

고고도 장기체공무인기 운영고도에서 해양 총가강수량 추정

조영준^{1),2)*} · 장현성³⁾ · 하종철¹⁾ · 최규용¹⁾ · 김기훈¹⁾ ·
임은하¹⁾ · 윤종환¹⁾ · 이재일¹⁾ · 성지인¹⁾
¹⁾국립기상과학원 관측예보연구과, ²⁾연세대학교 대기과학과,
³⁾서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2017년 6월 23일, 수정일: 2017년 8월 10일, 게재확정일: 2017년 8월 11일)

Estimation of Oceanic Total Precipitable Water from HALE UAV

Young-Jun Cho^{1),2)*}, Hyun-Sung Jang³⁾, Jong-Chul Ha¹⁾, Reno K. Y. Choi¹⁾, Ki-Hoon Kim¹⁾,
Eunha Lim¹⁾, Jong-Hwan Yun¹⁾, Jae-Il Lee¹⁾, and Ji-In Seong¹⁾

¹⁾Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Jeju, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

³⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 23 June 2017; revised 10 August 2017; accepted 11 August 2017)

Abstract In this study, the oceanic Total Precipitable Water (TPW) retrieval algorithm at 16 km altitude of High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle (HALE UAV) is described. Empirical equation based on Wentz method (1995) that uses the 18.7 and 22.235 GHz channels is developed using the simulated brightness temperature and SeeBor training dataset. To do radiative simulation, Satellite Data Simulator Unit (SDSU) Radiative Transfer Model (RTM) is used. The data of 60% (523) and 40% (349) in the SeeBor training dataset are used to develop and validate the TPW retrieval algorithm, respectively. The range of coefficients for the TPW retrieval at the altitude of 3~18 km with 3 km interval were 153.69~199.87 (α), 54.330~58.468 (β), and 84.519~93.484 (γ). The bias and RMSE at each altitude were found to be about -0.81 kg m^{-2} and 2.17 kg m^{-2} , respectively. Correlation coefficients were more than 0.9. Radiosonde observation has been generally operated over land. To validate the accuracy of the oceanic TPW retrieval algorithm, observation data from the Korea Meteorological Administration (KMA) Gisang 1 research vessel about six clear sky cases representing spring, autumn, and summer season is used. Difference between retrieved and observed TPW at 16 km altitude were in the range of $0.53\sim 1.87 \text{ kg m}^{-2}$, which is reasonable for most applications. Difference in TPW between retrieval and observation at each altitude (3~15 km) is also presented. Differences of TPW at altitudes more than 6 km were $0.3\sim 1.9 \text{ kg m}^{-2}$. Retrieved TPW at 3 km altitude was smaller than upper level with a difference of $-0.25\sim 0.75 \text{ kg m}^{-2}$ compared to the observed TPW.

Key words: HALE UAV, microwave radiometer, total precipitable water (TPW), Gisang 1 (research vessel), radiosonde

*Corresponding Author: Young-Jun Cho, Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: ☎ 개인정보 표시제한 Fax: +82-64-738-6513
E-mail: genesis19y@gmail.com

1. 서 론

총가강수량(Total Precipitable Water, TPW)은 대기 중 수증기가 액체 상태로 바뀌었을 때 양으로 대기 물순환(water cycle)을 이해하는데 있어 중요한 기상 요소 중 하나이다(Trenberth et al., 2007). 현재 진행 중인 지구온난화는 대기 중 수증기량 증가와 밀접하게 연관되어 있다. 대기 중 수증기는 CO₂와 더불어 주된 온실기체 중 하나로 기후학적 측면에서 전 지구 복사수지에 영향을 주어 지구온난화를 가속시키는 양의 되먹임(positive feedback) 효과가 있다(Held and Soden, 2000, 2006; Mears et al., 2007; Dai et al., 2011; Chung et al., 2014). 또한 강수 현상 시 물의 상 변화로 인해 대기 중으로 잠열이 방출되기 때문에 대기 대순환(general circulation)에 영향을 주고, 기상학적 측면에서 구름과 강수 발달에 영향을 준다. 특히 여름철 한반도에서 발생하는 집중호우는 한반도 남서 해상에서 유입되는 수증기량과 밀접하게 관련되어 있다(Park et al., 1983, 1986, 1989; Lee and Hong, 1989; Park et al., 2003; Song and Sohn, 2015). Kwon et al. (2013)과 Jung et al. (2014)은 한반도 중서부 지역의 집중호우 사례를 분석한 결과, TPW는 약 50~55 mm (kg m⁻²) 그리고 Jung et al. (2015)은 한반도 남서부 지역의 국지성 집중호우 사례에서 45~60 mm의 TPW가 관측되었음을 보고하였다. 따라서 시공간적으로 TPW의 변화를 상세히 관측하는 것은 기후적 측면뿐만 아니라 예보적인 측면에서도 중요한 요소이다.

TPW 관측에는 직접 관측인 라디오존데(radiosonde)와 지상, 위성, 그리고 항공기 기반의 원격탐사 방법이 있다. 원격탐사 방법에는 Global Positioning System (GPS), 적외(infrared), 그리고 마이크로파(microwave) 원리 등을 이용한다(Liou et al., 2001; Wang et al., 2007; McCarthy et al., 2009; Wulfmeyer et al., 2015). 라디오존데는 연직해상도가 높은 장점이 있지만 관측이 주로 육상에서 이루어지고 있고, 하루 2번(0000, 1200 UTC) 또는 4번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 정도 관측이 수행되기 때문에 시간적으로 연속적인 TPW의 변화를 이해하는데 한계가 있다. 위성기반의 적외와 마이크로파 방법은 공간적으로 광범위한 관측이 가능하다. 그러나 적외 방법은 구름이 존재할 경우 TPW 관측에 어려움이 있다. 반면 마이크로파 관측은 구름의 영향이 적어 대부분의 기상조건에서 TPW의 관측이 가능하다. 그러나 관측의 한계로 동일 지역에서 하루 2~3번 관측이 가능한 저궤도 위성에서만 관측이 이루어지고 있다. 지상기반 원격탐사는 시간적으로 고해상도의 관측이 가능하지만 라디오존데 관측과 마찬가지로 일부 육상에서만 관측이 이루어지고 있다. 항공기는 목표 지역의 관측이 가능하지만 기상

상태 그리고 연료보충의 문제로 운영에 제약이 따른다. 따라서 해상과 같은 관측 공백지역에서 높은 시공간적 분해능의 TPW 관측이 요구된다(Cho et al., 2015).

고고도 장기체공무인기(High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle, HALE UAV)는 대류권보다 상대적으로 대기가 안정한 성층권에서 운영되기 때문에 위성과 지상 관측의 장점인 광범위한 영역 그리고 연속적인 관측이 가능하게 된다. 또한 위험기상 발생 시 이동을 추적하며 관측을 수행할 수 있어 향후 유용한 자료를 제공할 것이다(Cho et al., 2015, 2016). 특히 여름철 한반도 남서 해상에 체공하여 한반도로 유입되는 수증기량의 변화를 관측할 수 있어 기상예보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 2017년 시범기로 운영될 고고도 장기체공무인기는 민·군 기술협력의 비전을 제시하는 다부처 협력사업으로 국립기상과학원, 국방과학연구소, 한국항공우주연구원, 한국에너지기술연구원 등 여러 연구기관들이 참여하고 있다. 국립기상과학원은 기상탐체제와 지상체 개발 및 활용연구(온도 프로파일 및 TPW 산출)를 수행하고 있고, 무인기의 운항안전을 위해 동아시아 지역의 성층권 기상특성 분석과 기상청 현업모델 기반의 기상 지원 체계 개발을 수행하였다. 그리고 무인기 운영시, 운항시나리오, 그리고 설계기준치 제시를 위해 지상과 고층기상 관측의 기온과 바람 등을 분석하였다(Cho et al., 2015, 2016). 또한 무인기 활용연구로 위성 유사센서에서 관측된 연직 기온자료를 이용하여 세계기상기구(WMO, 1957)에서 정의된 열적 대류권계면 고도를 추정하였다. 이를 통해 저기압의 급격한 발달과 관련된 대류권계면 접힘 현상 시 대류권계면 고도변화를 분석하여 하부 성층권의 영향을 연구하였다(Cho et al., 2014).

마이크로파 TPW 관측은 19, 22 GHz에 위치한 수증기(H₂O) 흡수 채널을 이용하여 다양하게 수행되어 왔다(Alishouse et al., 1990; Greenwald et al., 1993; Lojou et al., 1994; Petty, 1994; Schlüssel and Emery, 1990; Wentz, 1992, 1995; Stephens et al., 1996). 수증기 채널은 육상의 높은 지표 방출율(surface emissivity, $\epsilon \approx 0.8\sim 1.0$)로 인해 주로 해상($\epsilon \approx 0.4\sim 0.6$)에서만 TPW 산출이 이루어지고 있다(Liou, 2002). 본 연구에서는 해상과 같은 관측공백 지역의 연속적인 TPW 관측을 위해 고고도 장기체공무인기 운영고도(약 16 km)에서 통계적 TPW 추정 알고리즘을 개발하는데 목적이 있다. 알고리즘 개발을 위해 복사전달모형(Radiative Transfer Model, RTM)을 이용하여 밝기온도(brightness temperature, Tb) 모의를 수행하였다. 이렇게 개발된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 기상청 기상관측선(선박)인 기상1호의 해상 및 고층기상 관측자료를 이용하여 알고리즘의 정확도를 분석하였다. 이러한 결

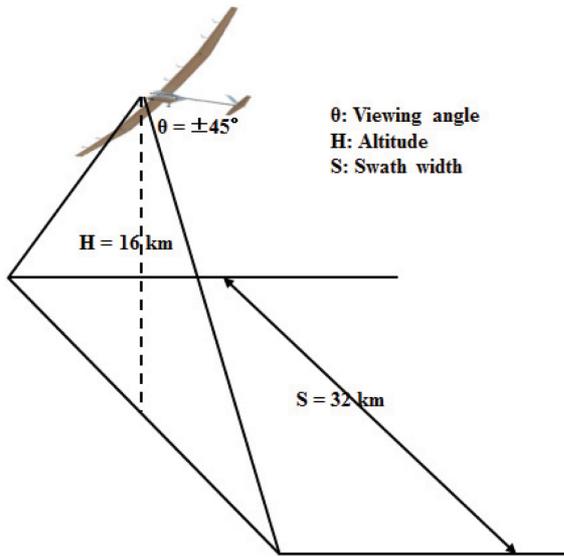


Fig. 1. Microwave radiometer scan geometry onboard HALE UAV from a 16 km altitude.

과는 향후 기상항공기, 기상위성 등 TPW 알고리즘 개발뿐만 아니라 상호비교 등의 사전연구 자료로 활용될 것이다.

2. 복사모형 및 TPW 산출 알고리즘

Figure 1은 무인기와 기상탑재체의 관측 구조를 보여준다. 현재 무인기는 약 16 km 이상의 고도에서 $\pm 45^\circ$ 보기각(viewing angle)에 대해 기상관측 자료를 수집할 계획이다. 16 km 고도에서 관측범위는 약 32

km이다. 무인기 고도에서 관측된 마이크로파 복사량(radiance)은 Rayleigh-Jeans 근사(approximation)에 의해 밝기온도와 선형적으로 비례한다. 따라서 무인기 고도에서 관측된 밝기온도(T_b)는 다음과 같이 정의된다(Carsey, 1982; Swift and Cavalieri, 1985).

$$T_b = \varepsilon T_{sfc} e^{-\tau} + T_{up} + (1 - \varepsilon) T_{down} e^{-\tau} + (1 - \varepsilon) T_{sp} e^{-2\tau}$$

여기서 ε 는 지표 방출율이고, T_{sfc} , T_{up} , T_{down} , 그리고 T_{sp} 는 지표온도, 상향 대기온도, 하향 대기온도, 그리고 우주배경온도(2.7 K)이다. $e^{-\tau}$ 는 대기투과도(transmissivity)이다. 첫 번째와 두 번째 항은 지표와 대기에서 상향 방출된 양이고, 세 번째와 네 번째 항은 대기에서 하향 방출된 양과 하향 우주배경온도(2.7 K)가 지표면에서 반사된 양이다.

Figure 2는 연구 흐름도로 TPW 산출 알고리즘 부분과 기상청 기상1호 관측자료를 이용한 검증으로 구분된다. TPW 산출 알고리즘은 통계적 방법을 이용하여 개발하였다. 이를 위해 TPW와 무인기 고도에서 복사모의된 밝기온도 값이 사용된다. 무인기 운영고도에서 마이크로파 복사모의를 수행하기 위해 일본 나고야 대학 Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC)에서 개발된 Satellite Data Simulator Unit (SDSU) 복사모형을 이용하였다(Masunaga et al., 2010). 이 모형은 가시, 적외, 마이크로파 스펙트럼 범위와 수동형(passive) 그리고 능동형(active) 관측 원리를 포함하고 있고, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center (GSFC)에서 활발히 사용되고 있다(Matsui et al., 2009, 2013). 복사모의를 위해 필요한 입력자료는 연직 온·습도, 지면기압, 해수면온도 등 대기과 지표면 정보가 사용된다.

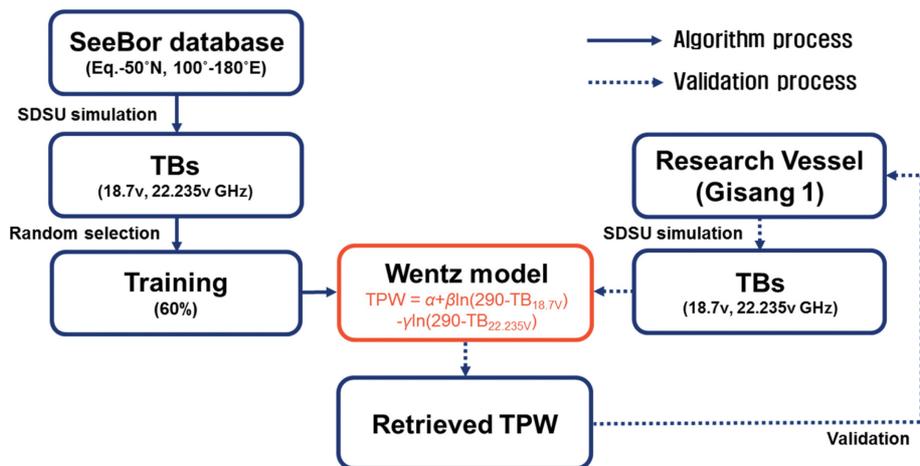


Fig. 2. Flow chart of TPW (kg m^{-2}) retrieval algorithm from radiative simulation and validation.

무인기 운영고도에서 해양 TPW를 산출하기 위해 강수 구름의 영향을 상대적으로 적게 받는 22 GHz 이하 채널을 이용한 Wentz 방법을 적용하였다(Wentz, 1995; Koo and Sohn, 2005). 이 방법은 수증기 흡수 채널인 18.7과 22.235 GHz를 이용한다. 18.7 GHz는 22.235 GHz 보다 상대적으로 약한 수증기 흡수 채널로 이 두 채널의 밝기온도 차이를 이용하여 수증기를 추정한다. Sohn et al. (1998)과 Sohn and Smith (2003)는 여러 TPW 산출 알고리즘을 비교한 결과, Wentz (1995) 방법이 가장 정확도가 높다고 보고한 바 있다. 사용된 Wentz 방법의 회귀식은 다음과 같다.

$$TPW = \alpha + \beta \ln(290 - Tb_{18.7v}) - \gamma \ln(290 - Tb_{22.235v})$$

여기서 $Tb_{18.7v}$ 와 $Tb_{22.235v}$ 는 무인기 고도에서 관측된 수직편파 18.7 GHz 그리고 22.235 GHz 밝기온도이고, α , β , 그리고 γ 는 계수이다. 무인기의 관측방식은 cross track scanning 방식이다. 따라서 관측 보기각에 따라 계수를 산출하였다. 또한 운영고도에 따라 TPW를 산출할 계획에 있기 때문에 계수를 고도별로 계산하였다. 육상의 경우, 지표 방출율이 높기 때문에 TPW 추정에 한계가 있어 TPW는 해상에서만 산출하였다.

TPW 산출 알고리즘 개발을 위한 입력자료로는 무인기 운영고도에서 모의된 18.7, 22.235 GHz 복사값과 그에 대응하는 TPW (kg m^{-2}) 값이다. TPW는 고도별 혼합비(mixing ratio; kg kg^{-1})를 이용하여 다음 식을 통해 환산하였다.

$$TPW = \frac{1}{g} \int_{P_{sfc}}^{P_H} q(P) dP$$

여기서 g 는 중력가속도(9.8 m s^{-2}), q 는 혼합비(kg kg^{-1}), 그리고 P_H 와 P_{sfc} 는 각각 무인기 운영고도 그리고 지표면에서 기압(hPa)이다.

3. 알고리즘 개발 및 검증에 사용된 자료

TPW 산출 알고리즘을 개발하기 위해 무인기 운영고도에서 복사모의를 수행하였다. 입력자료는 Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS)에서 제공하는 SeeBor v5.1 훈련자료를 이용하였다(Borbis et al., 2005). 과거 이 훈련자료를 이용하여 통계적 방법에 근거한 온도, 습도, 오존, 그리고 등 기상 요소 산출 알고리즘 연구가 다양하게 수행되어져 왔다(Li et al., 2000; Seemann et al., 2003). Seemann et al. (2003)은 Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) 적외 복사량으로부터 대기 온도, 습도, 그리고 오존 산출 연구를 수행하였다. 또한 Li et al. (2000)은 Advanced TIROS Operational Vertical Sounder

Table 1. SeeBor training dataset for the development of TPW (kg m^{-2}) retrieval algorithm.

Variables	
1	Temperature profile (K)
2	Mixing ratio profile (kg kg^{-1})
3	Surface pressure (hPa)
4	Skin temperature (K)
5	Surface wind speed (m s^{-1})
6	Fraction land
7	Elevation (m)
8	Total Precipitable Water (TPW; cm)

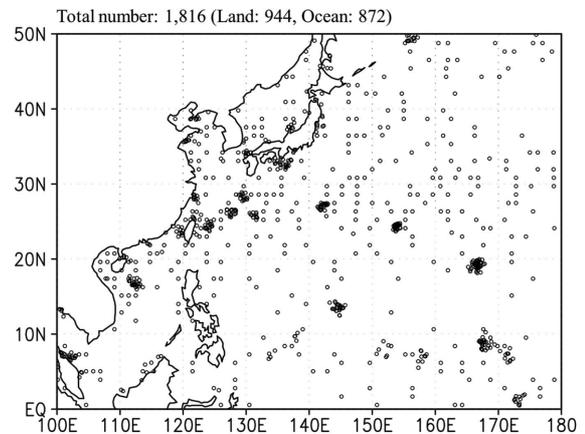


Fig. 3. Spatial distribution of SeeBor training dataset over East Asia region (Lat.: 0~50°N, Lon.: 100~180°E).

(ATOVS) 관측으로부터 온 · 습도 프로파일, 지표면 온도, 대기 총오존, 그리고 마이크로파 지표 방출률 등의 산출 알고리즘 개발 연구를 수행하였다.

SeeBor 훈련자료는 대기가 맑은 상태일 때의 자료로 1100~0.005 hPa 등압면 고도 사이에서 총 101개의 조밀한 연직 분해능을 지니고 있다. 지구에 대해 15,704개 프로파일(profile)이 분포되어 있고, 온도, 혼합비 등 대기정보와 지면기압, 지면온도, 풍속 등의 지면정보를 포함하고 있다(Table 1). Figure 3은 동아시아 영역(위도: 0~50°N, 경도: 100~180°E)에 분포하는 SeeBor 훈련자료의 분포를 보여준다. 육상과 해상에서 각각 944과 872개로 총 1,819개 프로파일이 분포하였다. 본 연구에서는 해상의 TPW 산출 알고리즘 개발을 위해 동아시아 영역 해상에 위치하는 872개 프로파일을 이용하였다.

라디오존데 고층기상 관측은 주로 육상에서 이루어지고 있다. 과거 해상에서의 고층 관측은 거의 전무한 실정이었다. 본 연구에서는 해상 TPW 산출 알고리즘 검증을 위해 해상에서 관측된 고층 관측이 요구



Fig. 4. The KMA research vessel (Gisang 1) operating (a) ocean meteorological observation, (b) upper level meteorological observation, and (c) ocean observation.

Table 2. Variables observed from KMA Gisang 1 research vessel.

		Variables
1	Upper level meteorological observation	Temperature (K) Pressure (hPa) Relative humidity (%) Wind speed ($m s^{-1}$) and direction ($^{\circ}$) Temperature (K) Pressure (hPa)
2	Ocean meteorological observation	Relative humidity (%) Irradiance ($W m^{-2}$) Visibility (km) Present weather Wind speed ($m s^{-1}$) and direction ($^{\circ}$) Wave height (m)
3	Ocean observation	Sea surface temperature (K) Salinity (‰) Sea current

된다. 기상청은 해양기상 관측을 목적으로 2011년 5월 30일부터 기상관측선인 기상1호를 운영하고 있다. 기상1호는 해상에서 기상을 관측하는 기상관측선용 선박으로 고층기상, 해상기상, 그리고 해양 관측 등의 임무를 수행하고 있다(Fig. 4). 총길이, 넓이, 그리고 총톤수는 각각 64.32 m, 9.4 m, 그리고 498톤이고, 항해거리는 4,000 mile (약 6,400 km)로 25일 이상 연속 항해가 가능하다. Table 2는 기상1호 관측 요소들을 보여준다. 자동고층기상관측장비(Automated Shipboard Aerological Program, ASAP), 선박용 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS), 자기수온염분수심 기록계(Conductive Temperature Depth, CTD) 등을 이용하여 수중 3 km에서 고층 20 km까지 기온, 기압, 바람, 습도, 시정, 현천, 해수면온도 등을 관측한다(Cha et al., 2016).

TPW 산출 알고리즘의 정확도를 분석하기 위해 기상1호에서 관측된 해양과 라디오존데 관측자료를 수집하였다. 본 연구에서는 기상1호 관측자료를 입력자료로 복사모의를 수행하였고, 모의된 밝기온도 값을 이용하여 TPW를 산출하였다. TPW 알고리즘 검증을 위해서 산출된 TPW와 관측된 TPW를 비교하였다. 세부적으로 계절별로 맑은 날을 선정하여 무인기 운영고도인 16 km 고도에서 산출된 TPW 값을 라디오존데 관측과 비교하였고, 계절 변동성을 확인하였다. 무인기는 대류권보다 상대적으로 대기가 안정한 약 16 km 하부 성층권에서 운영할 계획에 있다. 비교적 안정한 대기이지만 대류권계면 접힘현상(tropopause folding)이나 강한 대류현상(deep convection)이 발생하면 운영에 위험을 줄 수 있기 때문에 회피를 위해 무인기 고도가 변경될 수 있다. 따라서 고도에 따라 TPW를 산출하여 TPW 관측의 정확도를 조사할 필요가 있다. 현재 기상청 고층기상관측지침에 의하면 라디오존데 관측의 성공여부는 100 hPa 등압면 고도 도달 여부로 판단된다(KMA, 2009). 또한 대부분의 수증기(45~65%)는 850 hPa 이하 대류권 하층에 분포한다(Ross and Elliott, 1996). 본 연구에서는 3~16 km 사이에서 대표 고도를 선정하여 고도에 따라 TPW를 산출하였

Table 3. Coefficients for the TPW (kg m^{-2}) retrieval algorithm at each altitude.

Altitude (km)	Coefficients		
	α	β	γ
3	153.69	54.487	84.519
6	178.54	58.468	93.419
9	195.93	55.026	93.392
12	199.32	54.348	93.387
15	199.65	54.348	93.456
18	199.87	54.330	93.484

고, 지상에서 100 hPa 등압면 고도 사이에서 관측된 라디오존데 TPW와의 차이를 조사하였다.

4. 결 과

해양에서의 TPW 산출 알고리즘 개발을 위해 Wentz 방법의 경험적 관계식을 구하였다. 사용된 자료는 동아시아 지역에서 분포하는 해양 자료(872개) 중 60%에 해당하는 523개 자료를 이용하였고, 나머지 40%(349개)는 알고리즘 검증을 위해 사용하였다. Table 3은 고도에 따라 TPW 산출을 위한 α , β , 그리고 γ 계수를 보여준다. 계수는 3 km에서 무인기 운영고도를 포함하는 18 km 고도까지 3 km 간격으로 산출하였다. 통계적 계수 α , β , 그리고 γ 는 각각 153.69~199.87, 54.330~58.468, 그리고 84.519~93.484의 수치를 보였다. 12~18 km 고도에서는 계수들이 유사한 수치를 보였다.

SeeBor 훈련자료 중 40%에 해당하는 349개 자료를 이용하여 알고리즘 검증을 수행하였다. Table 4는 복사모의된 밝기온도로부터 산출된 TPW와 SeeBor TPW의 평균과 bias, RMSE (Root Mean Square Error), 그리고 상관계수(correlation coefficient)를 보여준다. 산출된 TPW의 평균은 고도에 따라 30.09~38.04 kg m^{-2} 로 분포하였고, SeeBor TPW는 31.32~38.85 kg m^{-2} 로 유사한 수치를 보였다. 15 km 이상 고도에서는 두 자료 모두 38.04와 38.84 kg m^{-2} 로 포화된 TPW 값을 보

Table 4. Statistics of retrieved and SeeBor TPW (kg m^{-2}) using 40% (349) of SeeBor dataset at each altitude.

Altitude (km)	Mean (kg m^{-2})		Bias (kg m^{-2})	RMSE (kg m^{-2})	Correlation coefficient
	Retrieved	SeeBor			
3	30.09	31.32	-1.23	2.73	0.987
6	36.60	37.42	0.82	2.20	0.995
9	37.85	38.65	-0.80	2.17	0.996
12	38.02	38.82	-0.80	2.17	0.996
15	38.04	38.85	-0.81	2.17	0.996
18	38.04	38.85	-0.81	2.17	0.996

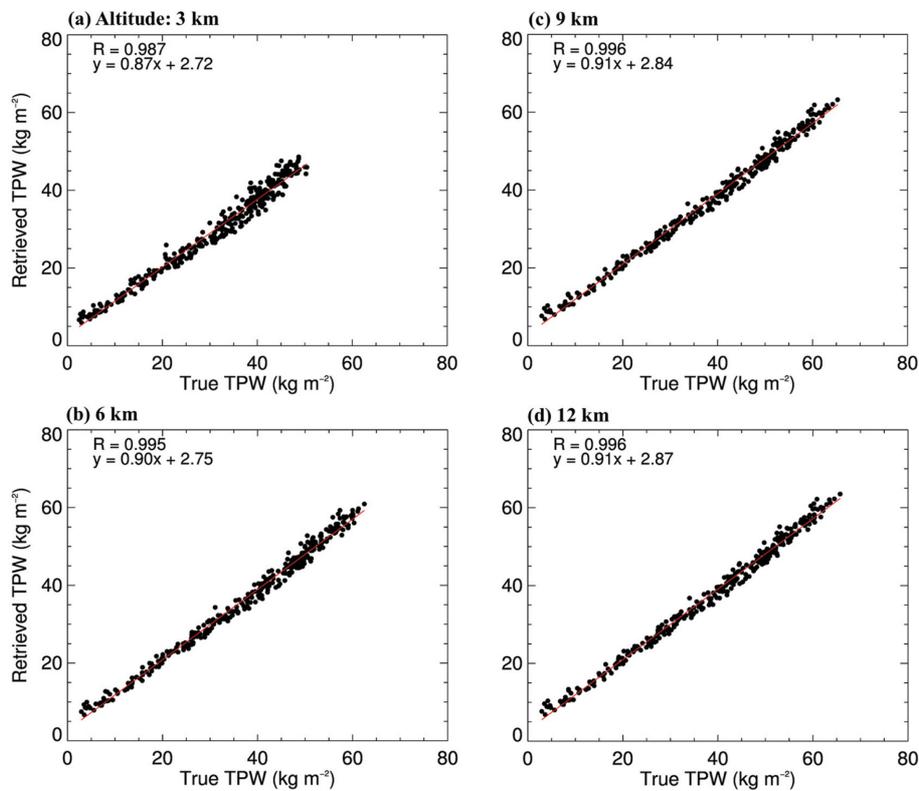


Fig. 5. Scatter diagram of retrieved and SeeBor (true) TPW at (a) 3 km, (b) 6 km, (c) 9 km, and (d) 12 km altitude. R indicates correlation coefficient.

였다. Bias는 6 km (0.82 kg m^{-2})고도를 제외하고 평균적으로 약 -0.81 kg m^{-2} 으로 음의 bias를 보였다. RMSE는 9 km 이상 고도에서는 2.17 kg m^{-2} 로 동일한 수치를 보였고, 3 km 고도와 비교했을 때, 약 0.7 kg m^{-2} 정도 낮은 수치였다. 상관계수는 모든 고도에서 약 0.99로 매우 높은 상관성을 보였다. Figure 5는 고도에 따라 산출된 TPW와 SeeBor TPW의 산포도를 보여준다. 일반적으로 모든 고도에서 두 자료간에 매우 좋은 상관성을 보였고, 고도가 증가할수록 기울기 값이 1에 가까워 더욱 선형적인 관계가 나타났다. 12 km 이상 고도에서의 산포도는 유사한 분포를 보여 그림에서 제외하였다.

개발된 해상 TPW 산출 알고리즘의 정확도를 분석하기 위해서 기상1호 관측이 수행된 계절별 맑은날을 선정하였다. 선정된 6개 사례는 여름, 가을, 봄철을 대표하는 맑은 날로 2015년 8월 28일 1200 UTC (Case 1)~29일 0000 UTC (Case 2), 11월 2일 1200 UTC (Case 3)~3일 0000 UTC (Case 4), 그리고 2016년 5월 29일 1200 UTC (Case 5)~30일 0000 UTC (Case 6)이다. 겨울철에는 조건을 만족하는 관측 사례를 찾기 어려워

이 연구에서 제외하였다(Fig. 6). 1과 2번 사례는 서해상의 위도 37.0°N , 경도 124.5°E 에서 관측이 수행되었고, 기상상황은 맑음으로 상대습도 약 65%, $1\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 의 약한 풍속과 30 km 이상의 시정이 관측되었다. 3과 4번 사례는 군산 앞바다 서해상(35.6°N 와 35.9°N , 126.1°E)에서 관측이 수행되었다. 상대습도는 50%, 풍속과 시정은 각각 $4.0\sim 4.5 \text{ m s}^{-1}$, 약 20 km로 맑은 기상상태를 보였다. 마지막으로 5와 6번 사례는 남서해상 신안지역(35.1°N , 125.1°E 와 125.9°E) 인근 해상에서 관측이 수행되었고, $4.0\sim 5.0 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속, 상대습도는 약 82%, 그리고 시정은 $2\sim 5 \text{ km}$ 로 박무현상이 관측되었다.

라디오존데 관측은 풍선의 수평이동(drift)으로 대기 상하층간에 시공간적 차이를 보인다(McGrath et al., 2006). 하지만 시간에 따라 상승하면서 공기괴와 함께 이동하므로 상층에서의 라디오존데는 비양된 지점에서 상층 공기를 관측한 것으로 볼 수 있다. Figure 7은 사례에 따라 16 km 무인기 운영고도에서 산출된 TPW와 기상1호 라디오존데에서 관측된 TPW 사이의 비교결과를 보여준다. 비교 결과, 약 $10\sim 30 \text{ kg m}^{-2}$ 로

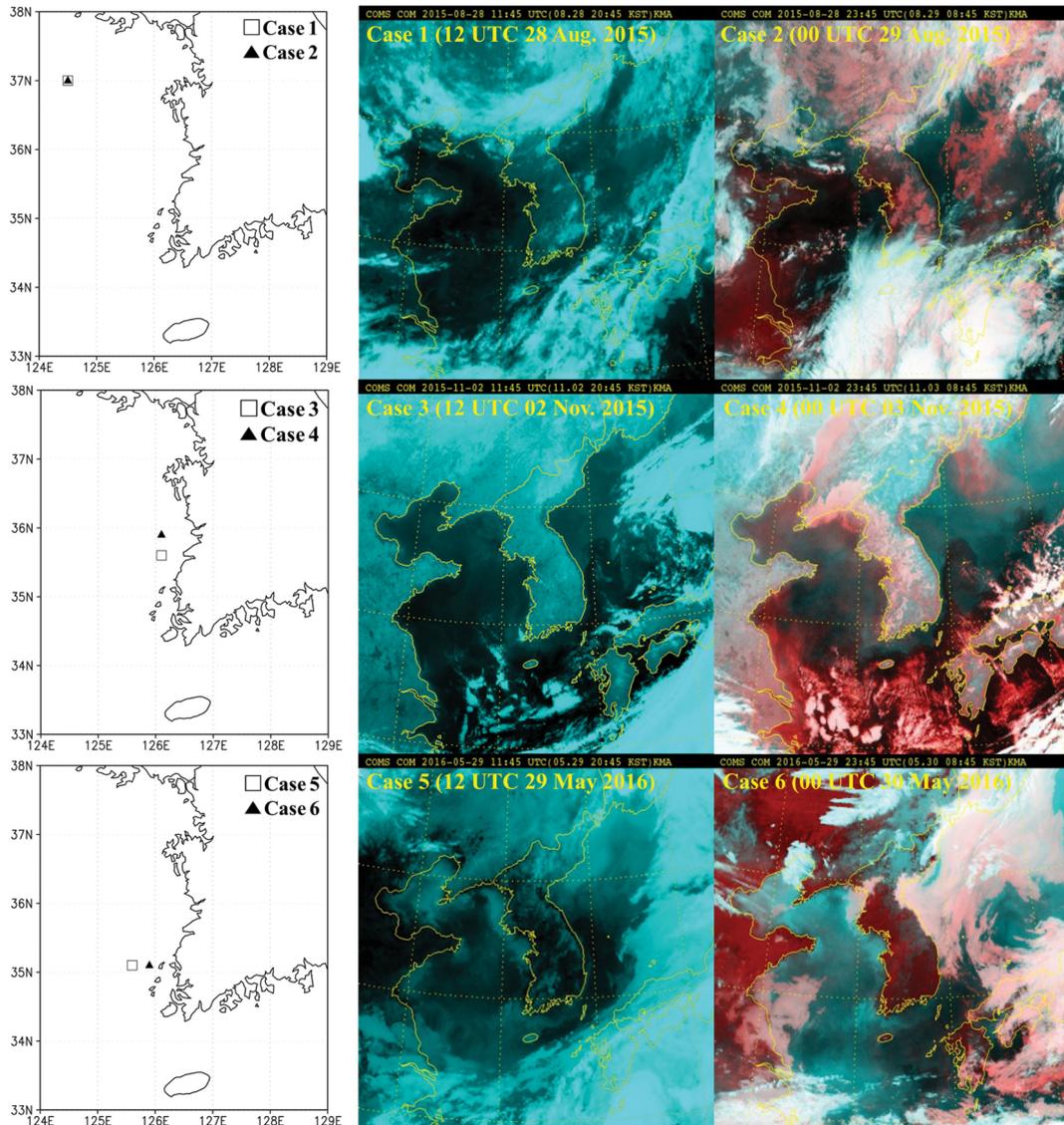


Fig. 6. Location of Gisang 1 observation and Communication Oceanic Meteorological Satellite (COMS) composite images. Clear sky cases selected in this study.

관측과 동일한 계절적 변동성을 보였고, 각 사례별로 TPW는 약 $0.53\sim 1.87 \text{ kg m}^{-2}$ 의 차이를 보였다(Table 5). Sohn and Smith (2003)은 7개 TPW 산출 알고리즘의 정확도를 분석한 결과, Wentz (1995) 방법이 RMSE가 2.46 kg m^{-2} 로 가장 좋은 성능을 보였다고 보고하였다. Kwon et al. (2007)은 GPS에서 추정된 TPW를 라디오존데와 검증한 결과, 2.45 kg m^{-2} 의 RMSE를 보고하였다. 앞서 40% SeeBor 훈련자료를 이용하여 알고리즘을 검증한 결과에서 RMSE는 약 2.17 kg m^{-2} 로 분석되었다. 또한 2015~2016년 동안 최

근의 대기상태에서도 관측과의 차이가 $0.53\sim 1.87 \text{ kg m}^{-2}$ 로 유의미한 결과가 산출됨을 확인하였다. 따라서 향후 무인기 운영 시 TPW 산출 알고리즘으로 적합한 것으로 판단된다.

무인기 고도에 따른 TPW의 정확도를 분석하기 위해 고도에 따라 TPW를 산출하여 관측과 비교하였다. Table 6은 선정된 사례에 대해 고도별로 산출된 그리고 관측된 TPW의 수치를 보여준다. 연직적인 특징을 살펴보면 여름철(Case 1, 2)에는 최하층과 최상층 사이의 TPW 차이가 약 6 kg m^{-2} 로 나타났다. 다른 사

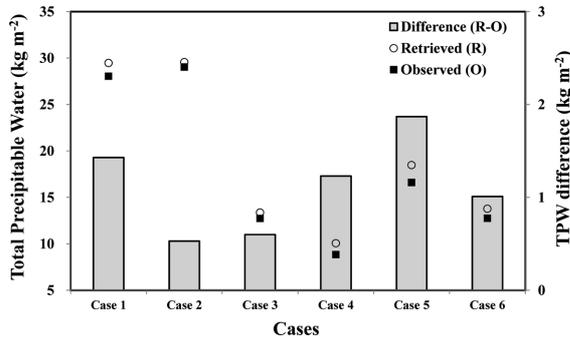


Fig. 7. Comparison between retrieved and observed TPW (kg m^{-2}) from Gisang 1 radiosonde.

례에서는 Case 5(약 2 kg m^{-2})를 제외하고 1 kg m^{-2} 이하의 연속적인 TPW 차이를 보였다. 모든 사례에서 9 km 이상 고도에서는 최상층과의 차이가 0.1 kg m^{-2} 이하로 고도가 증가할수록 포화된 특징을 보였다. 세부적으로 라디오존데에서 관측된 TPW와의 차이를 고도별로 조사하였다(Fig. 8). 6 km 이상 고도에서 산출된 TPW는 관측과 비교했을 때, 약 $0.3\sim 1.9 \text{ kg m}^{-2}$ 의 차이를 보였고, 각 사례에 따라 고도가 증가할수록 유사한 수치로 연속성을 보였다. 반면 3 km 고도에서는 차이 값이 약 $-0.25\sim 0.75 \text{ kg m}^{-2}$ 로 상층보다 상대적으로 하층에서 작게 나타났다. 또한 상층에서 관측된 TPW와 비교했을 때 3 km 고도에서 TPW의 양은 가

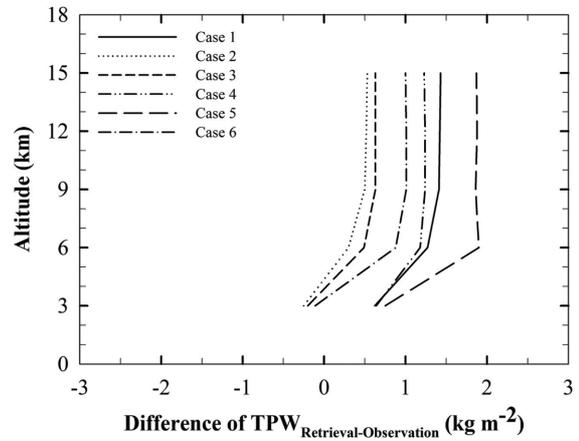


Fig. 8. Difference of TPW (kg m^{-2}) between retrieval and radiosonde observation at each altitude.

을(Case 3, 4)과 봄철(Case 5, 6)에 각각 91~92%와 88~95% 수준으로 나타났다. 반면 여름철(Case 1, 2)은 83%로 다른 계절과 비교했을 때, 약 10% 낮은 수준의 차이를 보여 상대적으로 수증기가 높은 고도까지 분포하고 있음을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 관측 공백지역인 해상에서 연속적인

Table 5. Difference between retrieved and observed TPW (kg m^{-2}) at 16 km altitude.

Date	TPW (kg m^{-2})		
	Retrieved	Observed	Diff. (Retrieved-Observed)
Case 1 (1200 UTC 28 Aug. 2015)	29.47	28.04	1.43
Case 2 (0000 UTC 29 Aug. 2015)	29.56	29.03	0.53
Case 3 (1200 UTC 02 Nov. 2015)	13.36	12.73	0.63
Case 4 (0000 UTC 03 Nov. 2015)	10.08	8.84	1.24
Case 5 (1200 UTC 29 May 2016)	18.47	16.60	1.87
Case 6 (0000 UTC 30 May 2016)	13.76	12.76	1.00

Table 6. The values of retrieved (Ret) and observed (Obs) TPW (kg m^{-2}) at 3~16 km altitudes.

Date	TPW (kg m^{-2}) at each altitude (km)									
	3 km		6 km		9 km		12 km		15 km	
	Ret	Obs	Ret	Obs	Ret	Obs	Ret	Obs	Ret	Obs
Case 1 (1200 UTC 28 Aug. 2015)	23.74	23.12	28.62	27.35	29.35	27.94	29.46	28.04	29.47	28.04
Case 2 (0000 UTC 29 Aug. 2015)	23.96	24.21	28.86	28.56	29.49	28.99	29.55	29.03	29.56	29.03
Case 3 (1200 UTC 02 Nov. 2015)	11.54	11.74	13.14	12.65	13.34	12.71	13.36	12.73	13.36	12.73
Case 4 (0000 UTC 03 Nov. 2015)	8.64	8.00	9.79	8.61	10.06	8.82	10.08	8.84	10.08	8.84
Case 5 (1200 UTC 29 May 2016)	15.31	14.56	17.44	15.54	18.31	16.45	18.47	16.59	18.47	16.60
Case 6 (0000 UTC 30 May 2016)	11.95	12.06	13.38	12.50	13.67	12.66	13.76	12.75	13.76	12.76

TPW 산출을 위해 무인기 운영고도에서 TPW 산출 알고리즘을 개발하였다. 또한 해양기상 관측을 목적으로 하는 기상청 기상1호 관측자료를 이용하여 TPW 산출 알고리즘의 정확도 연구를 수행하였다. TPW 산출 알고리즘은 통계적 방법인 Wentz 방법을 이용하였다. 무인기 운영고도에서 밝기온도는 일본 나고야 대학에서 개발된 SDSU 모델을 이용하여 모의하였고, 입력자료는 CIMSS에서 제공된 SeeBor 훈련자료를 이용하였다. 훈련자료 중 동아시아 지역 해양에 분포하는 872개 자료를 활용하였다. TPW 알고리즘 개발과 검증에 872개 자료 중 60% (523개)와 40% (349개)에 해당하는 자료를 각각 적용하였다.

모의된 밝기온도와 그에 대응하는 SeeBor TPW 값을 이용하여 TPW 산출 알고리즘의 계수를 3~18 km 고도에 대해 3 km 간격으로 계산하였다. α , β , 그리고 γ 계수는 각각 153.69~199.87, 54.330~58.468, 그리고 84.519~93.484로 분포하였다. 총 자료 중 40% (349개)에 해당하는 SeeBor 훈련자료를 이용하여 알고리즘을 검증한 결과, 대부분의 고도에서 bias와 RMSE는 각각 약 -0.81 kg m^{-2} 와 2.17 kg m^{-2} 로 나타났다. 그리고 상관 계수는 0.9 이상으로 높은 수치를 보였다.

라디오존데 고층관측은 주로 육상에서 이루어지고 있어 해양 TPW와 같이 원격탐사로 관측된 기상요소의 검증에 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 해양기상 관측을 목적으로 하는 기상1호 관측자료를 이용하여 무인기 TPW 산출 알고리즘의 정확도를 분석하였다. 최근 여름, 가을, 봄철을 대표하는 6개 사례를 선정하였다. 겨울철은 기상1호 관측 사례를 찾기 어려워 연구에서 제외하였다. 산출된 TPW를 관측과 비교한 결과, 계절에 따라 동일한 변동성을 보였고, 차이 값은 $0.53\sim 1.87 \text{ kg m}^{-2}$ 로 기존 연구결과와 비교했을 때, 유의미한 결과가 산출되고 있음을 확인하였다. 무인기 고도에 따른 TPW의 정확도를 분석하였다. 6 km 이상 고도에서 산출된 TPW는 라디오존데 관측과 약 $0.3\sim 1.9 \text{ kg m}^{-2}$ 로 고도가 증가할수록 유사한 수치를 보였다. 반면 3 km 고도에서는 $-0.25\sim 0.75 \text{ kg m}^{-2}$ 로 높은 고도에 비해 상대적으로 낮은 수치를 보였다. 기상청은 향후 기상항공기, 극궤도 기상위성 등을 운영할 계획에 있다. 본 논문의 연구 결과는 새로운 기상관측의 사전연구 자료로 활용될 것으로 기대된다. 향후 무인기 운영 시 실제 관측된 TPW 자료를 이용하여 고도, 시야각 등 다양한 조건에 따라 관측 정확도를 분석할 계획이다.

감사의 글

해양기상관측을 위해 수고해주신 기상청 기상관측선(기상1호) 직원 분들께 진심으로 감사드립니다. 이

한국기상학회 대기 제27권 3호 (2017)

연구는 국립기상과학원의 ‘기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)’ 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alishouse, J. C., S. A. Snyder, J. Vongsathorn, and R. R. Ferraro, 1990: Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **28**, 811-816.
- Borbás, E. E., S. W. Seemann, H.-L. Huang, J. Li, and W. P. Menzel, 2005: Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity. *Proc. Int. ATOVS Study Conf. XIV*, Beijing, China, CIMSS/University of Wisconsin-Madison, 763-770.
- Carsey, F. D., 1982: Arctic sea ice distribution at end of summer 1973-1976 from satellite microwave data. *J. Geophys. Res.*, **87**, 5809-5835.
- Cha, J. W., H.-J. Ko, B. Shin, H.-J. Lee, J. E. Kim, B. Ahn, and S.-B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol mass concentration and chemical composition of the Yellow and South Sea around the Korean peninsula using a Gisang 1 research vessel. *Atmosphere*, **26**, 357-372, doi:10.14191/Atmos.2016.26.3.357 (in Korean with English abstract).
- Cho, Y.-J., D.-B. Shin, T.-Y. Kwon, J.-C. Ha, and C.-H. Cho, 2014: Retrieval of thermal tropopause height using temperature profile derived from AMSU-A of Aqua satellite and its application. *Atmosphere*, **24**, 523-532, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.523 (in Korean with English abstract).
- _____, K.-D. Ahn, H.-C. Lee, J.-C. Ha, R. K. Y. Choi, C.-H. Cho, and S.-B. Kim, 2015: The analysis of meteorological environment over Jeju Moseulpo region for HALE UAV. *J. Korea Institute Mil. Sci. Technol.*, **18**, 469-477, doi:10.9766/KIMST.2015.18.4.469 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-C. Ha, R. K. Y. Choi, K.-H. Kim, E. Lim, S.-B. Kim, and J.-H. Yun, 2016: Vertical analysis of wind speed over South Korea for the flight safety of HALE UAV. *J. Korea Institute Mil. Sci. Technol.*, **19**, 551-558, doi:10.9766/KIMST.2016.19.4.551 (in Korean with English abstract).
- Chung, E.-S., B. Soden, B. J. Sohn, and L. Shi, 2014: Upper-tropospheric moistening in response to anthropogenic warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **111**, 11636-11641, doi:10.1073/pnas.1409659111.
- Dai, A., J. Wang, P. W. Thorne, D. E. Parker, L. Haimberger, and X. L. Wang, 2011: A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J. Cli-*

- mate*, **24**, 965-991, doi:10.1175/2010JCLI3816.1.
- Greenwald, T. J., G. L. Stephens, T. H. Vonder Haar, and D. L. Jackson, 1993: A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations. *J. Geophys. Res.*, **98**, 18471-18488.
- Held, I. M., and B. J. Soden, 2000: Water vapor feedback and global warming. *Annu. Rev. Energ. Env.*, **25**, 441-475.
- _____, and _____, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, **19**, 5686-5699.
- Jung, S.-P., T.-Y. Kwon, and S.-O. Han, 2014: Thermodynamic characteristics associated with localized torrential rainfall events in the middle west region of Korean peninsula. *Atmosphere*, **24**, 457-470, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.457 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, _____, J.-H. Jeong, J. K. Shim, and B.-C. Choi, 2015: Thermodynamic characteristics associated with localized torrential rainfall events in the southwest region of the Korean peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 229-237, doi:10.1007/s13143-015-0073-6.
- KMA, 2009: Guidelines for upper air observation. KMA, 238 pp (in Korean).
- Koo, J.-Y., and B.-J. Sohn, 2005: Development of water vapor retrieval algorithm from the sensor simulations for AMSR and HSB of Aqua satellite. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 625-638 (in Korean with English abstract).
- 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. Meteorol. Soc. Japan*, **85**, 733-746.
- Kwon, T.-Y., J.-S. Kim, and B.-G. Kim, 2013: Comparison of the properties of Yeongdong and Yeongseo heavy rain. *Atmosphere*, **23**, 245-264, doi:10.14191/Atmos.2013.23.3.245 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.-K., and S.-Y. Hong, 1989: Numerical experiments of the heavy rainfall event occurred over Korea during 1-3 September 1984. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 233-260.
- Li, J., W. W. Wolf, W. P. Menzel, W. Zhang, H.-L. Huang, and T. H. Achor, 2000: Global sounding of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 1248-1268.
- Liou, K. N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation. Second Edition*. Academic Press, San Diego, 583 pp.
- Liou, Y.-A., Y.-T. Teng, T. V. Hove, and J. C. Liljegren, 2001: Comparison of precipitable water observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 5-15.
- Lojou, J.-Y., R. Benard, and L. Eymard, 1994: A simple method for testing brightness temperatures from satellite microwave radiometers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 387-400.
- Masunaga, H., and Coauthors, 2010: Satellite data simulator unit: A multisensor, multispectral satellite simulator package. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1625-1632, doi:10.1175/2010BAMS2809.1.
- Matsui, T., X. Zeng, W.-K. Tao, H. Masunaga, W. S. Olson, and S. Lang, 2009: Evaluation of long-term Cloud-Resolving Model simulations using satellite radiance observations and multifrequency satellite simulators. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1261-1274.
- _____, and Coauthors, 2013: GPM satellite simulator over ground validation sites. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **94**, 1653-1660, doi:10.1175/BAMS-D-12-00160.1.
- McCarthy, M. P., P. W. Thorne, and H. A. Tichener, 2009: An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes. *J. Climate*, **22**, 5820-5838.
- McGrath, R., T. Semmler, C. Sweeney, and S. Wang, 2006: Impact of balloon drift errors in radiosonde data on climate statistics. *J. Climate*, **19**, 3430-3442.
- Mears, C. A., B. D. Santer, F. J. Wentz, K. E. Taylor, and M. F. Wehner, 2007: Relationship between temperature and precipitable water changes over tropical oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L24709, doi:10.1029/2007GL031936.
- Park, C. H., H. W. Lee, and W. S. Jung, 2003: The effects of low-level jet and topography on heavy rainfall near Mt. Jirisan. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 441-458 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-U., S.-S. Kim, and G.-H. Lim, 1983: Low level jets associated with severe storms over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **19**, 20-36.
- _____, C.-H. Joung, S.-S. Kim, D.-K. Lee, S.-C. Yoon, Y.-K. Jeong, and S.-G. Hong, 1986: Synoptic-scale features of the heavy rainfall occurred over Korea during 1-3 September 1984. *J. Korean Meteor. Soc.*, **22**, 42-81.
- _____, H.-J. Ahn, and Y.-S. Chun, 1989: Evolution of synoptic scale features associated with a long-lived convective system (21-23 July 1987). *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 168-191.
- Petty, G. W., 1994: Physical retrievals of over-ocean rain

- rate from multichannel microwave imagery. Part II: Algorithm implementation. *Meteor. Atmos. Phys.*, **54**, 101-121.
- Ross, R. J., and W. P. Elliott, 1996: Tropospheric water vapor climatology and trends over North America: 1973-93. *J. Climate*, **9**, 3561-3574.
- Schuessel, P., and W. J. Emery, 1990: Atmospheric water vapour over oceans from SSM/I measurements. *Int. J. Remote Sens.*, **11**, 753-766.
- Seemann, S. W., J. Li, W. P. Menzel, and L. E. Gumley, 2003: Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 1072-1091.
- Sohn, B.-J., and E. A. Smith, 2003: Explaining source of discrepancy in SSM/I water vapor algorithm. *J. Climate*, **16**, 3229-3255.
- _____, D.-H. Kim, and H.-S. Chung, 1998: Examining total precipitable water from SSM/I and TOVS over the East Asian summer monsoon region. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 79-93.
- Song, H.-J., and B.-J. Sohn, 2015: Two heavy rainfall types over the Korean peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 363-382.
- Stephens, G. L., D. L. Jackson, and I. Wittmeyer, 1996: Global observations of upper-tropospheric water vapor derived from TOVS radiance data. *J. Climate*, **9**, 305-326.
- Swift, C. T., and D. J. Cavalieri, 1985: Passive microwave remote sensing for sea ice research. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, **66**, 1210-1212.
- Trenberth, K. E., L. Smith, T. Qian, A. Dai, and J. Fasullo, 2007: Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. Hydrometeorol.*, **8**, 758-769.
- Wang, J., L. Zhang, A. Dai, T. Van Hove, and J. Van Baelen, 2007: A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, **112**, D11107, doi:10.1029/2006JD007529.
- Wentz, F. J., 1992: Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **30**, 960-972.
- _____, 1995: The intercomparison of 53 SSM/I water vapor algorithms. Remote Sensing Systems Tech. Rep. on WetNet Water Vapor Intercomparison Project (VIP). Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 19 pp.
- World Meteorological Organization, 1957: A three-dimensional science. *WMO Bull.*, **6**, 134-138.
- Wulfmeyer, V., R. M. Hardesty, D. D. Turner, A. Behrendt, M. P. Cadetdu, P. D. Girolamo, P. Schlüssel, J. V. Baelen, and F. Zus, 2015: A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles. *Rev. Geophys.*, **53**, 819-895, doi:10.1002/2014RG000476.