

# GPS/GLONASS 통합관측자료를 이용한 가강수량 산출과 정확도 검증

## Determination of Precipitable Water Vapor from Combined GPS/GLONASS Measurements and its Accuracy Validation

손동효\* · 박관동\*\* · 김연희\*\*\*

Sohn, Dong Hyo · Park, Kwan Dong · Kim, Yeon Hee

### 요 旨

대기 중의 가강수량은 시·공간적 변동이 크기 때문에 여러 시스템을 이용한 관측이 이루어지고 있다. 이 연구에서는 GNSS 시스템인 GPS와 GLONASS의 신호를 각각 그리고 통합 이용하여 가강수량을 산출하고 다른 관측시스템의 측정값과 상호비교하여 정확도를 검증하였다. 비교 관측시스템으로 라디오존데와 마이크로파 복사계를 이용하였고 세 개의 시스템은 동일한 장소에 설치되어 있어 상호간의 비교 및 관측값 특성을 분석하는데 용이하였다. 각 시스템 별로 측정된 가강수량은 평균 0.6mm-3.4mm 차이를 보였고 표준편차는 1.0mm-3.8mm로 나타났다. GNSS 측정값이 다른 두 시스템의 측정값에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였는데 이는 실험에 사용된 GNSS 안테나가 국제적으로 제공되는 안테나 위상중심변동 모델 테이블에 존재하지 않는 모델이었기 때문으로 판단된다. 향후 안테나 위상중심변동 모델이 적용 가능한 안테나를 사용할 경우 GPS/GLONASS 통합자료처리를 통해 가강수량 산출 정확도 향상 및 GPS 위성관측이 제한적인 곳에서도 유효한 결과 획득이 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 가강수량, GPS, GLONASS, 라디오존데, 마이크로파 복사계

### Abstract

Several observation equipments are being used for determination of the water vapor content and precipitable water vapor (PWV) because the water vapor is highly variable temporally and spatially. In this study, we used GNSS systems such as GPS and GLONASS in standalone and combined modes to compute PWV and validated their accuracy with respect to the results of other water-vapor monitoring systems. The other systems used were radiosonde and microwave radiometer, and the comparisons were convenient because all three systems were collocated at the test site. The differences of PWV were in the range of 0.6-3.4 mm in the mean sense, and their standard deviations were 1.0-3.8 mm. The relatively large difference of GNSS compared with the other two systems were believed to be caused by the fact that the GNSS antenna used in this study was the kind for which the international standard of phase center variations (PCV) calibration is not available. We expect better accuracy of PWV determination and improved availability of it through integrated data processing of GPS/GLONASS when an appropriate antenna with PCV correction model is used.

Keywords : Precipitable Water Vapor, GPS, GLONASS, Radiosonde, Microwave Radiometer

### 1. 서 론

지구촌 곳곳에서는 폭우, 폭설, 초대형 태풍 등과 같

은 극심한 기상현상으로 인하여 인명피해와 재산의 피해가 적지 않게 발생하고 있다. 이러한 기상현상은 지구의 평균 기온 상승과 무관하지 않다. 일반적으로 기

2013년 11월 5일 접수, 2013년 12월 4일 채택

\* 교신저자 · 정희원 · 인하대학교 지리정보공학과 박사과정(Corresponding author, Member, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, dhsohn5@gmail.com)

\*\* 정희원 · 인하대학교 지리정보공학과 교수(Member, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, kdpark@inha.ac.kr)

\*\*\* 국립기상연구소 응용기상연구과 연구원(Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, kyh@kma.go.kr)

온이 상승하면 공기의 단위 부피당 함유할 수 있는 수증기량은 증가한다. 지구 온난화에 의한 기온 상승은 대기 중의 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)을 증가시키고 증가된 가강수량은 국지성 폭우 등과 같은 기상현상을 자주 발생시키는 에너지원으로 작용하고 있다. 그래서 기상분야에서는 인공위성, 레이더, 존데 등 다양한 시스템을 이용하여 대기 중의 가강수량을 측정하고 있다. 또한, 대류권에 분포하고 있는 가강수량은 지구 대기권 밖에서 들어오는 전자기파 신호에도 영향을 준다. 그래서 가강수량은 기상분야 뿐만 아니라 우주 시스템 활용 분야에서도 주요한 연구 대상이어서 이를 측정하는 기술은 다양하게 존재하고 있다.

대표적인 우주기반 활용시스템인 GNSS(Global Navigation Satellite System)는 위성과 사용자간의 거리를 계산하여 사용자의 위치와 시각을 결정하는데 사용된다. 그러나 GNSS 관측자료에는 위성으로부터 송신된 신호가 대기를 통과하면서 불규칙하게 분포하고 있는 대기 성분들에 의해 발생한 오차가 포함되어 있다. 특히, 대기 중의 가강수량은 정확도를 저하시키는 주요 오차요인이기 때문에 GNSS를 활용한 측지, 측량 분야에서는 보다 정확한 좌표값을 산출하기 위해 가강수량 추정은 필수적이다.

가강수량을 관측할 수 있는 대표적인 시스템으로는 라디오존데(RAOB, Radiosonde Observation), 마이크로파 복사계(MWR, Microwave Radiometer), 항공기, 지구관측위성, GNSS 등이 있다(NOAA, 2013). 라디오존데는 가장 오래된 고층기상 관측장비로써 기상관측 센서를 탑재한 관측기기를 기구에 매달아 대기 중으로 상승하면서 기압, 기온, 습도, 풍향, 풍속 등과 같은 기상요소를 측정하고 송신하는 관측기기이다. MWR은 원격으로 대상체의 복사에너지를 측정하여 관측대상의 속성정보 및 분포량을 추정할 수 있는 시스템이다. 지상기반 MWR은 대기의 복사에너지를 측정하여 가강수량을 추정할 수 있는 기기으로써 대기의 상태정보를 실시간으로 측정할 수 있는 장점이 있으나 비나 눈이 많이 내릴 때에는 이상값을 산출하는 문제점이 있다. 항공기를 이용한 관측은 기체에 탑재된 센서를 이용하여 항로상의 수증기량을 직접 측정함으로써 정확한 측정이 가능하나 시간적, 공간적 범위가 제한적이다. 지구관측위성을 이용한 가강수량 측정은 지구상의 폭 넓은 지역을 관측할 수 있고 탑재된 센서의 관측 파장영역에 따라 대상지역이나 범위가 다양하며 주기적인 관측이 가능하다. GNSS를 이용한 가강수량 측정은 위성으로부터 송신된 신호가 대류권을 통과할 때 지연되는 시간을 계산하여 산출한다. GNSS 관측은 날씨와 무관하게 24시

간 관측이 가능하여 미국과 유럽의 여러 국가에서 많이 활용하고 있다(NOAA, 2013; KNMI, 2013).

GNSS 시스템을 활용한 국내 모든 연구는 GPS(Global Positioning System) 단독신호만 이용하여 가강수량을 산출하고 타 시스템과 비교하였다(Moon and Choi, 1999; Ha et al., 2009; Sohn et al., 2012). GLONASS(Global Navigation Satellite System) 활용의 경우에는 측위나 측량과 같은 분야에서 제한적으로 사용하였다(Park et al., 2003; Lee et al., 2012). 2011년 11월부터 정상운영하기 시작한 GLONASS 시스템을 이용한 가강수량 산출 연구는 전무한 상황이다. 또한, 우리나라 대부분의 상시관측소에는 GPS와 GLONASS를 동시에 관측할 수 있는 수신기가 설치되어 있지만 그 활용분야가 미약한 상태이다.

이 연구에서는 GNSS 시스템인 GPS와 GLONASS 신호를 각각 그리고 통합 이용하여 가강수량을 산출하고 라디오존데와 MWR로 측정한 값과 상호비교하여 정확도를 검증하였다. 그리고 이 연구를 통해 도심지와 같이 GPS 위성관측이 제한적인 곳에 설치된 GNSS 수신기의 활용을 증대시키고자 하였다.

## 2. 실험연구

### 2.1 공동관측 실험

경상남도 창원시에 위치한 창원기상대는 GNSS, 라디오존데, MWR 관측기기가 동일한 장소에 설치되어 있어 가강수량을 공동으로 관측할 수 있는 곳이다. 설치된 기기로는 GNSS 관측장비 1세트, 라디오존데 1기, MWR 2기가 있으며 각 시스템 별 관측기기의 제조사와 모델을 Table 1에 정리하였다. 이들 관측기기의 공간적 배치는 Fig. 1과 같다. GNSS 관측자료는 30초 간격으로, MWR 관측자료는 약 1초 간격으로 기록되고 1일 단위로 저장된다. 라디오존데는 1회 관측비용이 고가이기 때문에 안정적인 날에 2회에서 8회 관측이 이루어진다. 이 연구에서는 대기 중의 가강수량이 많이 분포하고 있는 여름철 3개월간(2012년 7월1일-9월30일) 관측자료를 이용하였다. 그리고 설치된 GNSS 관측장비의 성능검증을 위해 6월말에 또 다른 GNSS 관측장비(Trimble사에서 제조한 NetR5 수신기와 Zephyr 안테나)를 임시로 설치하여 3일간의 관측을 수행하였다.

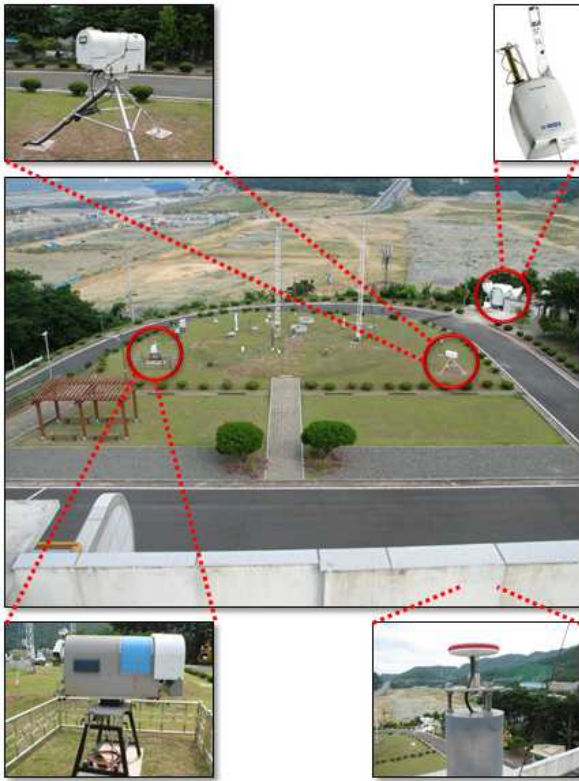


Figure 1. Location of PWV observation equipments at the Changwon Weather Station

Table 1. PWV measurement systems

System	Observational Equipment
GNSS	Septentrio's PolaRx4 Receiver PolaNt_G Antenna
Radiosonde	Vaisala's RS92-SGP
MWR	RPG's HATPRO-G2
	Radiometrics's TP/WVP-3000A

## 2.2 가강수량 산출

수집된 관측자료는 각 시스템 별로 가강수량을 산출하였다. GNSS 관측자료는 고정밀 자료처리 소프트웨어인 Bernese 5.0을 이용하여 대류권 총지연량을 우선 산출하였다(Dach et al., 2007). 이때, GPS 신호만 사용한 경우, GLONASS 신호만 사용한 경우, GPS&GLONASS 통합신호를 사용한 경우에 대해 각각 처리하였다. 산출된 총지연량은 지상의 기상센서로 측정된 기압, 기온 값을 이용하여 가강수량으로 변환하였다(Bevis et al., 1992). 계산된 가강수량은 30분 간격으로 샘플링하였다. 라디오존데는 관측자료의 기압, 기온, 이슬점온도 값을 이용하여 고도별로 대기의 수증기압과 혼합비를 계산하고 가강수량을 계산한 뒤 이를 합산

하여 관측소 상공의 가강수량으로 산출하였다(Vedel, 2003). MWR은 내부에 탑재된 습도 채널을 이용하여 실시간으로 대기의 복사에너지량을 측정한다. 관측된 복사에너지는 플랑크 법칙(Plank's Law)에 의해 밝기온도로 변환된다. 변환된 밝기온도는 장기 관측된 라디오존데 자료를 학습자료로 이용한 인공신경회로망(Artificial Neural Network) 알고리즘과 다중회귀분석(Multiple regression) 방법을 통해 가강수량으로 계산된다(Rose and Czekala, 2009). 계산된 가강수량은 타 시스템과 상호비교하기 위해 30분 간격으로 샘플링하였다.

## 3. 비교분석

### 3.1 GPS/GLONASS 가강수량 비교

현재 운영 중인 대표적인 GNSS 시스템은 GPS와 GLONASS가 있다. 이들 두 시스템의 신호를 각각 그리고 통합 이용하여 가강수량을 산출하였다. GPS와 GLONASS의 산출 가강수량을 우선 비교하였다(Fig. 2(a)). 이들 두 측정값의 선형회귀 기울기값은 1.02로 나타나 GLONASS 산출값이 GPS 산출값보다 과대추정하는 경향을 보였다. GPS와 GPS&GLONASS 통합 신호처리 결과에서는 두 측정값이 거의 같게 나타나 선형회귀 기울기값이 1.00으로 나타났고 결정계수(R<sup>2</sup>)값은 1로 나타나 선형회귀식이 관측값을 잘 설명하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 2(b)). GLONASS와 GPS & GLONASS 통합신호처리 결과에서는 0.98의 선형회귀 기울기값이 나타나 GLONASS 측정값이 통합신호보다 과대 추정하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 2(c)). 이를 통해, GLONASS 단독으로 처리한 결과는 다른 두 신호의 처리결과에 비해 과대추정하는 경향을 보였고 GPS 신호와 통합신호 처리는 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 라디오존데와 GNSS 가강수량 비교

대기 수증기량을 측정하는 관측시스템 중에서 가장 오래되고 대기의 상태를 고도별로 직접 측정할 수 있는 시스템은 라디오존데이다. 그래서 대다수의 연구에서는 라디오존데 측정값을 참값으로 가정한다. 먼저 GNSS 측정값과 비교하였다. 라디오존데 관측회수가 작아 두 시스템간의 공동관측시점이 일치하는 횟수가 많지는 않았지만 전체적인 변화경향은 유사하게 나타났다(Fig. 3). GNSS의 세 신호(GPS, GLONASS, GPS & GLONASS) 처리 결과와 라디오존데값 간의 차이는 평균(Mean) -3.4mm로 나타났고 표준편차(STD,

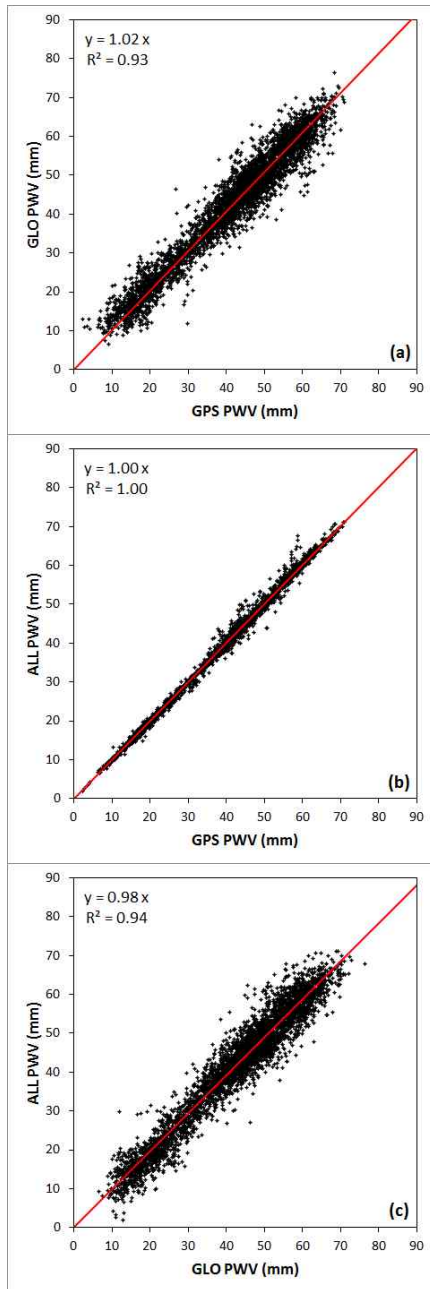


Figure 2. The correlated distribution of PWV from GPS, GLONASS(GLO), and GPS&GLONASS(ALL) measurements. The straight line is the linear regression line. (a)GPS vs. GLO, (b)GPS vs. ALL, (C)GLO vs. ALL

Standard Deviation)는 2.8mm를 보였으며 GLONASS 결과값이 가장 큰 차이를 보였다(Table 2). 이러한 결과는 다른 연구사례(Kwon et al., 2007; Wang and Zhang, 2008)에 비해 크게 나타난 편이었다.

두 시스템간의 오차가 다소 크게 발생한 원인에 대해 파악하고자 다른 GNSS 관측장비의 결과와 비교해 보았다. 이때 사용한 장비는 Trimble의 NetR5 수신기와 Zephyr 안테나이며 동일한 장소에 임시로 3일간 설치하여 관측을 수행하였다. 라디오존데와 NetR5 측정값 간의 차이는 평균 -1.1mm, 표준편차는 1.8mm로 나타나 관측소에 설치된 PolaRx4 결과에 비해 상대적으로 작은 차이를 보였다. PolaRx4의 결과값이 NetR5 관측값에 비해 오차가 상대적으로 크게 나타난 것은 실험에 사용된 GNSS 안테나 장비가 국제적으로 제공되는 안테나 위상중심변동 모델 테이블에 존재하지 않아 다른 기기(TRM55971.00)의 모델정보를 이용하였기 때문이라 판단된다. GNSS 신호는 안테나에 수신되는 방향에 따라 위상중심이 조금씩 다르기 때문에 NGS(National Geodetic Survey) 같은 곳에서 안테나 모델마다 보정치를 계산하여 제공하고 있다(NGS, 2012). Park and Won(2006)에 의하면 GPS 안테나의 PCV(Phase Center Variations) 모델에 따라 가장수량의 RMS(Root Mean Square) 오차가 최대 4.0mm까지 발생함을 보인 바 있다. 그래서 고정밀 자료처리시 안테나의 정확한 모델정보 적용이 필요하다.

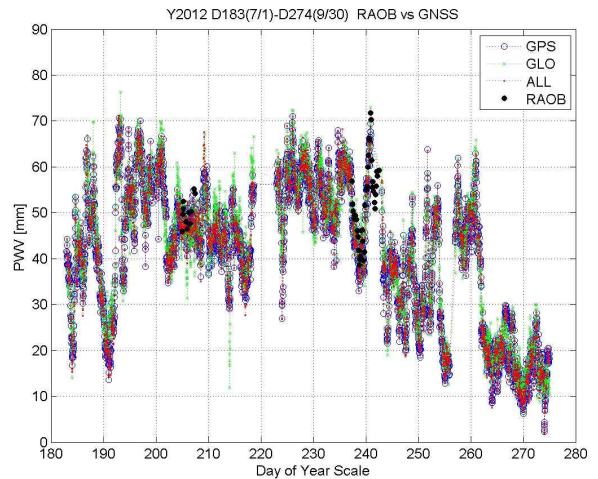


Figure 3. Time series of the PWV estimates retrieved with RAOB and GNSS for 3 months

Table 2. Statistical summary from difference PWV between RAOB and GNSS

	GPS-RAOB	GLO-RAOB	ALL-RAOB
Mean	-3.6 mm	-3.1 mm	-3.6 mm
STD	2.4 mm	3.5 mm	2.4 mm

### 3.3 라디오존데와 MWR 가강수량 비교

라디오존데 관측값을 참값으로 가정하고 두 MWR 측정값과 상호 비교하였다. Fig. 4는 세 기기로 측정된 값을 시계열로 표시한 것이다. 라디오존데와 RPG사의 MWR(이하 'MWRrpg') 측정값과의 평균차이는 0.3mm, 표준편차는 1.6mm로 나타났고, Radiometrics사의 MWR(이하 'MWRrmc')과는 2.1mm의 평균차이, 3.9mm의 표준편차를 보여 MWRrpg 측정값이 MWRrmc 관측값보다 더 작은 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다(Table 3). 라디오존데 측정값에 대한 기기간 차이를 보면 MWRrmc 측정값이 MWRrpg 측정값보다 변화 정도가 더 크게 나타났다(Fig. 5). MWRrpg 측정값과의 차이를 보면 약 50mm 보다 작을 때는 MWRrpg가 과대추정하고 클 때는 과소추정하는 것을 알 수 있었으며 MWRrmc의 경우에는 약 64mm 전후로 하여 과대에서 과소추정으로 변화하였다. 전체적으로 MWRrmc 측정값이 MWRrpg 관측값보다 과대추정하는 경향이 있음을 확인하였다. 향후 두 기기간의 편향오차를 줄이는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

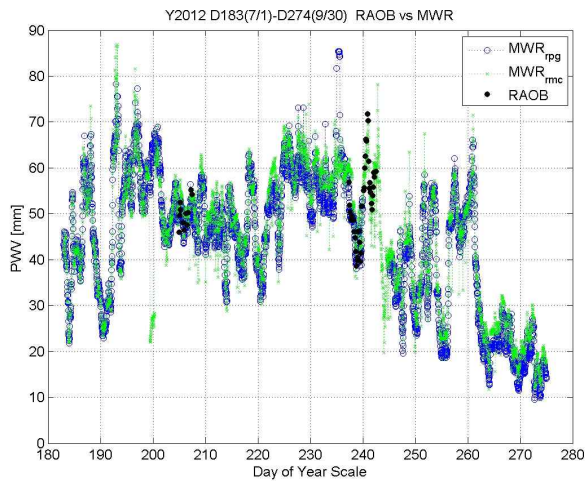


Figure 4. Time series of the PWV estimates retrieved with RAOB and MWR

Table 3. Statistical summary from difference PWV between RAOB and MWR

	MWRrpg-RAOB	MWRrmc-RAOB
Mean	0.3 mm	2.1 mm
STD	1.6 mm	3.9 mm

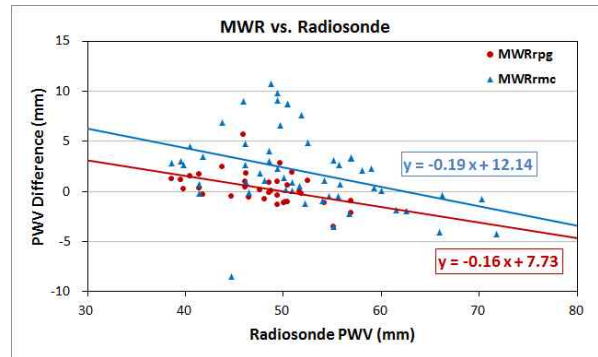


Figure 5. Scatter plots for difference between RAOB and MWR

### 3.4 GNSS와 MWR 가강수량 비교

GNSS 관측장비와 MWR 관측장비 2기를 이용하여 3개월간 가강수량을 산출하였고 Fig. 6에 각 장비별 산출 가강수량을 시계열로 표시하였다. 3.3절에서 라디오존데 측정값과 오차가 상대적으로 작게 발생한 MWRrpg 값을 GNSS의 신호별 산출값과 비교하였다. GLONASS 신호를 처리하였을 때 가장 작은 -1.9mm의 평균차이를 보였고 GPS 신호와 통합신호처리 결과와는 -2.8mm 평균차이를 보였다. 표준편차는 3.6-3.9mm로 세 신호 모두 비슷한 수준으로 나타났다(Table 4). 전체적으로 GNSS 측정값이 MWR 측정값보다 과소추정하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Sohn et al.(2012)이 계절별

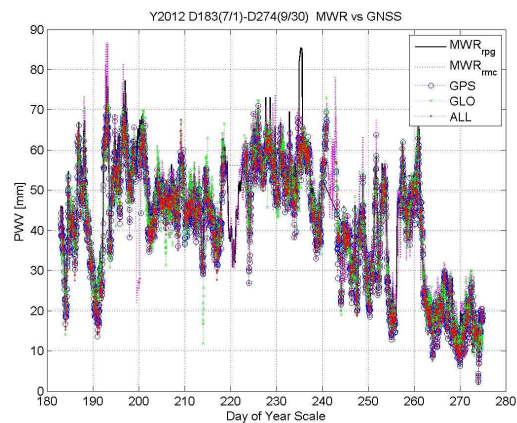


Figure 6. Time series of the PWV estimates retrieved with GNSS and MWR

Table 4. Statistical summary from difference PWV between GNSS and MWRrpg

	GPS-MWR	GLO-MWR	ALL-MWR
Mean	-2.8 mm	-1.9 mm	-2.8 mm
STD	3.6 mm	3.9 mm	3.7 mm

로 분석한 두 시스템간의 차이 경향과 유사하였고 여름철에 더 큰 차이가 발생하고 있음을 보인다 있다.

#### 4. 결 론

GNSS 시스템인 GPS와 GLONASS 신호를 각각 그리고 통합 이용하여 가강수량을 산출하였고 라디오존데와 MWR 측정값과 상호비교하여 정확도를 검증하였다. 각 시스템 별로 측정된 가강수량은 평균 0.6mm-3.4mm 차이를 보였고 표준편차는 1.0mm-3.8mm로 나타났다. GPS 신호처리 결과와 GPS&GLONASS 통합 신호 처리결과는 유사하게 나타났으나 GLONASS 처리결과는 두 신호 결과에 비해 과대 추정하는 경향을 보였다. 타 시스템과의 비교에서 GNSS 측정값이 타 시스템 관측값에 비해 차이가 상대적으로 크게 나타난 것은 실험에 사용된 안테나가 국제적으로 제공되는 안테나 위상중심변동 모델 테이블에 존재하지 않아 유사 모델정보를 이용하였기 때문이라 판단된다. 이 연구를 통해 GPS와 GLONASS의 통합신호 처리결과가 GPS 단독처리 결과와 유사하게 나타남을 확인하였고 향후 GPS 위성관측이 제한적인 지역에서도 GLONASS 위성신호와 통합 이용시 유효한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2013-8090)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R. H., 1992, GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pp.15787-15801.
2. Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., and Meindl, M., 2007, Bernese GPS software version 5.0, Printing Office of the University of Bern, Bern.
3. Ha, J., Kim, D., Park, K. D., Won, J., 2009, Observation of atmospheric water vapors using AIRS, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 26, No. 4, pp.547-554.
4. KNMI, 2013, Royal Netherlands Meteorological Institute, [http://www.knmi.nl/samenw/egvap/validation/stat\\_plot.cgi?GOPG,bias](http://www.knmi.nl/samenw/egvap/validation/stat_plot.cgi?GOPG,bias)
5. Kwon H. T., Iwabuchi T., Lim G.-H., 2007, Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observations over the Korean peninsula, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 85, No. 6, pp.733-746.
6. Lee, H. S., Park, K. D., Kim, D. S., Sohn, D. H., 2012, Analysis of integrated GPS and GLONASS double difference relative positioning accuracy in the simulation environment with lots of signal blockage, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 36, No. 6, pp.429-435.
7. Moon, Y. J., Choi, K. H., 1999, Estimation of precipitable water vapor using the GPS, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp.61-68.
8. NGS, 2012, NGS Antenna Calibration Procedures.
9. NOAA, 2013, Ground Based GPS Meteorology, <http://www.gpsmet.noaa.gov/>
10. Park, K. D., Won, J., 2006, Comparison of calibration models for GPS antenna phase center variations, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 24, No. 4, pp.319-326.
11. Park, W. Y., Kim, J. S., Kim, Y. B., Back, K. S., Accuracy analysis of positioning supplementary control point with the RTK-GPS and RTK-GPS/GLONASS, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, 2003, Vol. 11, No. 1, pp.61-69.
12. Rose, T., Czekala, H., 2009, RPG-HATPRO operating manual version 7.88, Printing Radiometer Physics GmbH, Meckenheim.
13. Sohn D. H., Park K. D., Won J., Cho J., Roh K. M., 2012, Comparison of the characteristics of precipitable water vapor measured by global positioning system and microwave radiometer, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 29, No. 1, pp.1-10.
14. Vedel, H., 2003, Radiosonde data specification document, TOUGH deliverables, The Danish Meteorological Institute.
15. Wang J., Zhang L., 2008, Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements, *Journal of Climate*, Vol. 21, pp.2218-2238.