 차이가 상층보다 높게 나타나는 경향이 있다.

2.2 관측장비 재원

Tables 2-4는 본 연구에서 사용된 A와 B사의 라디

Table 2. Summary of the general specifications of A and B radiosonde models.

General	A	B
Dimensions	80 * 80 * 50 mm	65 * 77 * 132 mm
Weight	90 g	180 g
Batter type	Lithium Battery	Lithium Manganese Dioxide
GPS	A	B
Type	C/A code	C/A code
Frequency	L1 1575.42 MHz	L1 1575.42 MHz
Accuracy	Position < 10 m (90%)	Position < 10 m (90%)
Channel	20	20
Transmitter	A	B
Type	PLL Synthesizer base circuit	FM transmitter
Tuning Range	400.01~405.99 MHz	400.15~406 MHz
Frequency Stability	± 4 kHz	± 10 kHz
Output Power	100 mA	200 mA

Table 3. Same as Table 2, except for temperature and humidity.

Temperature	A	B
Type	Thermistor	Thermistor
Calibrated rang	+50 ~ -90°C	+50 ~ -90°C
Accuracy	± 0.2°C	± 0.5°C
Resolution	0.01°C	0.1°C
Humidity	A	B
Type	Capacitive Polymer	Carbon Hygristor
Calibrated rang	0~100%	1~100%
Accuracy	± 2%	± 5%

오존데 사양을 각각 나타낸 것이다. 일반적으로 A사와 B사의 센서크기는 각각 80 × 80 × 50 mm, 65 × 77 × 132 mm이며, 중량은 각각 90 g, 180 g이다. A사와 B사가 사용하는 배터리는 각각 리튬 배터리와 리튬 망간 배터리로 두 제조사 모두 우수한 저온 특성을 가지고 있고 작고 가벼운 반면 상대적으로 용량이 크기 때문에 라디오존데용으로 적합한 배터리를 사용하고 있다. 그리고 GPS 코드는 두 제조사 모두 C/A (Coarse/Acquisition or Clear/Access)를 사용하는데, 주파수는 L1(1575.42 MHz 대역폭)과 L2(1227.60 MHz 대역폭, L1보다 정확한 미 군사용주파수)가 있는데 두 센서는 L1 1575.42 MHz를 사용하며, 20개의 채널을 가지고 있다. 정확도(Accuracy)는 10 m 이내이다. GPS 라디오존데는 기압(pressure)을 직접 측정하지 않고 GPS로

Table 4. Same as Table 2, except for pressure, wind speed and wind direction.

Pressure	A	B
Calibrated rang	3~1060 hPa	5~1050 hPa
Accuracy	± 1 hPa	± 1 hPa
Wind Speed	A	B
Calibrated rang	0~200 m s ⁻¹	0~200 m s ⁻¹
Accuracy	± 1 m s ⁻¹	± 2 m s ⁻¹
Wind Direction	A	B
Calibrated rang	0~360°	± 2°
Accuracy	0~360°	± 5°

부터 얻어지는 정확한 위치정보로부터 고도가 측정되며 이로부터 기압을 환산한다. 그리고 GPS 자료로부터 비양 중 정확한 풍속과 풍향을 환산하는데 A사의 풍향과 풍속의 정확도(Accuracy)는 각각 ± 1 m s⁻¹, ± 2°, B사는 ± 2 m s⁻¹, ± 5°이었다. GPS 송신기는 PLL (Phase-Locked Loop) Synthesizer based circuit(일반적인 신호유지 장치)와 FM transmitter(FM 라디오 방송 범위 주파수)를 사용하고 있으며 주파수는 400.01~405.99 MHz, 400.15~406 MHz의 범위를 가지며 ± 4 kHz, ± 10 kHz의 주파수 안정도를 가진다.

두 센서 모두 Thermistor형 온도센서를 활용하여 온도를 측정하며, 관측 범위는 +50 ~ -90°C로 동일하다. 하지만 A사 센서의 해상도(Resolution)가 ± 0.01°C, 정확도가 ± 0.2°C로 B사 센서보다 다소 우수하였다. 습

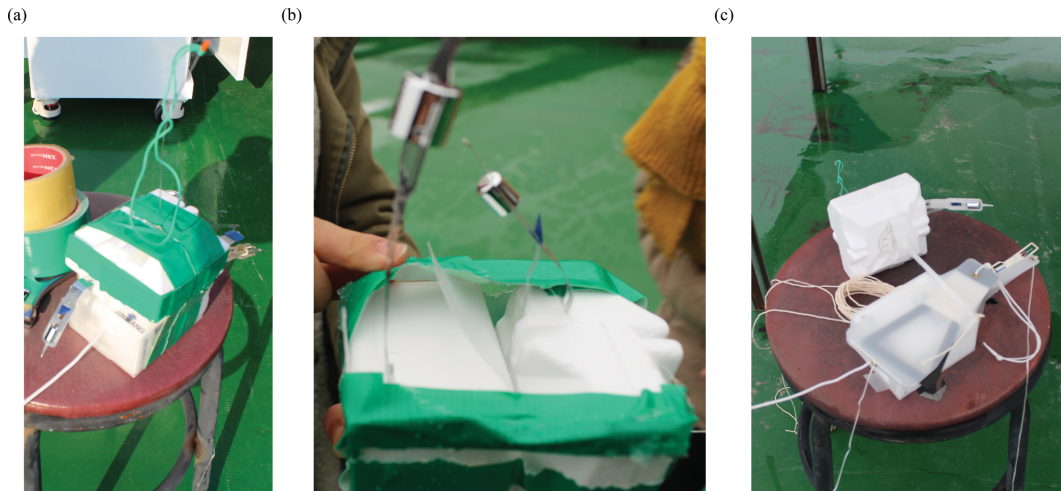


Fig. 2. Pictures of M1 method (a), M2 method (b), and M3 method (c) in the sensor arrangement.

도 센서의 경우 두 제조사 모두 정전용량식 습도센서로 습도의 변화에 따라 용량(Capacitance)이 변화하는 센서로 빠른 응답속도를 가지고 있다. A사와 B사의 관측 범위와 해상도는 각각 0~100%, 1~100% 이며, 정확도는 각각 $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ 로 차이가 있었다.

2.3 분석방법

분석 자료는 총 4단계 과정을 거쳐 선정하였다. 첫 번째로 ESSAY 기간 중 관측 초기 센서의 방향에 따른 관측오차가 발생하였기에 동일한 센서 방향으로 비양한 자료만을 사용하였고, 두 번째 조건은 기상조건이 무강수 사례일이며, 세 번째로는 운량이 3옥타 이상인 경우를 선정하여 분석하였다. 위와 같은 조건에 부합하는 사례를 선정한 이유는 기존 관측사례에서 확인한 바에 의하면 초기 관측 방법의 차이(2.4 절에서 설명) 또는 대설의 경우 존데의 수신율이 현저히 약화되기 때문에 무강수 사례를 선정하였으며, 또한 운량의 기준을 둔 이유는 센서가 구름을 통과한 후 원래 상태로의 회복력(hysteresis)을 분석하기 위해서이다. 그리고 마지막으로 이렇게 선택된 사례에서 자료의 일관성을 확보하기 위해 주간과 야간으로 나누었는데, 주간은 0900 LST 야간은 2100 LST 자료만을 선정하여 총 8개의 사례를 분석하였다.

선택된 사례는 다음과 같은 절차로 분석하였다. 첫 번째 Hannu et al. (2014)이 분석한 방법을 토대로 온도와 습도 관측값을 주간과 야간으로 나누어 각 변수의 차이를 확인할 예정이며(두 센서가 동일 고도에서 관측한 자료의 차이) 두 번째로 온도와 습도 관측값의 차이가 확인되면 이유를 검토하기 위해 지상에서부터 운저고도까지, 구름층 내, 운정고도부터 10 km

까지 각각 관측값 차이의 평균을 분석하고, 세 번째는 아래의 식(1)을 이용하여 라디오존데 관측 수증기량으로부터 가강수량을 추정하고 이를 MWR에서 추정된 가강수량값과 상호 비교할 예정이다.

$$PWV = \frac{1}{g} \int_{P_0}^P w dp \quad (1)$$

여기서 P_0 는 관측소의 지상기압이, P 는 상층기압을 나타내며 w 는 혼합비($g \text{ kg}^{-1}$) g 는 중력가속도(9.8 m s^{-2})를 나타낸다.

2.4 비교방법의 개선

Figures 2~3은 본 연구의 분석 기간중 관측 비양방법의 변경과 그에 따른 대기 연직구조를 나타낸 것이다. 관측 초기 두 센서 방향을 반대로 부착하여(Fig. 2a) 비양하였고 향후 센서의 방향을 동일하게(Figs. 2b, c) 비양하였다. 각각의 관측 방법에 따라 온도에는 큰 차이를 보이지 않았지만 습도관측에서는 상당한 차이가 나타났다.

관측초기에는 Fig. 2a와 같은 방법(이하 M1)으로 센서를 비양하였을 때 관측된 온도값의 차이는 무시할 수 있을 정도로 미미하였지만(Fig. 3a 상단), 습도 관측에서는 구름층을 통과한 후 관측된 습도값에서 큰 편차가 나타났는데(Fig. 3b 하단), 이는 습도센서에 달려있는 캡에 의한 문제라고 생각된다. 수증기를 많이 포함하고 있는 구름층이나 또는 강수가 있는 조건에서는 하늘 쪽으로 캡의 한쪽이 열려 있는 경우 부착된 캡 하단부에 물방울이 응결되어 습도값의 큰 편차가 발생하였을 것으로 추정된다. 이를 개선하기 위하여 이후에는 Fig. 2b와 같이 센서를 같은 방향으로 배

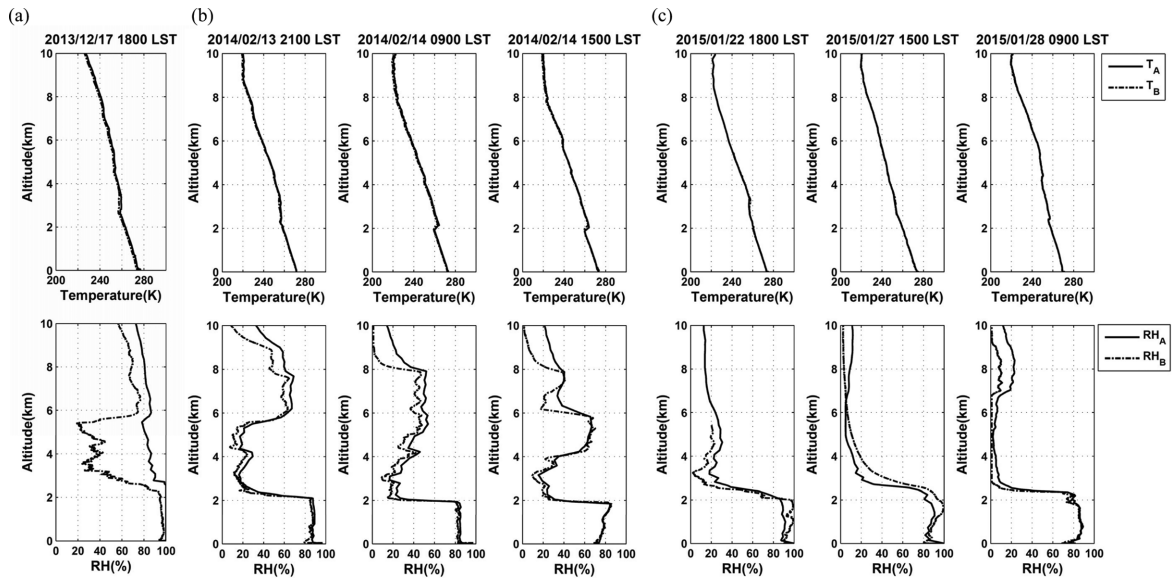


Fig. 3. Vertical profiles of temperature (T_A (A manufacturer) and T_B (B manufacturer)) and relative humidity (RH_A (A manufacturer) and RH_B (B manufacturer)) using M1 method (a), M2 method (b), and M3 method (c).

Table 5. Comparison of signal-receiving rate between M2 and M3 methods of radiosonde observation.

Method	Total	Success	Success rate (%)
M2	50	34	68.0
M3	28	26	92.9

열하였다(M2). M2 방법을 적용한 이후에는 구름층을 통과한 센서에서 습도 관측값은 M1 관측 방법과 같은 편차가 발생하지 않았으며(Fig. 3b 하단), 구름층을 통과한 후 건조한 층에서 두 센서의 습도 모두 뚜렷이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 인접 센서간의 전파 간섭에 의해서 자료수신 성공률의 문제가 발생할 수 있기 때문에 두 센서를 Fig. 2c와 같이 일정 거리를 두어 비양하는 M3 방법을 적용하여 비양방법을 개선하였다. M2와 M3 비양방법간의 자료수신 성공률을 비교한 결과(Table 5), M2 방법은 근접한 센서 간의 전파간섭 등으로 인한 자료수신 성공률이 68%이었으나 M3 방법으로 개선한 후 성공률이 92.9%로 크게 향상되었다.

3. 결 과

3.1 조건별 관측 결과 비교

A와 B사의 라디오존데 관측값의 사례별(구름 유무) 그리고 시간별(주간과 야간) 온도 및 상대습도 차이를 각각 분석하였다. Figure 4a는 선정된 사례 중에서

주간에 대한 온도(그림 상단)와 상대습도(그림 하단)의 상층 연직구조이다. 첫 번째부터 세 번째 사례인 2014년 1월 20일 0900 LST 사례까지는 M2 방식으로 관측된 자료이며, 마지막 사례인 2015년 1월 27일 0900 LST 사례만 M3 방법으로 비양된 자료이다. 또한, 2014년 1월 5일 0900 LST 사례의 경우 약 5 km 고도에서 풍선이 터짐으로써 관측이 종료되었다. 전반적으로 관측된 온도의 경우는 두 센서간의 차이가 거의 없었으나, 습도의 경우는 온도에 비해 다소 차이를 보이고 있다. 증감 경향은 유사한 경향을 보이지만 기준(reference) 센서로 함께 관측하지 못했기 때문에 두 센서 중 한 개의 센서가 과대 혹은 과소 추정한다고 생각된다. Figure 4b는 두 센서 관측값 차이를 나타낸 것이다. 각각의 사례를 지상에서 10 km까지 관측값 차이의 평균을 구하고 그 차이를 주간과 야간으로 나누어 평균을 비교하였을 때, 두 센서가 평균적으로 0.4°C 차이를 보였다. 또한 상층으로 올라갈수록 A(B)사의 센서가 B(A)사의 센서보다 미미하지만 과대(과소) 측정함을 알 수 있다. 습도의 경우도 위와 같은 방식으로 계산한 결과 두 센서간의 평균 6.1%의 차이를 보였다. Figure 5는 야간의 라디오존데 관측 결과 중에서 4개의 사례를 나타낸 것이다. 첫 번째 사례인 2013년 12월 26일 2100 LST 사례는 M2 방법으로 비양된 자료이며, 남은 세 가지 사례는 M3 방법으로 비양된 자료이다. 이 중에서 B제조사 라디오존데 센서는 2015년 1월 22일 2100 LST에 6~13 km까지 관측이 이루어지지 못하였다. 이는 자료 확인 결

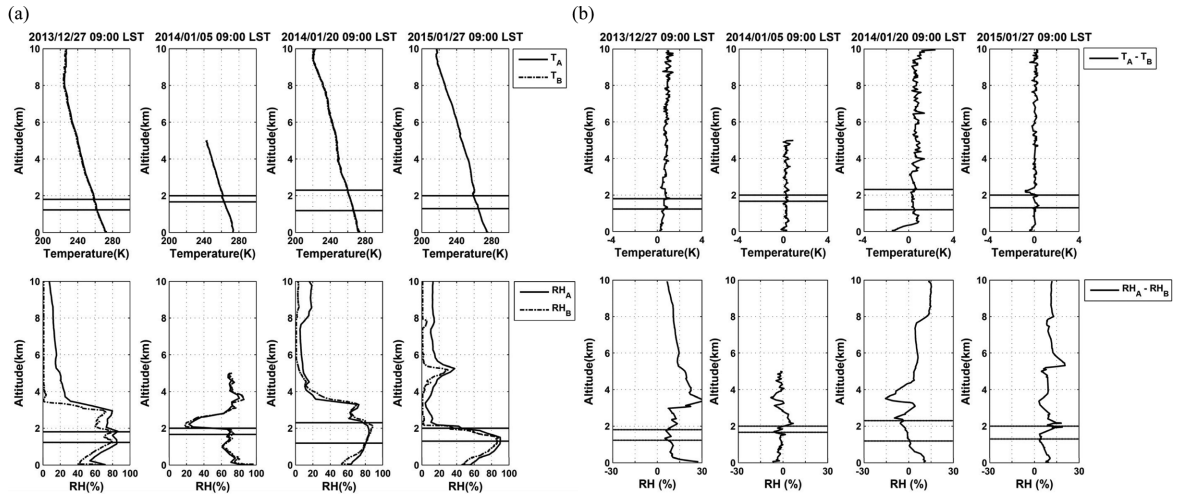


Fig. 4. (a) Vertical profiles of temperature (T_A (A manufacturer) and T_B (B manufacturer)), relative humidity (RH_A (A manufacturer) and RH_B (B manufacturer)). (b) Differences of temperature and relative humidity during the cloudy daytime. The black horizon lines denote cloud base and cloud top heights.

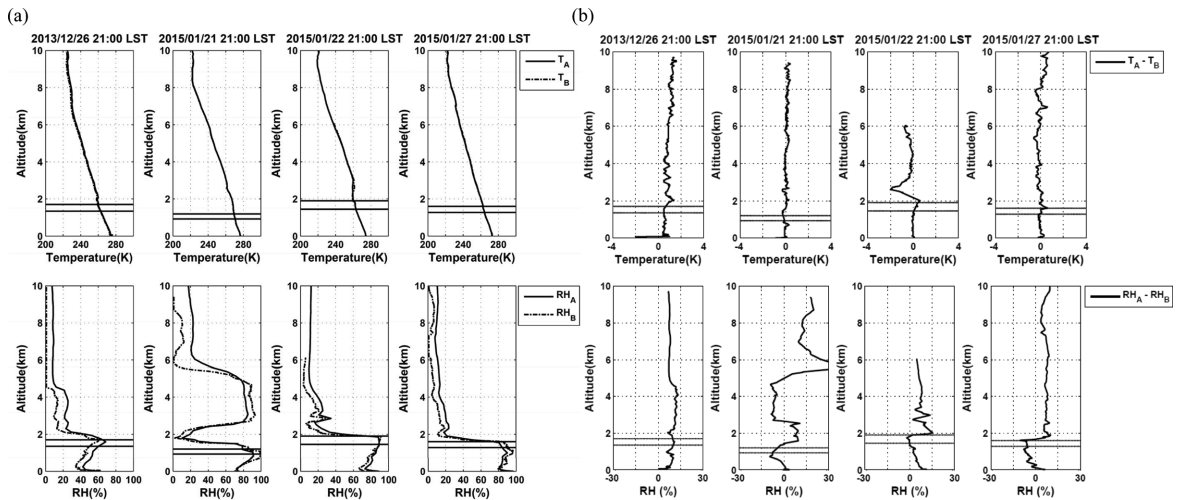


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for the cloudy nighttime.

과 약 6 km 이상의 고도에서 자료의 수신불량으로 13 km까지의 관측 자료가 기록되지 못하였고, 13 km 이상의 고도부터는 다시 자료가 수신되었다. 야간의 경우(Fig. 5a)도 주간과 마찬가지로 온도 차이는 거의 없었으며, 습도 또한 유사한 경향을 보이고 있다. 앞선 결과(Fig. 4b)와 마찬가지로 상층으로 갈수록 A(B)사의 센서가 B(A)사보다 다소 높게(낮게) 관측하였으나, 야간이 주간보다 평균적으로 적은 차이(0.2°C)를 보였다. 그리고 습도는 야간에도 주간과 비슷하게 평균 6.5%의 차이를 보였다.

Tables 6~7은 동일 고도에서의 두 제조사 각각의 온도와 습도 차이를 평균한 것인데, 지상부터 운정고도 이하의 관측값 차이, 구름층 내에서의 관측값 차이, 운정고도 이상부터 10 km까지의 관측값 차이의 평균이다. 전반적으로 관측값 차이는 미미한 수준이지만 A(B)사가 B(A)사보다 온도와 습도 모두 과대(과소) 측정함을 알 수 있다. 또한, 각 층별 RMSE (Root Mean Square Error)를 분석한 결과 운정고도부터 10 km까지의 RMSE가 지상에서 구름층의 RMSE값보다 증가하는 경향이 있었다. 각각의 센서가 구름층

Table 6. The bias (A-B) and RMSE (root mean square error) of observed temperature and humidity below the cloud base height, within the cloud layer and above the cloud top height between A and B radiosondes during the daytime.

Date (LST)	Variable	$\Delta D = A-B$			RMSE		
		< CBH	Cloud	> CTH	< CBH	Cloud	> CTH
2013/12/27 09:00	T (°C)	0.4	0.7	0.9	0.5	0.8	0.9
	RH (%)	12.0	6.3	12.9	13.1	6.4	13.7
2014/01/05 09:00	T (°C)	0.2	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
	RH (%)	-2.0	-3.7	-1.5	2.7	3.9	3.5
2014/01/20 09:00	T (°C)	0.0	0.4	0.7	0.8	0.4	0.8
	RH (%)	5.7	-1.8	4.9	7.2	2.4	9.4
2015/01/27 09:00	T (°C)	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
	RH (%)	6.5	10.2	10.1	7.0	11.6	10.6

$\Delta D = A-B$: difference of calculated data, < CBH: below the cloud base height, Cloud: within the cloud layer, > CTH: above the cloud top height.

Table 7. Same as Table 6, except for the nighttime.

Date (LST)	Variable	$\Delta D = A-B$			RMSE		
		< CBH	Cloud	> CTH	< CBH	Cloud	> CTH
2013/12/26 21:00	T (°C)	0.5	0.5	0.9	0.7	0.5	1.0
	RH (%)	8.0	10.5	9.4	8.2	10.5	9.6
2015/01/21 21:00	T (°C)	-0.1	-	0.1	0.2	-	0.2
	RH (%)	-5.3	-	7.9	6.7	-	14.0
2015/01/22 21:00	T (°C)	0.0	0.3	-0.4	0.0	0.2	0.7
	RH (%)	4.2	-1.1	7.4	4.8	1.2	7.9
2015/01/27 21:00	T (°C)	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3
	RH (%)	-4.2	-6.2	6.6	5.3	6.2	7.1

통과한 직후 관측값의 변화를 분석하여 센서별 민감도를 분석하고자 하였으나 우선 운정고도는 실제 관측값이 아닌 추정값이고, 또한 몇몇 사례에서는 추정값의 변동성이 커서 분석에 어려움이 있었다. 반면에 온도의 경우는 Fig. 4b(주간)에서 보는 바와 같이 구름층을 통과한 후 온도 차이가 감소하였음을 확인할 수 있었다. 이는 A(B)사가 B(A)사 보다 온도를 과대(과소) 측정하는데 구름층 통과후에는 차이가 감소하였다. 이러한 경향은 Fig. 5(야간)에서도 4개 중 3개의 사례(2015년 1월 21일, 22일 27일 2100 LST)에서 확인할 수 있었지만 향후 구름층 통과한 사례를 추가하여 각 센서의 민감도에 대한 정량적인 분석이 필요할 것이다.

3.2 초기장 영향 및 가강수량 비교

실험 초기에는 강릉원주대 옥상에 설치되어 있는 AWS의 관측값만을 이용하여 센서의 초기값에 입력하였다. 그러나 센서를 안정화시키는 동안 산출되는 온도와 습도 자료를 보면, 초기에 입력한 온도와 차

이가 있었기 때문에 관측값의 신뢰도를 높이기 위하여 건습구 온도계(psychrometer)를 추가 활용하여 관측하였으며, 특히 ESSAY-2015 기간에는 ESSAY-2014 보다 신뢰도를 향상시키기 위하여 통풍건습계와 자기온습도계를 설치하여 지상 기상자료의 정확도를 향상시키고자 노력하였다. 이러한 추가 절차를 통해 온도와 습도의 경우 다양한 측기의 관측값 중 보다 신뢰성 있는 초기 기상장을 입력할 수 있었다. 초기장 입력이 완료된 후 두 센서를 다양한 열원들로부터 이격시켜 관측자의 체온, 호흡 등으로 인한 온도와 습도의 변화량을 최소화시키기 위한 안정화 작업을 약 10분간 수행하였다. 전반적으로 볼 때, 초기 입력장은 각 변수의 대기 하층 관측 정확도 향상에 기여하지만 전체 고도에서 두 센서간의 차이에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Table 8은 라디오존데 관측결과를 이용한 가강수량을 계산한 값과 MWR로 관측된 가강수량의 값을 비교한 것이다. 라디오존데 관측 자료로 추정된 가강수

Table 8. Comparisons of the estimated PWV (mm) and IWV (mm) values using radiosonde and microwave radiometer.

		Day				
Data	Time	2013/12/27 09:00	2014/01/05 09:00	2014/01/20 09:00	2015/01/27 09:00	Mean
	PWV_A	5.3	6.8	7.0	5.7	6.2
	PWV_B	4.0	6.6	6.5	4.7	5.5
	ΔD (std)	0.8 (0.4)				
	IWV_MWR	4.5	7.0	6.8	5.1	5.9
RMSE	ΔD	1.4	0.2	0.5	1.0	0.8
	MWR-A	0.8	0.2	0.2	0.6	0.5
	MWR-B	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4

		Night				
Data	Time	2013/12/26 21:00	2015/01/21 21:00	2015/01/22 21:00	2015/01/27 21:00	Mean
	PWV_A	4.1	9.6	6.4	5.6	6.6
	PWV_B	3.0	9.6	5.8	5.5	6.0
	ΔD (std)	0.5 (0.4)				
	IWV_MWR	3.6	9.2	5.6	4.3	5.7
RMSE	ΔD	1.2	0.0	0.6	0.1	0.5
	MWR-A	0.5	0.4	0.8	1.3	0.8
	MWR-B	0.7	0.3	0.2	1.2	0.6

A-PWV: Calculated Precipitable Water Vapor using A Radiosonde, B-PWV: calculated Precipitable Water Vapor using B Radiosonde, $\Delta D = A-B$: difference of between A and B, IWV_MWR: Integrated Water Vapor using microwave radiometer, std: standard deviation.

량은 두 센서가 모두 비슷하게 나타났지만, 크기는 약 1.3 mm까지 차이가 발생하는 경우도 있었다. 두 센서의 추정된 가강수량 차이의 평균은 주야간 각각 0.8 mm, 0.5 mm이었다. 이와 같은 차이는 앞서 관측된 상대습도에 따라 결정되는 데, 앞에서 언급한 주·야간의 상대습도의 차이가 각각 6.1%, 6.5%이었기 때문에 이러한 상대습도의 변동 폭에 따라 가강수량의 오차가 발생한 것으로 생각된다. 추정된 가강수량의 차이를 볼 때 A(B)사의 상대습도 관측값이 B(A)사의 센서보다 높게(낮게) 관측하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 MWR과 두 센서의 가강수량을 비교 하였을 때, 0.2~1.3 mm의 차이를 보이고 있는데, 주간과 야간 본 사례에서는 B제조사 센서에서 추정된 가강수량이 MWR의 강수량보다 과소 추정하는 것을 확인할 수 있고, 야간의 경우에는 A제조사 센서의 가강수량이 MWR의 가강수량보다 과대 추정함을 보이고 있다.

현재 분석결과는 기준센서를 이용하여 정확도 평가를 한 것이 아니라 센서간의 특성을 파악함으로써 향후 기준센서와의 비교를 통해 정확도를 향상시키고자 하였으며, 또한 두 센서를 이용한 상층분석자료 해석에 도움을 주기 위하여 센서의 기본적인 특성을 이해

하고자 하였다. 물론 Kim et al. (2009) 연구와 유사하게 ECMWF 재분석자료와 GPS 가강수량을 기준값으로 정하고 관측값의 정확도 평가를 할 수도 있지만 재분석자료에는 이미 관측값이 포함되어 있고 GPS도 관측경로의 차이가 존재하기 때문에 관측값의 독립적인 일대일 관측값 비교가 이루어질 수 없는 한계가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강원 영동지역의 대설관측 캠페인 (ESSAY)의 일환으로 수행된 관측 실험 중 서로 다른 두 제조사의 라디오존데 센서의 특징과 기상조건별 차이를 분석하였다. 먼저 A와 B사 온도의 경우 주간과 야간에 평균 0.4°C, 야간에는 0.2°C 정도의 차이가 있음을 확인하였지만 습도의 경우 주·야간의 표준편차와 변동폭이 상대적으로 크게 나타났는데, 주간과 야간 평균이 각각 6.1%, 6.5%로 비슷하게 나타났다. 관측된 8개 사례에서 A(B)사의 온도와 습도 측정값이 B(A)사의 센서보다 일관되게 과대(과소) 관측하는 것으로 나타났다. 각 센서들의 온도와 습도 관측값을 비교한 결과 약 76.1%(46개의 sounding 관측 결과 중 35개)

가 양의 차이를 보이는 경향이 있어 A 측기가 B 측기보다 과대(과소) 관측 한다는 것을 알 수 있다.

우선 세 가지 라디오존데 비양방법을 상호 비교하여 자료 수신율 향상과 습도관측을 개선할 수 있었다. 또한 구름층을 통과하면서 온도와 습도의 차이를 비교한 결과, 습도보다 온도에서 약간의 차이를 확인할 수 있었지만 유의한 수준은 아니었다. 두 센서간의 관측값 차이를 발생시키는 다른 요인을 알아보기 위하여 초기에 입력된 관측값에 의한 효과를 분석하였다. 지상에 설치된 다양한 측기중에서 신뢰성이 높은 값을 선정하여 입력하고 비양한 결과, 초기 입력값의 차이가 일부 초기 시간을 제외하고는 상층에서 센서간의 관측 차이에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 가강수량 차이의 주야간 평균은 각각 0.8 mm, 0.5 mm로 나타났지만, 라디오존데 추정 가강수량과 MWR 가강수량과 비교할 때 일정한 경향을 확인할 수 없었다. 향후 다양한 사례에 대한 정량적인 비교 분석이 필요할 것으로 생각된다.

이와 같이 다양한 기상연구를 위해 국내에서는 라디오존데 관측이 실시되고 있지만, 라디오존데 센서간의 특성 분석은 부족한 실정이다. 본 연구의 비교 분석은 두 제조사 센서간의 정확도를 향상시키기 보다는 정밀도 향상을 위해 관측값 차이를 분석하고, 센서의 일정한 경향성을 확인하여 센서의 오류 개선 및 개발에 기여하고자 하였으며 이는 궁극적으로 전국적으로 수행되거나 연구목적의 상층기상 관측자료의 품질을 개선시킬 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 재해기상연구센터의 ‘강원영동지역겨울철 재해기상분석 및 예측기법개발’ 사업과 응용기상연구과의 ‘인공증설 실험 수치모델링기술 개발연구’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Durre, I., R. S. Vose, and D. B. Wuertz, 2006: Overview of the integrated global radiosonde archive. *J. Climate*, **19**, 53-68.
- Eskridge, R. E., J. K. Luers, and C. R. Redder, 2003: Unexplained discontinuity in the U.S. radiosonde temperature data. Part I: Troposphere. *J. Climate*, **16**, 2385-2395.
- Kim, K.-H., Y.-H. Kim, and D.-E. Chang, 2009: The analysis of changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part I. the assessment of the radiosonde data, *Atmosphere*, **19**, 213-226 (in Korean).
- Kwon, H. T., T. Iwabuchi, and G. H. Lim, 2007: Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observations over the Korean Peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 733-746.
- Lee, J. H., S. H. Eun, B. G. Kim, and S. O. Han, 2012: An analysis of low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region, *Atmosphere*, **22**, 209-219 (in Korean).
- Lorence, A. C., D. Barker, R. S. Bell, B. Macpherson, and A. J. Maycock, 1996: On the use of radiosonde humidity observations in mid-latitude NWP. *Meteor. Atmos. Phys.*, **60**, 3-17.
- Nakamura, H., H. Seko, and Y. Shoji, 2004: Dry biases of humidity measurements from the Vaisala RS80-A and Meisei RS2-91 radiosondes and from ground-based GPS. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 277-299.
- Nam, H. G., B. G. Kim, S. O. Han, C. K. Lee, and S. S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552.
- Seo, W. S., S. H. Eun, B. G. Kim, A. R. Ko, D. K. Seong, G. M. Lee, H. R. Jeon, S. O. Han, and Y. S. Park, 2015: Study on characteristics of snowfall and snow crystal habits in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign in 2014. *Atmosphere*, **25**, 261-270 (in Korean).
- Turner, D. D., B. M. Lesht, S. A. Clough, J. C. Liljegren, H. E. Revercomb, and D. C. Tobin, 2003: Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 117-132.
- Wang, J., H. L. Cole, D. J. Carlson, E. R. Miller, and K. Beierle, 2002: Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80- Radiosonde-Application to TOGA COARE data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 981-1002.
- _____, and L. Zhang, 2008: Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. *J. Climate*, **21**, 2218-2238.