

GPS 가강수량 산출을 위한 최소 관측세션 지속시간에 대한 분석

김유준^{1),2),*} · 한상옥¹⁾ · 김기훈¹⁾ · 김선정¹⁾ · 김건태¹⁾ · 김병곤²⁾

¹⁾국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터, ²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2014년 5월 15일, 게재확정일: 2014년 8월 22일)

An Analysis of the Least Observing-Session Duration of GPS for the Retrieval of Precipitable Water Vapor

Yoo-Jun Kim^{1),2),*}, Sang-Ok Han¹⁾, Ki-Hoon Kim¹⁾, Seon-Jeong Kim¹⁾,
Geon-Tae Kim¹⁾, and Byung-Gon Kim²⁾

¹⁾High Impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Gangneung, Korea

²⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 15 May 2014; accepted 22 August 2014)

Abstract This study investigated the performances of precipitable water vapor (PWV) retrieval from the sets of ground global positioning system (GPS) signals, each of which had different length of observing-session duration, for the purpose of obtaining as short session duration as possible that is required at the least for appropriate retrieval of the PWV for meteorological usage. The shorter duration is highly desirable to make the most use of the GPS instrument on board the mobile observation vehicle making measurements place by place. First, using Bernese 5.0 software the PWV retrieval was conducted with the data sets of GPS signals archived continuously in 30 seconds interval during 2-month period of January and February, 2012 at Bukgangneung site. Each of the PWVs produced independently using different session durations was compared to that of radio-sonde launched at the same GPS location, a Bukgangneung site. Second, the same procedure was done using the data sets obtained from the mobile observation vehicle that was operating at Boseong area in Jeonnam province during Changma observation campaign in 2013, and the results were compared to that at Bukgangneung site. The results showed that as the observing-session duration increased the retrieval errors decreased with the dramatic change happening between 3 and 4 hours of the duration. On average, the root mean square error (RMSE) of the retrieved PWV was around 1 mm for the durations of greater than 4 hours. The results at both the Bukgangneung (fixed site) and Boseong (mobile vehicle) seemed to be fairly comparable with each other. From this study it is believed that at least 4 hours of observing-session duration is needed for the retrieval of PWV from the ground GPS for meteorological usage using Bernese 5.0 software.

Key words: PWV, GPS, a mobile observation vehicle, an observing-session duration

*Corresponding Author: Yoo-Jun Kim, High Impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, 7 Jukheon-gil, Gangneung 210-702, Korea.
Phone : +82-70-7850-6632, Fax : +82-33-644-2657
E-mail : yoojun@korea.kr

1. 서 론

전 지구 평균기온 상승과 이상 기후변화로 인하여 전 세계적으로 재해기상 현상들이 자주 발생하고 있으며, 국내에서도 최근 들어 국지적인 집중호우, 대형 태풍, 폭설 등으로 인한 피해가 급증하고 있다. 재해기상을 일으키는 에너지원은 대기중의 수증기라 할 수 있는데, 이를 정확히 관측하고 감시하는 것은 재해기상을 예방하는 지름길이라 할 수 있다. 지상 Global Positioning System (GPS) 관측을 통한 가강수량 (Precipitable Water Vapor, PWV) 산출 기술은 수치예보모델의 강수 예측능력 향상, 위성 또는 재분석 자료의 검증, 기후변화 감시 등 다양한 기상 분야의 연구에 활용되고 있다(Kuo *et al.*, 1993; Gradinarsky *et al.*, 2002; Dietrich *et al.*, 2004).

대기 중 수증기량 즉, 가강수량 산출을 위한 관측들을 살펴보면 라디오존데(Radiosonde), Microwave Radiometer (MWR), 그리고 인공위성 등의 원격탐사(Remote Sensing)를 이용한 방법이 있다. 하지만 시·공간적인 관측 한계, 강수발생 시 관측 간섭, 구름 등 대기 상태의 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 이러한 측면에서 GPS는 대기 상태에 상관없이 상시 관측이 가능하며 설치 및 유지비용이 적게 들고, 라디오존데 또는 MWR의 가강수량 기준값과 비교하여 정확도 및 정밀도가 우수한 것으로 알려져 있다(Nam *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2009).

한편 이동체에서 GPS 관측 연구결과들을 살펴보면, Daud *et al.* (2008)이 2004년 일본 Kii 반도 남동쪽 해상에서 지진 발생 시 GPS 부이와 지상관측소 간의 장거리 기선 동적(Kinematic) GPS 방법을 이용하여 해일(tsunami)의 위협을 조기에 탐지할 수 있음을 제시하였고, Martin *et al.* (2012)은 항공, 선박, 차량, 도보 등의 이동 GPS 관측 자료를 다양한 후처리 소프트웨어를 통해 동적 정밀단독측위(Precise Point Positioning, PPP) 방식의 위치 추정을 수행한 결과 항공 관측에서 가장 좋은 정확도(10 cm 이상)를 나타냈음을 확인하였다. 또한 필리핀 해판(Philippine Sea Plate, PSP)의 움직임과 PSP와 유라시아 판의 경계 지역에서 발생하는 지각 변동 특성을 파악하기 위하여 선박, 부이 등 여러 개의 이동체 GPS 관측을 활용한 연구결과도 있다(Chen *et al.*, 2011). 하지만 이동체에서 GPS 관측을 활용한 대부분의 선행 연구들은 지질, 측지 분야 등의 연구에만 국한될 뿐 가강수량 추정 등 기상 분야의 연구는 상대적으로 드문 실정이다. 국내에서도 지난 2011년 기상청에서 해양기상 관측선인 기상 1호에 GPS 장비를 설치·운영 중에 있으나 이동체 GPS 관련 연구결과는 부족하다. 더욱이 우리나라와 같이 복잡한 지형과 국지적인 강수현상이 빈번한 지

역에서는 내륙에서 신속한 이동 및 추적이 가능하며 현장에서 고층관측을 동시에 수행할 수 있는 이동식 기상관측차량시스템의 GPS 또는 라디오존데 관측이 요구된다.

또한 기상관측차량시스템의 목표관측 지점에서 GPS 고정관측을 수행하려면 미국 해양 대기청(NOAA)에서 운영하는 Online Positioning User Service (OPUS; <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>)에서 명시한 바와 같이 적정 수준 이상의 GPS 관측 시간이 필요하다. Eckl *et al.* (2001)은 미국 국가측지국(NGS)에서 개발된 GPS 자료 처리 및 위성궤도 결정 소프트웨어(PAGES)를 활용하여 GPS 3차원 위치 결정의 정확도를 높이기 위한 기선(baseline) 거리 및 관측시간 범위를 언급하였으며, Psimoulis *et al.* (2004)은 그리스에서 6일간 관측한 GPS 자료를 이용하여 짧은(20 m) 기선 거리에서 효율적인 GPS 고정관측 시간(3시간)을 제시한 바 있다. 국내에서도 파주시와 고양시 일대의 지적보조삼각점 6점을 측량하여 관측시간에 따른 좌표(2차원)의 오차 분석을 수행한 결과, 4시간 이하의 관측에서도 고정 관측소와의 거리가 30 km 이내에 존재한다면 허용오차(1.5 cm) 내의 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다(Kim *et al.*, 2010b). 그러나 현재까지 국내·외의 선행연구들은 2차원 또는 3차원 위치 결정의 정확성을 위한 GPS 관측시간 분석 등 측량 분야의 연구에만 주안점을 두었기 때문에 GPS 고정관측 시간에 따른 가강수량 산출 결과의 오차 분석 등과 같은 기상학 관련 GPS 활용 연구가 더욱 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 국립기상연구소 재해기상연구센터가 보유한 기상관측차량시스템의 GPS 고정관측 시 유의한 수준의 가강수량 산출을 위한 최적의(optimum) 관측시간 결정 등에 관한 사전 테스트를 위해 2012년 겨울철 특별관측기간 북강릉 관측소(강원청)의 GPS 자료를 활용하여 각 관측세션의 지속시간(observing-session duration)에 따른 가강수량 산출 결과의 통계적 오차 분석을 수행하였다. 또한 2013년 여름철 집중관측기간(보성) 기상관측차량시스템의 GPS 관측 자료를 이용하여 품질검사를 수행한 후 가강수량 산출 방법을 소개하고자 하였다. 마지막으로 기상관측차량시스템의 GPS 고정관측 기간에 한해 앞서 수행하였던 실험과 동일한 방법으로 각 관측세션의 지속시간에 따른 가강수량 산출 결과의 오차 분석을 수행한 후 고정관측소(북강릉)의 결과와 비교하였다.

2. 연구방법

기상관측차량시스템의 목표관측 시 효율적이면서 정확도를 높일 수 있는 최적의 GPS 고정관측 시간

Table 1. Session designations[@]. Reproduced from Eck *et al.* (2001).

Session duration (h)	Session/occupation times (UTC)							Sessions #
	a	b	c	d	e	f	...	
1 H	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	...	24
2 H	00-02	02-04	04-06	06-08	08-10	10-12	...	12
3 H	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	...	8
4 H	00-04	04-08	08-12	12-16	16-20	20-24		6
6 H	00-06	06-12	12-18	18-24				4
8 H	00-08	08-16	16-24					3
12 H	00-12	12-24						2
24 H	00-24							1

[@]For 60 days and 7 baselines including IGS site.

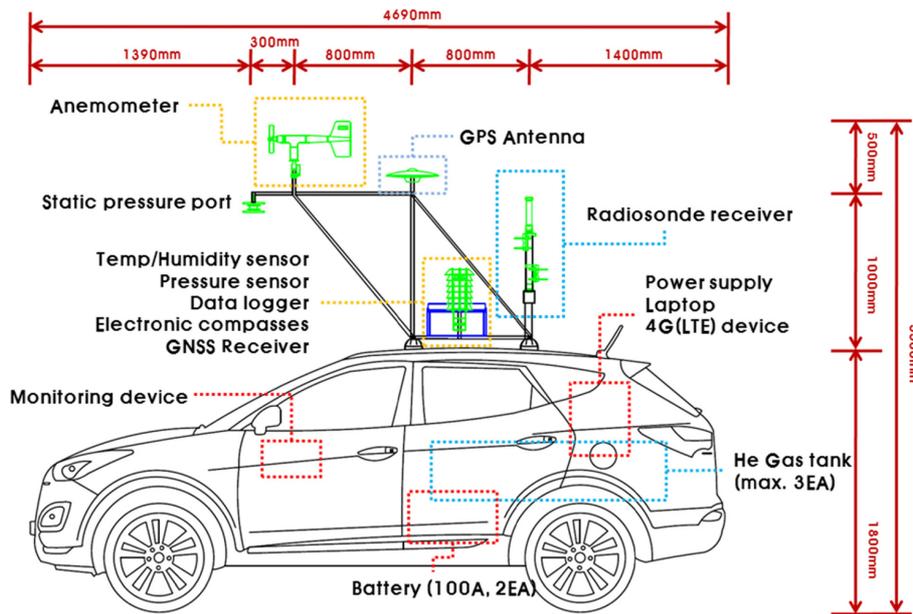


Fig. 1. Detailed block diagram of Mobile Atmospheric Observing System (MAOS).

결정을 위한 사전 연구를 수행하기 위해 연속적인 고정관측이 가능하며, 다수의 검증자료(라디오존데, MWR) 확보가 가능했던 2012년 겨울철 특별관측기간(1월 1일~2월 29일) 북강릉 관측소(강원청)의 GPS 자료를 활용하였다. 본 논문에서는 편의상 기상관측차량시스템(Mobile Atmospheric Observing System)을 영문 약자인 “MAOS”라 부르기로 한다. 실험 방법은 분석 기간 동안 수집한 24시간 GPS 자료를 Table 1과 같이 8개의 비중첩(non-overlapping) 관측세션(1시간; 1 H~24 시간; 24 H)으로 구분하여 각 관측세션의 지속시간에 따른 가강수량(PWV)을 산출한 후 결과를 취합하였다 (Eckl *et al.*, 2001; Psimoulis *et al.*, 2004). 위와 같은 방법은 본 연구에서 주로 활용되었기 때문에 앞으로

간단하게 “관측세션 지속시간 실험”이라고 통칭하고자 한다.

GPS의 가강수량 산출을 위한 후처리는 스위스 베른(Bern) 대학에서 개발한 고정밀 GPS 자료처리 소프트웨어인 Bernese 5.0을 사용하였다. 기선 거리의 영향을 최소화하고 결과의 정밀도를 높이기 위해 International GNSS Service (IGS)의 표준위성궤도력 및 IGS 기준국을 포함한 다중기선처리 방식의 상대측위 후처리 방법을 적용하였다(Eckl *et al.*, 2001). 검증 방법은 고층관측한 라디오존데 비양 시각의 가강수량 산출 결과 또는 북강릉 관측소에서 상시 관측 중인 MWR의 가강수량 산출값과 상호 비교한 후 통계적인 오차 분석을 수행하였다. 특별관측기간 고층

관측한 횟수는 총 122회이며, 강수/비강수 기간을 구분한 오차 분석도 추가 수행하여 주변 기상 상황에 따른 결과 차이를 살펴보고자 하였다.

한편 MAOS에서 GPS의 가강수량 산출을 위해 2013년 여름철 집중관측기간(6월 20일~7월 7일) 보성에서 지상 및 고층관측을 수행했던 자료를 이용하였다. MAOS 중 GPS 수신시스템은 미국 Trimble에서 제작된 Zephyr Geodetic II 안테나와 동일 사 제품인 NetR9 수신기로 구성된다. GPS 수신기로 수집되는 신호 지연량 측정을 통해 대기 중 가강수량 산출이 가능하며 차량의 위치 정보 습득에도 사용된다. 이밖에 지상의 기온, 기압은 MAOS의 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)로 측정되며, 고층기상관측장비인 라디오존데 관측을 통해 대기의 연직 기온, 습도 등의 자료를 제공해 준다. 지상 및 고층장비는 서로 독립적으로 구성되어 필요에 따라 개별 또는 동시 관측 수행이 가능하다. MAOS의 각 장비 별 상세 구성도는 Fig.1에 제시하였다.

다음으로 MAOS에서 GPS의 가강수량 산출 방법(고정관측 기반)에 대해 간략히 소개하면, 우선 대류권 총지연량(Zenith Total Delay, ZTD)은 천정방향 건조지연(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)과 천정방향 습윤지연(Zenith Wet Delay, ZWD)의 합으로 나타내며, ZHD는 식 (1)과 같이 Saastamoinen 실험 모델(Saastamoinen, 1972)로 계산할 수 있다(Elgered *et al.*, 1991).

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_M}{1 - 0.00266\cos^2\Phi_M - 0.00028H_M}, \quad (1)$$

여기서 P_M 과 Φ_M 는 MAOS의 지상기압(hPa)과 관측소 위도이며, H_M 은 타원체고(m)로써 차량 GPS 관측지점의 평균해수면 고도(geoid height)에 정표고(orthometric height)를 더한 값을 사용하였다(Groves, 2007). Bernese Processing Engine (BPE) 과정에서 중요한 사전 기준 좌표(A priori coordinate) 설정은 실제 고정관측 지점(북강릉, 보성)의 카테시안(Cartesian) 좌표를 입력하였다. Bernese 5.0 후처리를 통해 산출한 ZTD에 식 (1)에서 계산한 ZHD를 감산하면 ZWD를 구할 수 있고, 이것을 식 (2)와 같이 가강수량(PWV)으로 최종 산출하였다(Bevis *et al.*, 1992).

$$PWV = \frac{ZWD}{\rho R_v \left(k_2' + \frac{k_3}{T_m} \right)} \times 10^6, \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도 R_v 는 수증기의 비기체상수 값을 사용하였으며 $k_2'(17 \pm 10 \text{ K/hPa})$ 와 $k_3(3.776 \pm 0.004) \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ 는 Davis *et al.* (1985)의 대기굴절지수를 적용하였다. 그리고 본 연구에 사용한 T_m 은 Bevis *et al.* (1992)이 제안한 가중평균온도식 대신 한반도 기

상조건에 적합한 평균온도식(Ha *et al.*, 2008)에 MAOS의 기온자료를 사용하여 계산하였다. 식 (1)과 (2)에서도 알 수 있듯이 정확한 가강수량 산출을 위해서는 GPS 관측지점 기상센서의 자료를 사용해야 한다. 하지만 우리나라 대부분의 GPS 관측소에서는 GPS 전용 기상센서를 보유하고 있지 않기 때문에 주변 기상 자료의 값을 사용하거나 보간 등의 방법을 통해 대체하고 있는 실정이다(Kim *et al.*, 2010a). 하지만 본 연구는 시·공간적인 제약 없이 MAOS의 실시간 지상 기상관측자료(기온, 기압 등)를 GPS의 가강수량 산출을 위해 직접 사용할 수 있는 큰 이점을 가지고 있다.

마지막으로 2013년 여름철 집중관측기간 중 MAOS의 고정관측 기간만을 국한하여 분석하고자 차량의 움직임이 없었던 야간(1200~2400 UTC) 시간대를 선정하여 Table 1과 같은 방법으로 관측세션 지속시간 실험을 수행한 후 가강수량 산출 결과의 오차를 제시하고자 하였다. MAOS에서 GPS의 가강수량과 비교·검증을 위해 같은 기간 고층 관측한 라디오존데 자료를 수집하여 각 고도별 비습(specific humidity; q)을 구한 후 연직 적분하여 가강수량(PWV_{RAOB})을 계산하였다(Ohtani and Naito, 2000; Kwon *et al.*, 2007). 여기서 MAOS의 라디오존데 고층관측 자료(연직 기온, 기압, 습도)를 사용하였다. 이 밖의 통계적인 오차 분석 방법은 고정관측소(북강릉)에 적용한 방법과 동일하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고정관측소의 GPS 가강수량 산출 실험

MAOS의 GPS 관측 자료에 대한 관측세션 지속시간 실험에 앞서 연속적인 GPS 고정관측이 가능하고 다수의 검증자료 확보가 가능했던 2012년 겨울철 특별 관측기간 북강릉 관측소(강원청)의 GPS 자료를 활용하여 관측세션 지속시간 실험을 수행하였다. 실험 방법은 앞서 2절에서 언급한 선행 연구들(Eckl *et al.*, 2001; Psimoulis *et al.*, 2004)의 방법을 참조하여 Table 1과 같이 각 관측세션의 지속시간 구간(1 H~24 H)으로 나누어 가강수량을 산출 후 결과를 취합하여 라디오존데 또는 MWR 기준값과의 오차를 제시하고자 하였다.

우선 직접 센서를 통해 대기의 정보를 측정된 라디오존데(RAOB) 관측 결과를 참값으로 가정하고 24시간 GPS 또는 MWR의 가강수량 산출 결과를 시계열 분석을 통해 관측시스템간 결과값을 상호 비교·분석하였다(Fig. 2). GPS(24시간)와 MWR 모두 라디오존데의 가강수량과 비교하여 유사한 경향을 나타냈다. 라디오존데 기준 GPS의 편향 오차(Bias)는 -0.81 mm 의 미미한 차이로 GPS가 과소 모의하였고, RMSE (1.22 mm) 또한 기상학적으로 요구되는 정확도(2 mm)

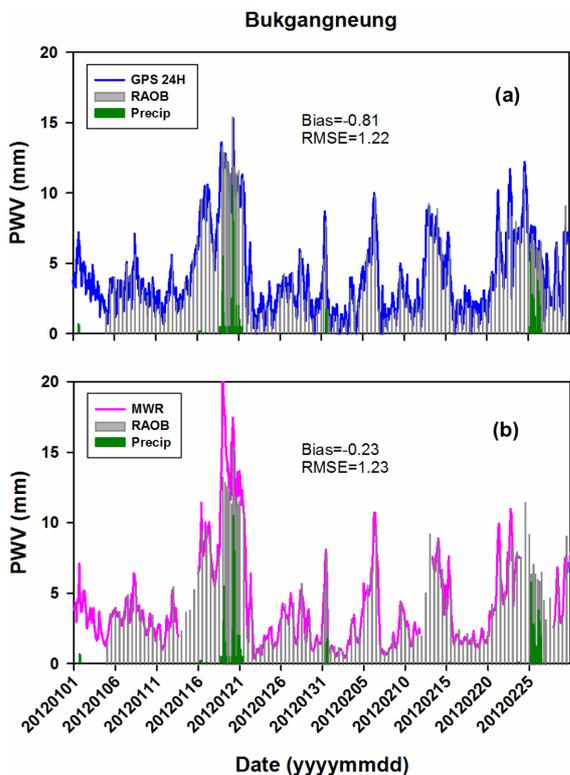


Fig. 2. Time series of precipitable water vapor (PWV) using (a) 24-hour GPS and (b) microwave radiometer (MWR) compared to radiosonde (RAOB) along with precipitation amount during 2012 winter IOP at Bukgangneung.

범위 이내의 값을 나타냈다(Rocken *et al.*, 2000) (Fig. 2a). Figure 2b의 MWR 역시 일부 강수 기간 오차를 감안하더라도 전체 기간의 Bias (-0.23 mm)와 RMSE (1.23 mm)가 선행 연구들(Liou *et al.*, 2001; Pacione *et al.*, 2002)에서 제시하였던 관측 장비간의 평균 차이(1~5 mm) 수준을 대체로 만족하였다. 그리고 비강수 사례 기간에 대해서만 분석하였을 경우 MWR 가 강수량의 RMSE (0.71 mm) 오차는 약 42% 감소하였다.

지금까지 관측 장비 간 가강수량의 비교·검증을 통해 겨울철 특별관측기간 고정관측소에서 GPS(24시간)를 통해 산출된 가강수량 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 강수 기간을 제외하고는 MWR의 가강수량이 라디오존데 관측값과 잘 일치하였고, GPS 가강수량 검증을 위해 활용 가능하기 때문에 추가적인 기준값으로 사용하였다. 일단 전체 관측 기간 중 라디오존데 비양 시각의 가강수량 결과를 기준으로 각각의 GPS 관측세션 지속시간 실험을 통해 산출된 가강수량 결과를 상호 비교하여 산포도 분석을 수행하였다(Figs. 3과 4).

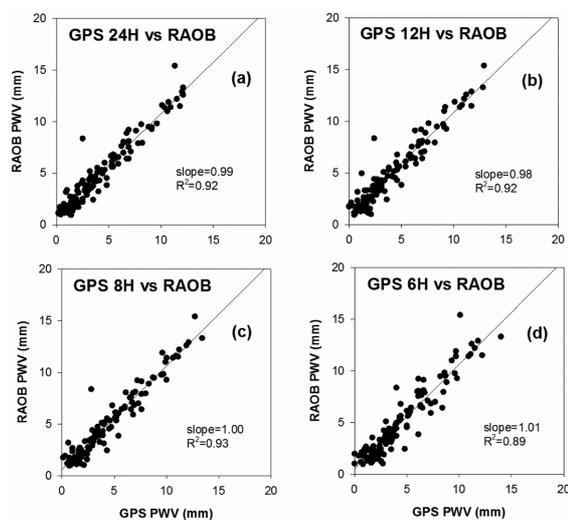


Fig. 3. Comparisons between PWV from RAOB and GPS with the each observing-session duration of (a) 24-hour (24 H), (b) 12-hour (12 H), (c) 8-hour (8 H), and (d) 6-hour (6 H) during 2012 winter IOP at Bukgangneung.

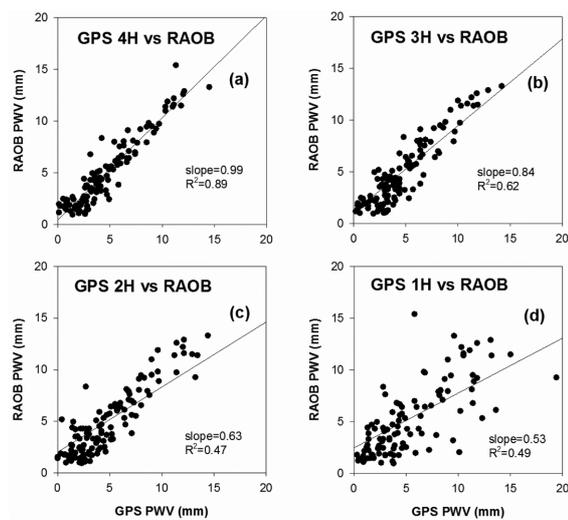


Fig. 4. The same as in Fig. 3 except for the observing-session duration of (a) 4-hour (4 H), (b) 3-hour (3 H), (c) 2-hour (2 H), and (d) 1-hour (1 H).

앞서 시계열 분석에서도 나타났듯이 24시간(24 H) GPS와 라디오존데의 가강수량 비교 결과, 2개의 이상치(outlier)를 제외하고는 직선(slope = 0.99)에 가까운 선형성을 잘 보여주었고 상관성($R^2 = 0.92$) 또한 유의한 수준을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3a). 관측 세션의 지속시간이 12시간(12H)에서 4시간(4 H) 실험까지는 slope (0.98~1.01)와 R^2 (0.89~0.93) 모두 4%

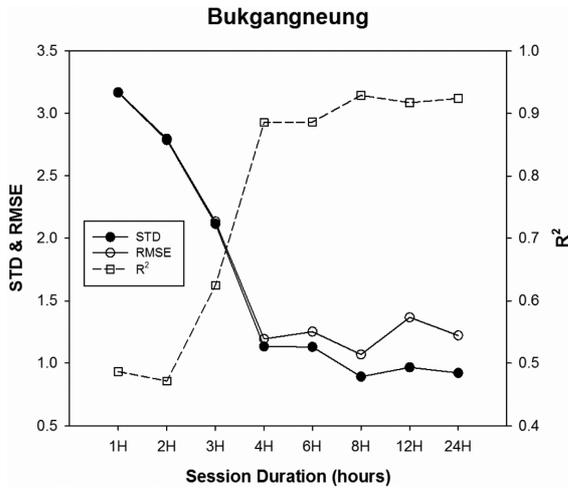


Fig. 5. The standard deviation (STD; left axis), root mean square error (RMSE; left axis), and determination coefficient (R^2 ; right axis) corresponding to the each session duration compared to PWV of RAOB at Bukgangneung.

이내로 큰 차이를 보이지 않았지만 24 H 실험과 비교한다면 다소 산재되어 있는 형태를 보였다(Figs. 3b~4a). Figure 4b의 3시간(3 H) 실험에서는 선형회귀선 기울기(0.84)의 편향성이 보이기 시작하였고, 상관성($R^2 = 0.62$)도 감소하였다. 이러한 경향성은 2시간(2H), 1시간(1 H) 실험에서 더욱 두드러지게 나타났으며, 특히 1 H 실험은 뚜렷한 연관성을 찾기 힘들었다(Figs. 4c, d).

구체적인 통계분석 결과를 살펴보기 위해 각 관측세션 지속시간 실험에 따른 라디오존데 가강수량과의 오차 및 상관성을 Fig. 5에 제시하였다. 예상했던 대로 관측세션의 지속시간이 증가함에 따라 오차(STD, RMSE)는 감소하다가 4 H 이상 실험부터 차이가 미미함을 알 수 있었다(0.1 mm 내외의 표준 편차). 반면 상관성을 나타내는 결정 계수(R^2)는 2 H (0.47) 실험에서 소폭 감소하였지만 앞서 오차 분석 경향과 반대 양상을 나타냈다(Fig. 5). 또한 4 H 이상 실험의 평균 RMSE와 R^2 는 3 H 이하 실험에 비해 각각 45% 감소, 170% 증가하는 등 3 H 이하와 4 H 이상 실험의 통계분석 결과 차이가 뚜렷함을 확인하였다. 한편 RMSE (1.07)와 R^2 (0.93)는 모두 8시간(8 H) 실험에서 근소한 차이이지만 가장 좋은 결과를 보였다.

다음으로 주변 기상상황에 따른 결과 차이를 확인해보고자 강수 유무에 따른 관측세션 지속시간 실험을 추가 수행하였다. 우선 앞서 Fig. 5의 2012년 겨울철 특별관측기간 전체 사례에 대한 통계분석 결과와 더불어 강수/비강수 사례를 추가하여 Fig. 6과 같이 제시하였다. Figure 2의 강수가 있던 시간의 모든 날짜를 강수 사례로 선정하였고, 나머지 기간을 비강수

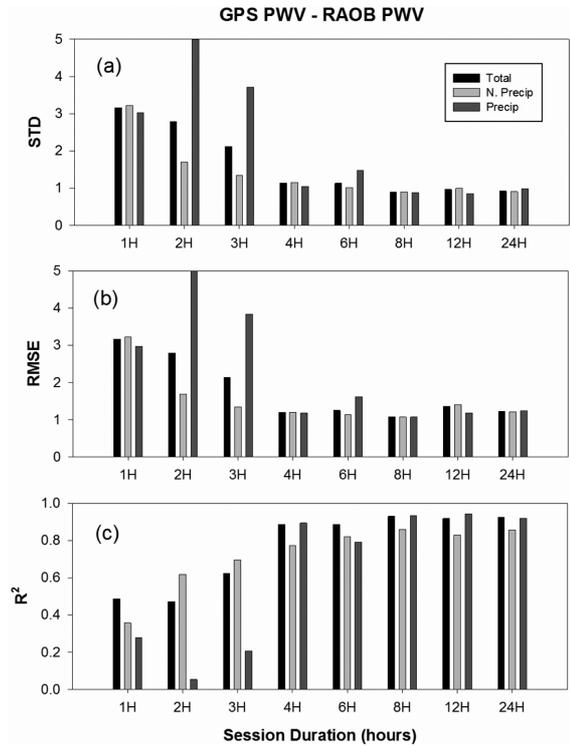


Fig. 6. The (a) STD, (b) RMSE, and (c) R^2 of the difference of GPS PWV and RAOB PWV on the each session duration for the different period of whole, non-precipitation, and precipitation.

사례로 구분하였다. 우선 비강수 사례의 분석 결과, 앞서 전체 사례와 마찬가지로 관측 지속시간이 증가함에 따라 오차(STD, RMSE)는 감소, 상관성(R^2)은 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 6). 특히 3 H 이하의 실험에서 STD와 RMSE가 평균 2.1 mm로 전체 사례와 비교하여 낮은 수치(평균 0.6 mm 감소)를 보이는 등 오차가 개선된 특징을 보였다.

반면 강수 사례만을 국한하여 분석한 결과, 전체 또는 비강수 사례의 경향과는 다르게 2H와 3H 실험에서 RMSE (2 H; 5.11, 3 H; 3.84)와 R^2 (2 H; 0.05, 3 H; 0.21)가 가장 좋지 않았고, 관측 지속시간 증가에 따른 오차 감소/상관성 증가의 선형성을 확인할 수 없었다(Fig. 6). 4 H 이상과 3 H 이하의 평균 RMSE의 결과 차이(2.9 mm) 또한 전체 또는 비강수 사례에 비해 최대 1.8 mm로 크게 나타났으며, 상관성(R^2) 역시 최대 2.7배 이상 차이를 보이는 등 강수 사례 시 3 H 이하와 4 H 이상 실험의 결과 차이가 가장 뚜렷하였다. 마지막으로 Fig. 6과 같은 방법으로 MWR 장비를 통해 산출된 가강수량 결과와의 비교 분석 실험을 수행하였다(Fig. 7과 Table 2). 차이점은 강수 시 MWR 자

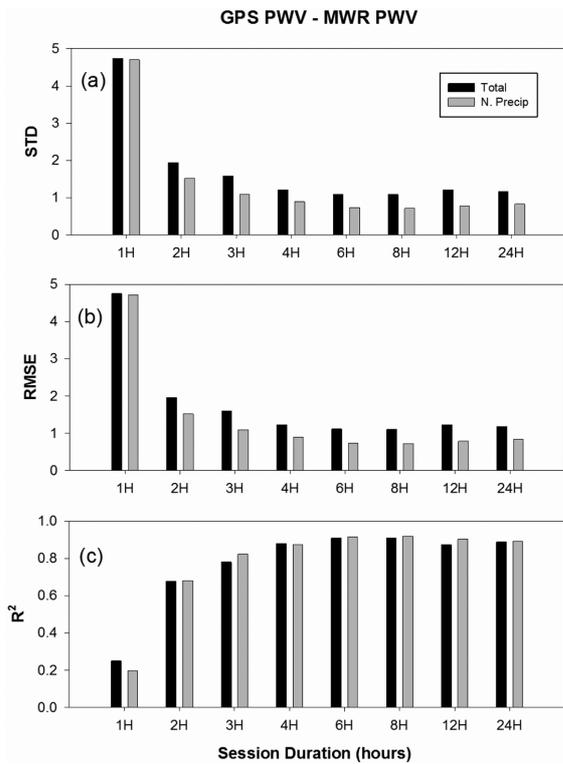


Fig. 7. The same as in Fig. 6 except for the PWV differences between GPS and MWR.

Table 2. Statistics of total and non-precipitation cases compare to PWV of MWR on the each observing-session duration at Bukgangneung. The STD, RMSE, and R² denote standard deviation, root mean square error, and determination coefficient, respectively.

Session duration (h)	Total			Non-Precipitation		
	STD	RMSE	R ²	STD	RMSE	R ²
1 H	4.74	4.75	0.25	4.71	4.71	0.20
2 H	1.94	1.96	0.68	1.52	1.52	0.68
3 H	1.58	1.60	0.78	1.08	1.09	0.82
4 H	1.21	1.23	0.88	0.89	0.90	0.87
6 H	1.10	1.11	0.91	0.73	0.73	0.91
8 H	1.09	1.10	0.91	0.72	0.72	0.92
12 H	1.21	1.23	0.87	0.78	0.79	0.90
24 H	1.17	1.18	0.89	0.83	0.83	0.89

료의 결측 등의 문제로 인해 전체와 비강수 사례만을 분석하였고, 비교·검증은 각 사례 기간 관측세션 지속시간 실험의 1시간 가강수량 산출 결과를 대상으로 하였다.

Figure 7a의 두 관측 장비간 가강수량의 표준편차

분석 결과를 살펴보면, 앞서 강수 기간을 제외한 라디오존데 비교 실험과 마찬가지로 관측 지속시간 증가에 따라 오차가 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 전체 기간 RMSE와 R²의 통계분석 결과에서도 알 수 있듯이 관측 지속시간과의 의존성이 존재하였고(Figs. 7b, c), 3 H 이하(RMSE; 2.77, R²; 0.57)와 4 H 이상(RMSE; 1.17, R²; 0.89) 실험 결과는 최대 2배 이상의 차이를 나타냈다(Table 2). 한편 강수가 없는 사례에 대해서만 분석한 결과, 전체 기간과 비교하여 GPS와 MWR의 가강수량 상관성(R²)은 0.6%의 미미한 차이를 보였지만 오차(STD, RMSE)는 약 20% 감소하였다(Fig. 7과 Table 2). 즉, 비강수 사례 기간 MWR 장비의 신뢰성은 더욱 향상됨을 단적으로 보여주는 결과이다.

지금까지 2012년 겨울철특별관측기간 고정관측소의 관측세션 지속시간 실험을 통해 산출된 가강수량 결과와 두 가지(라디오존데, MWR) 관측 장비를 통해 산출된 가강수량을 비교·검증한 결과, 3 H 이하의 관측 지속시간으로는 기준값과 비교하여 의미 있는 결과를 제시할 수 없었다. 이러한 특징을 나타냈던 이유에 대해 기존 선행연구에서는 GPS 관측 자료의 후처리 과정 중 정확한 모호 정수(ambiguities) 결정 및 다중경로(multipath) 효과로 인한 오차를 줄이기 위해서는 적정(optimal) 수준 이상의 관측 지속시간이 필요함을 제시한 바 있다(Eckl *et al.*, 2001). 따라서 다음절에서는 실제 목표관측 지점에서 MAOS의 GPS 관측 자료를 이용하여 같은 방법의 관측세션 지속시간 실험을 수행한 후 고정관측소의 결과와 비교해 보고자 한다.

3.2 MAOS의 GPS 가강수량 산출 실험

3.2.1 GPS 관측 자료의 품질검사

본 연구에서는 MAOS의 가강수량 산출 실험에 앞서 GPS 관측 자료의 품질에 대한 신뢰성(관측환경의 문제 또는 이상치 등)을 파악하고자 2013년 여름철 집중관측기간 보성에서 관측한 GPS 자료를 수집하여 선행 연구(Sohn *et al.*, 2011, 2012)에서 활용되었던 데이터 편집, 품질검사, 포맷변환 소프트웨어(TEQC)를 이용하여 품질검사를 수행하였다(Fig. 8). TEQC 프로그램은 University NAVstar Consortium (UNAVCO)에서 개발되었으며 데이터수신율, L1 다중경로오차, L2 다중경로오차, 사이클슬립(cycle slip)의 4가지 품질평가 지수를 제시한다(Estey and Meertens, 1999). 또한 TEQC를 이용하여 장기간 GPS 데이터의 품질평가를 수행하면 시간변화에 따른 상대적 품질변화 시점의 파악이 용이하다(Sohn *et al.*, 2011). 품질검사 기간은 6월 20일부터 7월 7일까지 18일간이며, 이 기간 중에는 호우 경보가 발생했던 7월 4일 목표 이동관측 사

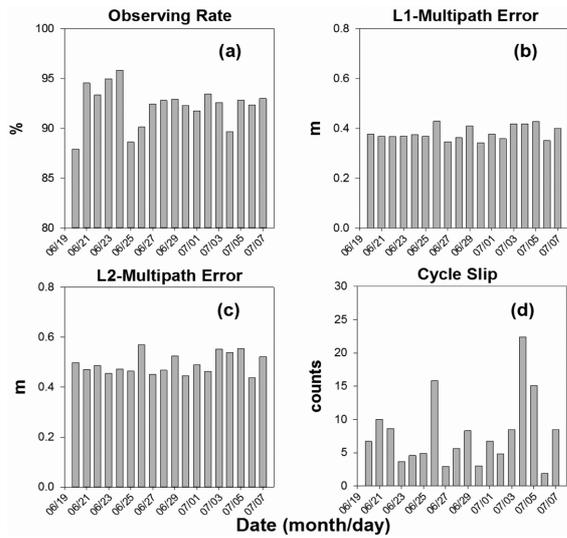


Fig. 8. Quality check indices of (a) observing rate, (b) L1-multipath error, (c) L2-multipath error, and (d) cycle slip of MAOS GPS data using TEQC program at Boseong.

례와 7월 6일 1200~2400 UTC의 결측된 자료를 포함하고 있다.

우선 MAOS에서 하루 동안 관측 가능한 GPS 신호 수신횟수와 실제 수신된 관측횟수의 비를 나타내는 데이터수신율(관측률)을 살펴보면, 일부 관측일(3일)을 제외하고는 대부분의 기간에서 90% 이상의 수신율을 보였다(Fig. 8a). 다음으로 수신기 주변의 건물 등 지형지물로 인해 위성으로부터 송신된 신호의 굴절, 반사로 인해 발생하는 L1과 L2 주파수의 평균 다중경로오차는 각각 0.38 m, 0.49 m로 나타났다(Figs. 8b, c). 이는 국제 위성항법 서비스 기구인 International GNSS Service (IGS) 기준값(0.3 m 전후)에 일치하는 수준이다. 움직이는 차량에 장착된 수신기의 경우 반사되어 들어오는 신호가 쉽게 수렴되지 않으므로 다중경로오차의 효과가 심하지 않았던 것으로 판단되며, 관측 지역(보성)이 도심(빌딩 등)에 비해 GPS 오차가 적은(산이나 들) 요인도 일부 작용하였던 것으로 생각된다.

마지막으로 1000번 관측하는 동안 발생하는 일시적인 신호 단절횟수를 나타내는 사이클슬립 지수를 Fig. 8d에 제시하였다. 화순으로 목표 이동관측했던 7월 4일이 20회 이상으로 지수가 가장 좋지 않았으며, 평균값이 7.9회로 IGS 권고사항(1회 미만)에는 미치지 못한 것으로 나타났다. 이것은 MAOS의 이동관측 도중 나무와 같은 장애물을 통과하거나 전파가 많이 발생하는 지역에서 전자파 장애의 영향을 받았던 것으로 생각된다. 또한 사이클슬립 지수가 높은 기간과 데이터 수신율이 저조한 기간이 상반되는 특징도 확인

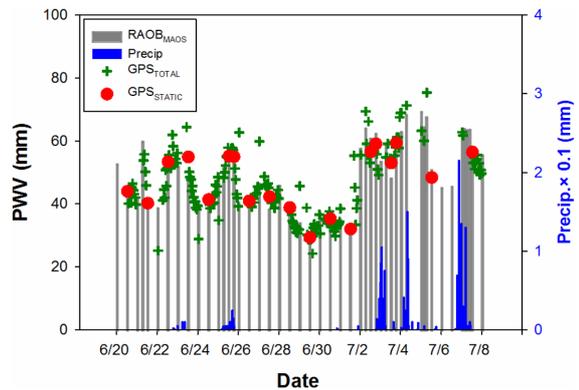


Fig. 9. Time series of PWV (left axis) using GPS (GPS_{TOTAL}) and radiosonde ($RAOB_{MAOS}$) of MAOS and precipitation (right axis) at Boseong. The closed circle symbol with red color denotes PWV from GPS_{STATIC} for static-observation period (1200~2400 UTC) only.

할 수 있었다(Figs. 8a, d).

이상의 TEQC 품질검사 결과를 통해 GPS 이동관측 기간을 제외하고는 비교적 양질의 자료임을 확인하였다. 따라서 이 기간의 GPS 자료를 활용하여 고정관측 기반의 가강수량 산출 실험 결과를 다음 절에 제시하고자 한다. 2절에 소개한 방법대로 Bernese 5.0 소프트웨어를 이용하여 대류권 총지연량(ZTD)를 산출 후 MAOS의 AWS 기상자료(기온, 기압 등) 및 위치정보(위도, 고도) 자료를 입력하여 최종 가강수량으로 계산하였다. 사전 기준좌표 설정은 보성 관측소의 기준점을 사용하였으며 GPS 임계 고도각은 IGS와 기타 대다수 관측소의 설정 값인 10° 이하를 적용하였다.

3.2.2 MAOS의 GPS 자료를 이용한 가강수량 산출

먼저 집중관측 기간 MAOS의 24시간 GPS 자료를 이용하여 전체 관측시간(0000~2400 UTC)에 대해 가강수량 산출 결과(GPS_{TOTAL})를 같은 기간 MAOS의 라디오존데 가강수량($RAOB_{MAOS}$)과 비교하여 Fig. 9에 제시하였다. 전반적으로 차량의 움직임이 많았던 주간 시간대(0000~0500 UTC)에 오차가 많이 발생하였고, 특히 예비 호우경보 발생 지점인 화순으로 목표 이동관측 하였던 7월 4일과 이후 약 2일간(결측기간 포함)은 대부분 가강수량이 산출되지 않았다. 즉 이동관측 기간에는 앞서 품질검사 결과에서도 보여주었듯이 GPS 신호 수신상태가 좋지 않았고, 후처리 과정 중 초기 기준 좌표를 벗어나는 값들이 다수 존재하여 유의미한 산출 결과를 제시하기에는 신뢰도가 떨어지는 등 다소 무리가 있을 것으로 생각된다. 한편 Fig. 9의 일부 사례에서는 GPS 또는 라디오존데의 가강수량이 증가한 후 약 5~6시간 후 강수량의 최대

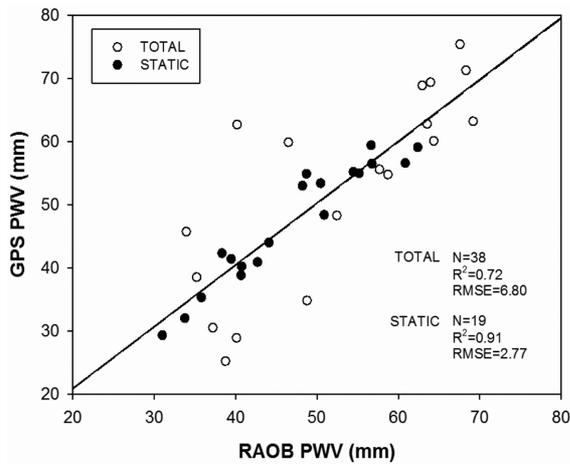


Fig. 10. Comparisons between PWV from GPS and RAOB of MAOS at Boseong. Open and closed circles denote whole and static-observation period only, respectively.

치가 나타나는 것으로 확인되었다.

다음으로 전체 관측기간 MAOS의 GPS 자료를 이용하여 산출한 가강수량의 비교·검증을 위해 Fig. 9의 고층 관측한 라디오존데의 가강수량 결과와 비교하여 Fig. 10에 산포도(scatterplot)로 제시하였다. 참고로 Fig. 10은 고정관측(닫힌 원) 기간을 포함한 전체 관측(열린 원) 기간에 대한 분석이다. 주야간을 모두 포함한 전체 기간의 경우, 가강수량 구간과는 상관없이 선형회귀선을 벗어나는 값들이 다수 존재하였고 결정 계수($R^2 = 0.72$)와 평균제곱근오차(RMSE = 6.80) 모두 유의한 수준을 나타내지 못하였다. 이는 MAOS의 라디오존데 고층 관측이 고정된 장소에서 수행되었음에도 불구하고 앞서 GPS의 가강수량 오차가 많았던 주간의 관측 기간을 포함하고 있어 라디오존데의 가강수량과의 연관성 또한 감소하였던 것으로 판단된다.

MAOS의 GPS 고정관측 기간에 대해서만 국한하여 분석하고자 이동관측이 일부 포함된 구간을 제외하고 1200 UTC 이후 차량의 움직임이 없었던 고정관측(1200~2400 UTC) 사례만을 선정하여 Fig. 9의 GPS_{STATIC}(붉은색 점)과 같이 시계열로 나타냈다. 예상했던 대로 전체 기간 GPS의 가강수량 결과에서 발생했던 오차는 크게 나타나지 않았으며 같은 시간대의 라디오존데 가강수량과 비교하여 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 고정관측 기간 MAOS의 GPS와 라디오존데의 정량적인 가강수량의 상관성 비교를 위해 고정관측(STATIC; 닫힌 원)에 대해서만 추가적으로 산포도 분석을 수행하였다(Fig. 10).

그 결과 전체 관측기간(TOTAL; 열린 원) 결과에

비해 상관성($R^2 = 0.91$)이 증가하였고 정확성(RMSE = 2.77) 또한 2.5배 가량 향상되었다. 이렇듯 MAOS의 고정관측 기간 가강수량 오차가 개선되었던 요인은, 우선 고정관측 기간 라디오존데 비양(1200 UTC, 1800 UTC) 이후 GPS 관측 시간이 충분히 확보되어 이 시각 가강수량 산출 오차가 감소하였던 것으로 생각된다. 두 번째로 고정관측(야간) 기간의 경우 라디오존데 센서의 태양복사 가열(solar heating)로 인한 계통적 오차(systematic error)의 영향(Wang *et al.*, 2002; Nakamura *et al.*, 2004; Kwon *et al.*, 2007)을 받지 않았던 것으로 분석된다. 마지막으로 고정관측 기간에는 전체(주간 포함) 기간에 비해 이온층의 방해가 훨씬 적어 가강수량 산출의 정확도가 증가했을 것으로 보인다(Leica Geosystems, 2000).

3.2.3 GPS 고정관측 기간 가강수량 산출 실험

지금까지 2013년 여름철 특별관측기간 MAOS의 GPS 관측 자료를 이용한 품질검사와 가강수량 산출 분석을 통해 고정관측 기간 유의한 수준의 가강수량 결과를 확인하였다. 따라서 이번 절에서는 MAOS의 GPS 고정관측 사례만을 선정하여 관측 지속시간에 따른 가강수량 산출 실험을 수행한 후 고정관측소(북강릉)의 결과와 비교하였다. 산출 실험은 앞서 Table 1의 고정관측소 방법과 동일하나 GPS 관측의 세션 구간(1200~2400 UTC)이 다르며, 결측일(7월 16일)을 제외한 17일 사례를 대상으로 총 8개(24시간 포함)의 관측세션 지속시간 실험을 수행하였다. 또한 같은 기간 MAOS의 라디오존데 관측을 통해 산출된 가강수량 결과(RAOB_{MAOS})를 비교·검증 대상으로 하였다.

MAOS의 GPS 고정관측 기간 중 라디오존데의 비양 시각(1200 또는 1800 UTC)을 기준으로 산출된 GPS(민감도 실험)와 라디오존데의 가강수량 비교 분석 결과, 4 H 이상의 실험에서도 고정관측소(북강릉)의 평균 기울기(slope = 0.99)에 비해서는 상대적으로 선형성은 감소하였고 약 10% 정도 과소추정하였다(slope = 0.91). 하지만 3 H 실험부터 선형회귀선 근처에 모여 있던 산포도 점들이 분산되었고, GPS의 가강수량이 점차 과대 모의하는 경향을 나타냈다. 구체적인 통계 분석 결과를 살펴보기 위해 Fig. 5와 같은 방법으로 MAOS의 GPS 관측시간에 따른 가강수량 오차 및 상관성 분석 결과를 Fig. 11에 제시하였다.

먼저 1 H 실험에서 10 mm에 가깝게 나타났던 오차(RMSE, STD)가 관측 시간이 증가함에 따라 현저하게 감소하였고, 상관성(R^2) 또한 2 H에서 3 H 실험 사이에 약간의 감소현상이 있었지만 시간 증가와 더불어 향상되는 경향을 나타냈다(Fig. 11). 또한 고정관측소의 결과와 마찬가지로 3 H 이하와 4 H 이상 실험의

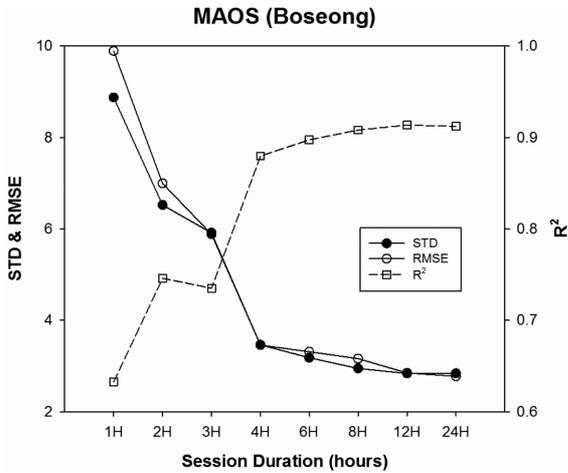


Fig. 11. The same as in Fig. 5 except for the comparisons of PWV using MAOS GPS at Boseong.

통계분석 결과 차이가 뚜렷함을 확인하였다. 자세히 살펴보면, 4 H 이상 실험의 평균 RMSE (3.11 mm)와 STD (3.05 mm)가 3 H 이하(각각 7.58 mm, 7.10 mm)보다 작아 최대 60%에 가까운 오차 감소 효과를 나타냈고 24 H 실험에서 가장 작은 오차(RMSE = 2.77 mm)를 보였다. 반면 R^2 비교에서도 3 H 이하(0.70)와 4 H 이상(0.90)의 결과 차이가 0.20으로 나타났고, 8 H 이상 실험부터는 일정한 값(0.91)을 유지하였다.

이상의 결과들을 요약하면, MAOS의 고정관측 시간이 4시간 이상인 실험에서 2~3 mm 오차를 가지며 유의한 수준의 가강수량 산출 결과를 얻을 수 있었다. 이는 고정관측소의 오차 수준(1 mm 내외)과 비교하여 최대 3.9배 높은 값을 보였다(Figs. 5와 11). 이러한 차이를 나타냈던 원인 중에 하나는 GPS 관측 환경이 다르다는 점을 들 수 있다. 고정관측소 실험의 경우 강수 사례를 포함하고 있지만 평균 가강수량이 4.1 mm으로 겨울철 건조한 대기상태를 보인 반면, MAOS의 실험은 여름철 장마관측 기간을 대상으로 하였기 때문에 가강수량의 절대값(47 mm) 자체가 겨울철보다 10배 가량 큰 습윤한 조건임을 알 수 있다. 건조한 지역보다는 습윤한 지역의 대기상태에서 가강수량 오차와 변동성이 증가한다는 연구 결과는 이미 보고된 바 있다(Ohtani and Naito, 2000; Liou *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 2007). 한편 Fig. 11과 같이 MAOS의 4 H 이상 실험에서 기준 가강수량과의 상관성(R^2)은 고정관측소 실험과 비슷한 수준이거나 오히려 향상된 결과를 보여주고 있다. 즉 MAOS의 가강수량 산출 오차는 고정관측소의 4 H 이상 실험에 비해 2~3 mm 크게 나타났지만 기준 가강수량과의 상관성이 좋아졌다는 것을 의미한다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 최적의 GPS 고정관측 지속시간 결정을 위한 사전 테스트를 위해 고정관측소(북강릉)의 연속적인 GPS 자료를 이용하여 각 관측세션의 지속 시간에 따른 가강수량 산출 민감도 실험을 수행하였다. 한편 보성에서 집중관측한 기간 기상관측차량시스템(MAOS)의 GPS 자료를 수집하여 데이터 편집, 품질검사, 포맷변환 소프트웨어(TEQC)를 이용한 품질검사를 수행한 후 가강수량 산출 결과에 대해 비교 분석하였다. 또한 MAOS의 고정관측 기간만을 선정하여 GPS 관측세션 지속시간 실험을 수행한 후 고정관측소의 통계적인 오차분석 결과와 비교하였다.

우선 겨울철 특별관측기간 고정관측소(북강릉)의 GPS 자료를 활용하여 관측 지속시간에 따른 가강수량 산출 실험을 수행한 결과, 전반적으로 관측 지속 시간이 증가함에 따라 표준편차와 RMSE는 감소하고, 결정계수는 증가하면서 기준 가강수량(라디오존데, MWR)과의 오차는 감소하고 상관성은 증가하는 것을 확인하였다. 특히 관측 지속시간을 4 H 이상으로 실험한 경우의 오차 수준은 1 mm 내외로 나타났다. 비강수 사례 기간 3 H 이하의 실험에서 오차의 개선 효과(23%)가 있었으며, 강수 유무와는 상관없이 3 H 이하와 4 H 이상 실험의 가강수량 산출 결과 차이가 뚜렷함(특히 강수 사례 시)을 알 수 있었다.

다음으로 보성 집중관측기간 MAOS의 24 H GPS 관측 자료의 TEQC 품질검사를 수행한 결과, 일부 이동 관측 기간을 제외하고는 90% 이상의 데이터 수신율과 L1과 L2 주파수의 평균 다중경로오차 지수가 0.3~0.5 m 수준을 보이는 등 비교적 양질의 자료임을 확인하였다. MAOS의 GPS 고정관측 기간 가강수량을 산출한 후 동일 시간대의 라디오존데 가강수량과 비교·검증한 결과, 전체 관측기간(주간 포함)에 비해 상관성($R^2 = 0.91$)이 증가하였고 평균제곱근오차(RMSE) 또한 약 2.5배 감소되었다. 마지막으로 MAOS의 GPS 관측세션 지속시간 실험 결과, 고정관측소의 통계분석 결과와 마찬가지로 관측 지속시간이 4 H 이상인 경우 가강수량 산출 실험이 3 H 이하에 비해서 기준값에 근접함을 알 수 있었다. 지속시간을 4 H 이상으로 설정한 실험의 가강수량 오차는 약 2~3 mm 수준이며, 이는 3 H 이하인 실험에 비해 오차가 최대 60% 이상 감소한 것이다. 하지만 고정관측소의 4 H 이상 실험의 오차분석 결과(1 mm 내외)와 비교해서는 상대적으로 큰 오차를 나타냈다. 이는 MAOS 집중관측이 여름철 습윤한 조건에서 이루어져 고정관측소의 실험 기간(겨울철 건조)과 비교하여 평균 수증기량이 약 10배 가량 컸으며, GPS 관측 환경의 차이로 인한 자료의 품질 상태 또한 적지 않은 요인으로 작용하였던 것으

로 판단된다. 결국 계절 또는 기상 상황에 따른 절대적인 대기 수증기량 차이, 시·공간적으로 변동성이 큰 관측 환경 등으로 인해 가강수량 산출 결과의 오차가 영향을 받는 것을 단적으로 보여준 결과이다.

본 연구는 정적 환경에 있는 GPS 상시관측소 기반의 기존의 연구들과 달리 이동체(MAOS)의 GPS 자료를 이용한 가강수량 산출 실험을 수행하였다는 점에서 의의가 크다. 또한 기상청의 준실시간 가강수량 처리를 위해 사용한 초고속 위성궤도력 정보를 이용하여 MAOS의 목표 고정관측 시 4H 이상의 관측 시간만 확보된다면 관측 공백지역에서 빠른 시간 내의 가강수량 정보(유의한 수준; 2~3 mm)를 제공해 줄 것으로 기대된다. 이렇듯 기동성이 뛰어난 MAOS의 GPS 장비를 활용하여 수증기 모니터링이 불가능한 재해기상 발생 또는 예측 지역에서 신속한 가강수량 추정 가능하였다면 향후 기상 예보 또는 수치예보모델의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

하지만 MAOS의 GPS를 이용한 가강수량 산출 결과의 보다 의미 있는 해석을 위해서는 다양한 관측 환경 또는 계절/지역에서의 GPS 관측이 요구되며, 검증할 수 있는 다수의 라디오존데 관측 자료 확보가 가능한 추가적인 사례 분석이 필요하다. 또한 향후 GPS 정밀 위치추정 소프트웨어를 활용하여 이동관측 기간에 대해서도 가강수량 산출 실험을 추가 수행할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립·운영(사업관리번호: NIMR-2012-B-7)’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- Chen, H.-Y., S.-B. Yu, H. Tung, T. Tsujii, and M. Ando, 2011: GPS medium-range kinematic positioning for the seafloor geodesy off eastern Taiwan. *Eng. J.*, **15**, 17-24.
- Daud, M. E., T. Sagiya, F. Kimata, and T. Kato, 2008: Long-baseline quasi-real time kinematic GPS data analysis for early tsunami warning. *Earth Planets Space*, **60**, 1191-1195.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio. Sci.*, **20**, 1593-1607.
- Dietrich, S. V. R., K.-P. Johnsen, J. Miao, and G. Heygster, 2004: Comparison of tropospheric water vapor over Antarctica derived from AMSU-B data, ground-based GPS data and the NCEP/NCAR reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 259-267.
- Eckl, M. C., R. A. Snay, T. Soler, M. W. Cline, and G. L. Mader, 2001: Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration. *J. Geodesy*, **75**, 633-640.
- Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro, 1991: Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *J. Geophys. Res.*, **96**, 6541-6555.
- Estey L. H., and C. M. Meertens, 1999: TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, **3**, 42-49.
- Gradinarsky, L. P., J. M. Johansson, H. R. Bouma, H.-G. Scherneck, and G. Elgered, 2002: Climate monitoring using GPS. *Phys. Chem. Earth*, **27**, 335-340.
- Groves, P. D., 2007: Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigations System. *Artech House*.
- Ha, J. H., K. D. Park, and B. H. Heo, 2008: Comparisons of a local mean temperature equation for GPS-based precipitable water vapor over the Korean peninsula. *J. Astron. Space Sci.*, **25**, 425-434 (in Korean with English abstract).
- Kim, D. S., J. H. Won, H. I. Kim, K. H. Kim, and K. D. Park, 2010a: Accuracy analysis of GPS-derived precipitable water vapor according to interpolation methods of meteorological data. *J. Korea Spatial Information Soc.*, **18**, 33-41 (in Korean with English abstract).
- _____, K. D. Park, S. H. Lee, and H. S. Lee, 2010b: Variation of position accuracy due to observation time and baseline distance in GPS survey. *Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography 2010*, 187-190 (in Korean with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Kuo, Y.-H., Y.-R. Guo, and E. R. Westwater, 1993: Assimilation of precipitable water measurements into a mesoscale numerical model. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1215-1238.

- 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.
- Leica Geosystems, 2000: General guide to static and rapid-static. *GPS System 500*, 12 p.
- Liou, Y.-A., Y. T. Teng, T. Van 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.
- Martin, A., A. B. Anquela, J. L. Berne, and M. Sanmartin, 2012: Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configurations. *Sci. Res. Essays*, **7**, 419-431.
- Nakamura, H., H. Seko, and Y. Shoji, Aerological Observatory, Meteorological Instruments Center, 2004: Dry biases of humidity measurements from Vaisala RS80-A and Meisei RS2-91 Radiosondes and from ground-based GPS. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 277-299.
- Nam, Y. S., D. Kuang, and B. E. Schutz, 1996: Comparison of GPS estimates of wet tropospheric delays with WVR measurements. *Proc. 9th Int. Tech. Meeting of the ION*, 827-834.
- Ohtani, R., and I. Naito, 2000: Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 26917-26930.
- Pacione, R., E. Fionda, R. Ferrara, R. Lanotte, C. Sciarretta, and F. Vespe, 2002: Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy. *Phys. Chem. Earth*, **27**, 309-316.
- Psimoulis, P. A., V. A. Kontogianni, A. Nickitopoulou, S. I. Pytharouli, P. Triantafyllidis, and S. C. Stiros, 2004: Estimating the optimum duration of GPS static observations for short baseline length determination in Greece. *FIG Working Week 2004*, TS 29.6.
- Rocken, C., J. Braun, T. VanHove, and R. Ware, 2000: GPS Networks for Atmospheric Sensing. *Proc. ION National Technical Meeting*, Anaheim, CA, Jan 26-28.
- Saastamoinen, J. H., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Geophys. Monogr.*, **15**, 247-252.
- Sohn, D. H., K. D. Park, J. H. Won, Y. K. Choi, and C. D. Kee, 2011: Analysis of GPS signal environment at DGNSS stations. *J. Navigation and Port Res.*, **35**, 625-629.
- _____, _____, H. I. Kim, D. S. Kim, and C. D. Kee, 2012: Comparative experiments for the improvement of NDGPS signal quality. *J. Navigation and Port Res.*, **36**, 625-630 (in Korean with English abstract).
- Wang, J., H. L. Cole, D. J. Carlson, E. R. Miller, and K. Beierle, 2002: Corrections of humidity measurement errors from Vaisala RS80-Radiosonde-Application to TOGA COARE data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 981-1002.