GPS 관측소 기선 처리에 따른 가강수량 특성 분석

임윤규* · 한상옥 · 정승필 · 성지혜

국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터, 210-702, 강원도 강릉시 죽헌길 7

The Characteristic Analysis of Precipitable Water Vapor According to GPS Observation Baseline Determination

Yun-Kyu Lim*, Sang-Ok Han, Sueng-Pil Jung, and Ji-Hye Seong

High Impact Weather Research Center, National Institute of Meteorological Research,
Gangwon 210-702, Korea

Abstract: In this study the GPS Precipitable Water Vapor (PWV) was derived and evaluated by a radiosonde measure during the winter intensive observation in Gangneung site from January 5 till February 29 in 2012. Bernese 5.0 software was used to derive the GPS data. GPS-derived PWV from Zero difference (GANG) and Single difference (GANG and DAEJ) was high variance in time and about 5 times the PWV of radiosonde. GPS post-processing has been performed from two additional IGS site (Xian Dao, Ibaraki-ken) in order to correct the absolute troposphere errors. As a result, the mean bias error (MBE) and root mean square error (RMSE) and correlation compared with radiosonde measure were 0.67 mm, 6.40 mm, and 0.93, respectively. In order to correct the relative troposphere errors from the altitudinal difference between the two GPS receivers, we calculated the GPS-derived PWV by adding the data of GPS that was installed in Gangneung-Wonju University near the Gangwon Regional Meteorological Administration. In the end, the improved result showed that MBE, RMSE and correlation in comparison with radiosonde measures were 0.61 mm, 5.79 mm, and 0.93, respectively.

Keywords: precipitable water vapor, base line, GPS, Bernese

요약: 본 연구에서는 겨울철 특별관측기간(2012년 1월 5일에서 2월 29일)동안 강원지방기상청에 설치된 GPS 자료를 이용하여 가강수량을 산정하고 이를 라디오존데 가강수량 자료와 비교·분석하였다. GPS 자료를 후처리하기 위하여 Bernese 5.0 소프트웨어를 사용하였다. GANG 단독측위와 GANG, DAEJ의 비교적 짧은 거리의 두 지점만을 이용한 상대측위 결과에 따른 가강수량은 시간에 따른 변동폭이 크고 실제 환산된 가강수량에 비해 5배 정도 크게 나타났다. 이러한 대류권 절대 오차에 의한 오류를 제거하기 위한 방법으로 Xian Dao (BJFS), Ibaraki-ken (TSKB) 국제 IGS 사이트의 장거리 기선설정으로 GPS 후처리를 실시한 결과 라디오존데 관측값과 상관이 0.93, 평균편의오차가 0.67, 평균제곱근오차가 6.40 수준으로 나타났다. 또한 GPS 수신기 고도 차이로 발생할 수 있는 대류권 상대 오차를 제거하기 위해 강원지방기상청과 아주 가까운 지점인 강릉·원주대학교에 설치된 GPS 자료를 추가하여 후처리한 결과 상관이 0.93, 평균편의오차가 0.61, 평균제곱근오차가 5.79로 보다 개선된 결과를 보였다.

주요어: 가강수량, 기선, GPS, Bernese

*Corresponding author: imyunkyu@korea.kr
Tel: +82-70-7850-6643
Fax: +82-33-644-2657

서론

가강수량(Precipitable Water Vapor, PWV)은 대기의 단위면적당 공기기둥에 포함된 수증기량을 액체 깊이로 나타낸 것으로, 대기 중 수분량의 수송 및 생성량을 정량화하기에 적합한 기상인자라고 할 수 있다(Yoo et al., 2004). 즉, 한반도의 장기 가강수량 변동성 분석을 통해 기후변화에 의한 시·공간 영향 파악이 가능하고 토지 피복 변화에 따른 증발산량 변화의 영향 분석에 활용할 수 있다. 또한 국지호우 및 대설과 같은 심각한 피해를 초래하는 재해기상 예측에 있어서도 가강수량을 활용 할 수 있다.

일반적으로 대기중 수증기량 파악을 위해 라디오존데(Radiosonde), MWR (Microwave Radiometer) 그리고 원격탐사(remote sensing) 관측이 이루어지고 있다. 라디오존데는 상대적으로 높은 비용으로 인해 우리나라의 경우 기상청 하루 2회 관측 5개소(속초, 포항, 백령도, 흑산도, 고산)와 공군 하루 4회 2개소(오산, 광주)가 있다. 국지지역에 발생하는 재해기상 현상은 비교적 빠르게 발달하여 좁은 영역에 피해를 주기 때문에 이들 라디오존데 관측자료 만으로는 국지지역 가강수량 변화량을 분석하기에 시·공간적 한계가 있다. MWR은 대기중의 수증기와 산소, 구름에 의해 방출되는 에너지를 14개의 마이크로웨이브 채널을 이용하여 흡수한 후, 플랑크법칙을 이용하여 밝기온도로 변환한 후 이를 고도별 수증기량 산출 알고리즘 적용을 통해 기온, 습도 연직분포와 액체물량을 측정하는 장비로 상시관측이 가능하나 가격이 비싸고 강수 발생시 빗방울에 의한 레이더의 충격의 영향으로 양호한 관측자료의 품질을 기대하기는 어렵다. 우리나라의 경우 기상청 9개소(문산, 북강릉, 군산, 마산, 울진, 원주, 추풍령, 서해중합해양기상관측기지, 철원)에서 운영되고 있다. 원격탐사는 위성에서 측정된 밝기온도를 이용하는 것으로 광범위한 지역에 대한 관측이 가능하나 구름 등의 대기 상태에 영향을 많이 받아, 중적외선 센서의 경우 하층에 대한 복원이 거의 불가능하며, 마이크로파 센서의 경우 해양 지역에서만 자료를 얻을 수 있다. 이에 비해 GPS 후처리를 이용한 가강수량 자료는 이미 구축되어 있는 GPS (Global Positioning System) 상시관측소 시스템을 이용하기 때문에 추가비용 없이 시·공간적으로 정밀한 가강수량 자료를 획득할 수 있다.

GPS 가강수량 관련 연구로 Ha et al. (2005)은

GPS 자료를 이용하여 시선방향 수증기의 연직분포를 복원하여 라디오존데 자료와 비교·분석하여 연직 가강수량 산출의 가능성을 시사한 바 있다. Kwon et al. (2000)은 Bernese를 이용하여 대류층 천정 지연 평가를 통해 대류층에 의한 오차가 평균 20 cm로 나타나고, 보정모델 사용시 5 cm 범위내로 줄일 수 있음을 제시하였으나, 이러한 오차범위의 정밀도를 지표면 가강수량에 적용하기에는 무리가 따른다. Kwon et al. (2007)은 GIPSY-OASIS II와 Bernese GPS 후처리 소프트웨어를 통해 산출된 가강수량을 라디오존데 가강수량을 기준으로 서로 비교하여 GPS 후처리 결과의 유사함을 밝힌바 있다. Song (2011)은 강원도 폭설과 GPS 가강수량의 상관성을 사례를 통해 분석한 결과, 단순상관 분석만으로는 유의한 결과를 보이지 않음을 시사하였다. 또한 수치예보 모델의 초기장으로 GPS 가강수량을 활용한 연구로 WRF-3DVAR를 이용하여 GPS 가강수량 자료를 동화시켜 민감도 분석을 실시한 결과 초기장 개선효과가 나타남을 보였다(Park, 2008). Park et al. (2009)은 GPS 가강수량 자료를 수치모델의 물리과정 모수화에 따른 가강수량과의 비교·검증에 활용하여 0.9 이상의 매우 유의한 상관성이 있음을 보였다. GPS 가강수량 자료의 정밀도는 MWR이 1-2 mm, 라디오존데는 3-4 mm 수준으로 타나난다고 알려져 있다(Joh et al., 2001; Nam et al., 1996).

이와 같이 GPS 가강수량을 활용한 연구는 활발히 진행되고 있지만, 이를 정확히 산출하기 위한 연구는 대부분 대류권의 신호지연과 관련한 입력자료(GPS 안테나 위상변위, 해수하중에 의한 수직방향 지각변위, 방위각 방향으로의 수증기분포 변화량)를 고려하는 수준이다(Ha et al., 2005). 또한 Kim and Han (1999)은 두 지점 GPS 만으로 상대측위를 통해 기선 거리에 따른 위치 정밀도를 평가하였는데, 기선거리가 멀어지면 전리권과 대류권의 영향으로 위치오차가 커진다고 하였다. GPS 상대측위 방법으로 대류권 수증기량을 산출할 때 고려되어야 할 오차요인은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 두 GPS 관측소의 기상환경 및 수신기 고도 차이에서 기인된 상대 대류권 오차와 두 GPS 관측소가 비교적 근거리에서 위치하여 동일한 기상조건일 경우 두 지점 모두 동시에 발생할 수 있는 절대적 대류권 오차가 있다(Beutler et al., 1988). 따라서 본 연구에서는 대류권 오차를 제거할 수 있는 일환으로 기선처리 방법에 따른 가강

수량을 라디오존데 가강수량과 비교·검증을 통하여 GPS 가강수량 후처리시 고려되어야 할 관측소 지점의 중요성을 시사하고자 한다.

자료 및 방법

GPS 신호가 지상 수신기로 전달되는 동안 이온층 및 대류권에서의 굴절현상이 신호 지연에 따른 위치 정보 오차를 유발하는 원인으로 잘 알려진 사실이다. 이를 Davis et al. (1985)은 기상학분야에서는 대류권에서의 신호 지연율을 역산해서 계산할 경우, 수증기량으로 산정할 수 있음을 제시하였다. 대류권에서 천정방향으로의 GPS 신호 총 지연량(Zenith Total Delay, ZTD)은 총 지연량의 95%를 차지하는 건조지연(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD)과 수증기에 의한 습윤 지연(Zenith Wet Delay, ZWD)으로 구성된다. 건조지연 모델은 Saastamoinen을 적용하였고 그 식은 다음과 같다.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

$$ZHD = \frac{2.2779 \times P_s}{1 - 0.00266 \times \cos 2\theta - 0.00028 \times h} \quad (2)$$

여기서, P_s 는 관측소 기압, h 는 관측지의 지형 보정과 관련된 타원체 고도, θ 는 관측소 위도를 나타낸다. 가강수량은 평균 온도식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다(Bevis et al., 1992).

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R \nu \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right)} \quad (4)$$

여기서 Π 는 무차원 계수로 위치, 고도, 계절 및 기상 등에 따라 지역 기후에 의존하여 변동하는 변환 계수로 본 연구에서는 장기간 국내 기상관측 자료와 라디오존데 자료를 이용하여 개발된 평균 온도식 $T_m \approx 0.884T_a + 23.4$ 을 이용하였다(Ha and Park, 2008).

ρ 는 공기의 밀도, R 은 이상기체상수, ν 는 수증기의 비부피, k_3 와 k_2' 는 굴절지수를 나타낸다.

본 연구에서 활용한 GPS 자료는 국립기상연구소에서 설치한 강원지방기상청(GANG), 국토지리원에서 강릉원주대학교내 설치한 관측소(KANR), 우리나라 국제 GNSS (Global Navigation Satellite System) 서비스(International GNSS Service, IGS) 사이트인 대전(DAEJ), 중국의 IGS 사이트인 Xian Dao (BJFS), 일본의 IGS 사이트인 Ibaraki-ken (TSKB)를 이용하였다. GPS 후처리에 있어서 첫째 GANG 한 지점으로 단독측위 처리, 두 번째 GANG과 DAEJ의 두 지점으로 상대측위에 의한 단일차분 처리, 세 번째 BJFS, TSKB, DAEJ, GANG의 네 지점으로 상대측위 이중차분 처리, 네 번째 BJFS, TSKB, DAEJ, GANG, KANR의 다섯 지점으로 상대측위 이중차분 처리한 가강수량 결과를 산출하였다. 단독측위는 GPS 수신기 1대로 위치를 측정하는 방법이며 상대측위는 두 대 이상의 수신기를 이용하여 각 수신기에 측정된 반송파 위상의 개수 비교가 가능하다. 단일차분은 하나의 위성에 두 개의 수신기 간 수신기간 차분의 위상관측식을 계산함으로써 위성시계의 오차항을 제거하거나, 또는 두 위성에 하나의 수신기간(위성간 차분)의 위상관측식을 계산함으로써 수신기 시계의 오차항을 제거하는 방법이다. GPS 위성의 고도에 비해 두 수신기 사이의 거리가 짧다면 궤도 오차와 대기권 지연오차를 줄일 수 있다. 이중차분은 두 개 이상의 단일차분을 계산하여 수신기 및 위성시계의 오차항을 모두 제거하고, 미지항은 모호정수항만을 남기게 된다. 따라서 $n(n \geq 4)$ 개의 위성에 대한 관측식으로 $(n-1)$ 개의 이중차분을 이용하여 측량 계산을 실시한다.

본 연구에서는 Bernese 5.0 GPS 후처리 프로그램을 이용하여 각 기선처리방식에 따라 ZTD를 산출하였고 이를 Table 1에 나타내었다. 초기 ZTD 사상함수에 건조 Niell을 사용하였고 잔차 ZTD 사상함수 추정에는 습윤 Niell을 사용하였다. 또한 각 GPS 관측소 기선처리시 관측지점을 최대한 활용할 수 있는

Table 1. Analysis strategies and GPS sites used in baseline processing by Bernese software

GPS sites used in baseline process	Difference	Sampling/Window of ZTD (sec)	Satellite Orbit clock errors
GANG	Zero difference	180	-
GANG, DAEJ	Relative difference	180	Single difference cancellation
BJFS, TSKB, DAEJ, GANG	Relative difference	180	Double difference cancellation
BJFS, TSKB, DAEJ, GANG, KANR	Relative difference	180	Double difference cancellation

Fig. 1. Location of GPS station and baseline connection. Xian Dao (BJFS), Ibaraki-ken (TSKB) and Dae-Jeon (DAEJ) is IGS stations, respectively.

OBS-MAX 전략 방법을 사용하였으며 각 기선 연결 모습을 Fig. 1에 제시하였다.

GPS에서 산출된 가강수량 자료의 검증에 위해 국립기상연구소 겨울철 특별관측기간(북강릉, 2012년 1월 5일-2월 29일 0000UTC, 1200UTC) 동안에 생산된 라디오존데 가강수량과 상관, 평균편의오차(Mean Bias Error, MBE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 제시하였다.

결과 및 고찰

가강수량은 식(1-4)에서 제시된 바와 같이 Bernese 후처리에 의한 ZTD값과 ZHD의 차에 $1/T$ 를 곱해줌으로서 산출할 수 있다. ZHD값은 GPS 수신기가 설치된 관측소의 기상인자(기온과 기압)에 의해 계산되는 값으로 이에 따른 민감도를 Fig. 2에 나타내었다. 기온이 $-10\sim 10^{\circ}\text{C}$ 일 때 무차원 계수 $1/T$ 는 0.146-0.157 수준을 나타내며 이에 따른 가강수량은 4.388-4.716 mm으로 0.328 수준의 변동값을 가진다. 즉, 가강수량 산출시 관측소 기온에 따른 ZHD 변동값은 영향은 미미하다 할 수 있다. 관측소 기압 1000-1022 hPa에 따른 ZHD의 변동값은 약 2279-2329 mm로 50정도의 큰 변화를 보이며 관측소 고도(100-250 m)에 따른 변화는 0.1 mm 수준으로 미미하게 나타났다. 이때, 기온이 5°C 로 $1/T$ 가 약 0.15375이고 ZTD가 2360 mm 라고 가정한다면 ZHD의 변화에 따른 가강수량은 4.6 (ZHD 2329)-12.4 (ZHD 2279) mm로 7.8

mm 수준의 변동값을 가진다. 따라서 가강수량 계산 과정에서 필요한 기후학적 기상인자에 의한 ZHD값은 관측소 기압이 매우 중요하며, 국지적인 기압차에 의한 가강수량의 차이를 예상할 수 있다.

Yoo et al. (2004)에 의하면 우리나라 연중 가강수량 변동 범위는 겨울철에 약 10 mm, 봄·가을에 약 20 mm, 여름철에 가장 높은 50 mm 정도로 나타난다. 따라서 본 연구의 자료 비교·검증 기간인 2012년 1월 5일에서 2월 29일은 10 mm 수준의 가강수량을 예상할 수 있다. Fig. 3은 GANG 지점 단독측위로 처리했을 경우와 GANG과 DAEJ만을 상대측위 및 단일차분으로 처리한 경우, GANG, DAEJ, BJFS, TSKB 관측소 지점을 상대측위 및 이중차분으로 처리했을 경우, 그리고 GANG, DAEJ, BJFS, TSKB, KANR의 관측소 지점을 상대측위 및 이중차분으로 처리했을 경우의 가강수량을 나타낸 것이다. 이때 사용된 기상자료는 GANG 지점(강원지방기상청)에 설치된 AWS 자료를 사용하였다. 먼저 GANG 단독측위로 처리된 가강수량은 변동성이 매우 크게 나타나는 특징을 보인다. 이러한 결과로 단독측위의 경우, 위성 시계오차를 제거하기 위한 과정이 없기 때문에 이에 의한 오차가 크게 나타난 것으로 판단되며 $-94.7\sim 51.5$ mm의 가강수량을 나타낸다. 두 번째 방법인 GANG과 DAEJ의 경우는 상대측위를 사용하여 비교적 정확한 GPS 수신값으로 예측되는 우리나라 IGS 사이트인 DAEJ의 보정값을 취할 수 있고, 단일차분으로 위성 시계오차를 어느 정도 제거한다는 가정으

Fig. 2. Variation of precipitable water vapor and (PII) in air temperature (a) and variation of zenith hydrostatic dry (ZHD) and Precipitable Water Vapor (PWV) in surface pressure (b).

Fig. 3. GPS-derived precipitable water vapor using zero difference (GANG), single difference (GANG and DAEJ), relative difference by two additional IGS sites (GANG, DAEJ, BJFS, TSKB), and additional GPS sites (GANG, DAEJ, BJFS, TSKB, and KANR) during the winter intensive observation.

로 설계된 것이다. 앞서 보인 GANG 단독측위에서 나타나는 큰 변동성은 다소 줄어든 모습을 보이나, 가강수량이 매우 크고 여전히 위성 시계오차에 의한 오류값 제거가 원만하게 이루어지지 않은 것으로 판단되며 $-60.6\sim 82.6$ mm의 가강수량을 나타낸다. 세 번째 방법인 국제 IGS 사이트(BJFS, TSKB)를 포함한 비교적 장거리(100 km 이상 떨어진) 기선을 가진 설계의 경우는 가강수량의 변화가 $0\sim 12.2$ mm 범위로 존재한다. 또한 네 번째 방법인 세 번째 방법에 사용된 관측소에 KANR 관측소를 추가하여 설계한 경우는, 국지규모 현상에서 발생할 수 있는 안개와 역전

층과 같은 미기상 현상에 의한 시계 오차를 제거하기 위한 설계로 가강수량의 변화가 $0\sim 14.7$ mm 범위를 보였다. 따라서 세 번째와 네 번째 방법의 기선처리 가강수량이 우리나라 겨울철 가강수량인 약 10 mm를 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 단독측위만으로는 대류권 굴절에 의한 습윤지연량 추정에 많은 오차가 있을 수 있고, 이를 보정하기 위한 상대측위 방법에 있어서도 GANG과 DAEJ의 단일차분에 의한 위성 시계오차 제거 방법으로 대류권 절대 오차를 제거하기 힘들다고 할 수 있다.

Beutler et al. (1988)은 대류권 오차의 원인중 비교

Fig. 4. Statistical comparison (correlation, mean bias error, and root mean square error at radiosonde measure) of precipitable water vapor about four GPS sites (GANG, DAEJ, BJFS, and TSKB), and additional GPS sites (GANG, DAEJ, BJFS, TSKB, and KANR) during the winter intensive observation.

적 근거리 자료만을 사용할 경우에 발생할 수 있는 대류권 절대오차를 제거하기 위해서 장거리 기선(100 km 이상)이 포함된 GPS 관측소가 필요하다고 하였다. 즉, 인접한 두 GPS 관측소에서 동일한 위성으로부터 수신된 신호는 같은 대류권 정보를 담고 있어, 두 GPS를 이용한 대류권 절대오차를 제거하기는 어렵다. 하지만, 100 km 이상 떨어진 두 GPS 관측소에서 동일한 위성으로부터 수신된 신호는 대류권 이동 경로 차이에 의한 대류권 절대오차 제거가 가능하다. 따라서 비교적 장거리 기선을 만들 수 있는 국제 IGS 사이트를 포함하여 GPS 후처리를 실시해야 대류권 절대 오차를 제거할 수 있다.

Fig. 4는 겨울철 특별관측기간 동안 라디오존데 관측자료를 이용한 가강수량과 Fig. 3에서 양호한 결과를 보인 세 번째와 네 번째 방법에 의한 가강수량을 비교한 것이다. 라디오존데 가강수량을 기준으로 GANG, DAEJ, BJFS, 그리고 TSKB를 포함한 기선 설정에 따른 가강수량과의 상관은 0.93으로 나타났고, 평균편의오차는 0.67, 평균제곱근오차는 6.40으로 나타나 GPS 가강수량 산정 방법이 유용함을 시사한다. 이들 4지점의 GPS 관측소에 KANR 지점을 추가하여 가강수량을 비교한 결과 상관은 동일하게 나타났고, 평균편의오차가 0.61, 평균제곱근오차는 5.79로 KANR 지점을 추가한 것이 라디오존데 가강수량 추정값에 보다 가까운 결과를 나타냈다. KANR 지점은 강릉 원주대학교에 설치된 GPS 관측소로 GANG 지

점과 매우 가까운 거리(약 4 km)에 위치하고 있어, 국지 미기상 현상으로 야기된 상대 대류권 오차 제거에 있어 유용한 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 겨울철 특별관측기간 동안 GPS 관측자료를 Bernese 5.0 소프트웨어를 사용하여 다양한 기선설정에 따른 가강수량을 산정하여 라디오존데 가강수량과 비교·검증 하였다.

GPS 가강수량 산정에 필요한 ZHD 값의 민감도 분석에서 기온의 영향은 미미한 수준이고 상대적으로 기압값이 매우 중요하게 적용되고 있음을 확인하였다. 단독측위를 이용하여 산정된 ZTD 특징은 위성 시계 오차 제거를 하지 않아 변동성이 크게 모사되었고, GANG과 DAEJ 두 지점값을 사용한 경우는 ZTD 값이 과대평가 되었고 시간에 따른 변동성 또한 크게 모사됨을 알 수 있었다. 국제 IGS 사이트를 포함한 GANG, DAEJ, BJFS, TSKB 지점값을 사용한 경우, 가강수량과 변동성 모두 우리나라 평균 겨울철 분포에 유의하게 나타났다. 이를 라디오존데 가강수량과 비교한 결과 상관인 0.93, MBE는 0.67, RMSE가 6.4로 GPS 후처리 방식이 유용함을 시사하였다. GPS 수신기 고도 차이로 발생할 수 있는 대류권 상대 오차를 제거하기 위한 KANR 지점의 추가로 처리된 가강수량의 MBE와 RMSE가 0.61과 5.79로 향

상된 결과를 시사하였다. 이와 같이 GPS 가강수량 산출에 있어서 대류권 절대오차 제거에 있어서 장거리 기선을 포함한 관측소 선정이 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소의 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립 · 운영(NIMR 2012-B-7)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Beutler, G., Bauersima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., and Geiger, A., 1988, Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations. In Brunner, F.K. (Ed.), 1988, Atmospheric effects on Geodetic Space Measurements, Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, 42 p.
- Bevis, M., Businger, T., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., and Ware, R., 1992, GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97, 15787-15801.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shaprio, I.I., Rogers, A.E., and Elgered, G., 1985, Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20, 1593-1607.
- Ha, J.H. and Park, K.D., 2008, Comparison of local mean temperature equations for GPS-based precipitable water vapor determination. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 25, 425-434. (in Korean)
- Ha, J.H., Park, K.D., Park, P.H., and Park, J.U., 2005, Analysis of error sources in determination of tropospheric slant wet delay using GPS. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 337-346. (in Korean)
- Joh, J.H., Park, P.H., Park, J.U., Lim, H.C., Kim, S.C., Cho, H.M., Kim, M.S., and Suh, A.S., 2001, Proof of measurement precision for precipitable water using GPS. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 37, 557-565. (in Korean)
- Kim, W.S. and Han, U., 1999, The relative positioning accuracy using GPS and TGPS tracking system, *Journal of Korean Earth Science Society*, 20, 258-265. (in Korean)
- Kwon, H.T., Iwabuchi, T., and Lim, G.H., 2007, Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurement with radiosonde observations over the Korea peninsula. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 733-746.
- Kwon, Y.C., Han, U., and Park, P.H., 2000, Estimation of tropospheric zenith delay over the Seoul-Jecheon area using GPS. *Journal of Korean Earth Science Society*, 21, 380-388. (in Korean)
- Nam, Y.S., Kuang, D., and Schutz, B.E., 1996, Comparison of GPS estimates of wet tropospheric delays with WVR measurements, *Proceedings meeting of the ION*, 834 p.
- Park, J.U., 2008, The space geodesy division management, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daedeokdae-ro Yuseong-gu Daejeon Republic of Korea, 98 p.
- Park, C.G., Baek, J.H., and Cho, J.H., 2009, Comparison of precipitable water vapor observations by GPS, radiosonde and NWP simulation. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 26, 555-566. (in Korean)
- Song, D.S., 2011, Correlation analysis between GPS precipitable water vapor and heavy snowfall on Gangwon province in early 2011. *Korean Journal of Geomatics*, 30, 97-104. (in Korean)
- Yoo, C.S., Shin, C.K., and Yoon, Y.N., 2004, Estimation and analysis of precipitable water. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24, 413-420. (in Korean)

2013년 9월 30일 접수
2013년 10월 31일 수정원고 접수
2013년 11월 8일 채택