

# 기압의 역해면 경정 보정을 이용한 GPS PWV 복원 능력 개선

## Improvement of GPS PWV retrieval capability using the reverse sea level corrections of air-pressure

송동섭<sup>1)</sup>

Song, Dong Seob

### Abstract

Signals from the Global Positioning System(GPS) satellite are used to retrieve the integrated amount of water vapor or the precipitable water vapor(PWV) along the path between a transmitting satellite and ground-based receiver. In order to retrieve the PWV from GPS signal delay in the troposphere, the actual zenith wet delay, which can be derived by extracting the zenith total delay and subtracting the actual zenith hydrostatic delay computed using surface pressure observing, will be needed. Since it has been not co-located between GPS permanent station and automated weather station, the air-pressure on the mean sea level has been used to determine the actual zenith hydrostatic delay. The directly use of this air-pressure has been caused the dilution of precision on GPS PWV retrieval. In this study, Korean reverse sea level correction method of air-pressure was suggested for the improving of GPS PWV retrieval capability and the accuracy of water vapor estimated by GPS was evaluated through a comparison with radiosonde PWV.

Keywords : Precipitable Water Vapor, Air-pressure, Radiosonde, Reverse Sea Level Correction

### 초 록

GPS 위성으로부터의 신호는 위성과 지상의 수신기 사이의 경로에 걸쳐서 누적된 양의 수증기나 가강수량으로 복원하기 위해 이용되고 있다. GPS 위성 신호의 대류권 지연으로부터 가강수량으로 복원하기 위해서는 대류권의 총 지연량으로부터 실제 습윤 지연량을 계산하기 위하여 표면 기압 관측을 통해 결정된 실제 건조 지연량의 계산이 필요하다. 그러나 기압 정보를 얻기 위한 기압계가 모든 GPS 상시관측소와 동일한 지점에 위치하고 있지 않기 때문에 지상 기상 관측소로부터 획득한 해면 경정된 기압 정보를 이용하곤 한다. 이러한 기압의 직접 이용은 GPS를 이용한 수증기 복원 능력을 저하시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 우리나라에 적합한 기압의 역해면 경정 보정 방안을 제시하고 이를 이용한 GPS 수증기의 정확도를 레디오존데 PWV와 평가하고 GPS로 추정할 수증기의 복원 능력의 개선 방안을 제시하였다.

핵심어 : 가강수량, 대기압, 레디오존데, 역해면 경정 보정

## 1. 서 론

GPS 위성으로부터 송신된 L 밴드 영역의 주파수는 지구의 대기권을 통과하면서 대기를 구성하고 있는 미세 입자에 의해 신호가 굴절하면서 전송 속도에 변이를 일으켜 신호 지연이 발생한다. 특히, 대기권 중에서 전리

층과 대류권에서의 신호 지연량이 크게 나타나는데 전리층에서의 신호 지연은 전송 주파수의 종류에 따라 분산적인 특징을 가지고 있기 때문에 2주파 수신기를 이용한 선형 조합을 통해 소거할 수 있다(Ware 등, 1996). 그러나 지상에서 약 10km에 분포하고 있는 대류권에서는 수증기와 같은 대기 구성 매질에 의한 비분산적 특성으

1) 정회원 · 미국 Ohio State University SPIN Laboratory · 공학박사(E-mail:song.306@osu.edu)

로 인하여 GPS 위성 신호는 굴절 지연을 유발하게 된다. 따라서 대기에 의한 GPS 위성 신호의 전파 지연은 비모델화된 다중 경로 오차와 더불어 GPS를 이용한 위치 결정에 있어서 주요 오차 발생 원인이 되고 있다(Meertens 등, 1997). 이러한 GPS 신호의 대류권 지연은 많은 학자들에게 위치 정확도 향상과 오차 소거를 위한 보정 모델 개발 연구의 동기가 되었다(Saastamoinen, 1972; Davis 등, 1985; Askne와 Nordius, 1987). Herring (1990)과 Tralli 및 Lichten (1990)은 GPS를 이용한 위치 결정에서 미지수인 천정 지연량을 동시에 계산하는 방법을 개발하였으며, 마침내 GPS 위성 신호의 천정 방향에 대한 대류권 지연을 이용한 수증기량을 추정하는 방법이 Bevis 등 (1992)에 의해 명확하게 제시되었다. 현재 미국 해양 기상청 (National Oceanographic and Atmospheric Administration; NOAA)은 GPS 대류권 신호 지연으로부터 복원한 수증기량 정보를 기상 현업 예보에 이용할 목적으로 GPS 기상 네트워크를 설치하고 운용하고 있는 상태이다(<http://gpsmet.noaa.gov>). GPS를 이용한 수증기 복원은 기존의 레디오존테에 비하여 매우 경제적이며, 높은 시간해상도와 공간해상도를 가지고 연속적인 수증기 정보 제공이 가능하기 때문에 기상 예측에 필요한 수증기 측정을 위한 매력적인 수단으로 인식되어지면서 활용성이 날로 증가하고 있다.

선진국을 중심으로 기상 예보와 기후 예측을 위한 GPS 수증기 복원 정확도 향상을 위해서 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 실제 건조 지연량 계산을 위해서 이용하는 관측소 표면 기압은 일반적으로 GPS 관측소와 동일한 지점에 기압계가 설치되지 않음으로 인하여 비교적 근접한 지점에 위치하고 있는 지상 기상 관측값을 이용하는 과정에서 GPS 관측소와의 고도차로 인한 기압의 경정 보정을 통해 GPS 수증기 복원 정확도를 향상할 수 있는 방안이 제시되었다(Feng과 Bai, 2001). 우리나라의 경우에도 역해면 경정에 의한 보정 방법이 제시된 바가 있다(송동섭과 윤희식, 2004; 2006). 그러나 송동섭과 윤희식(2004)의 연구 결과는 호주의 해면 경정 모델을 적용한 결과이며, 2006년도 연구 결과는 5일간의 GPS 관측데이터 처리 결과만을 이용하여 평가한 것으로서 장기간 기후 변화 추이를 모니터링 하기 위한 GPS 수증기 추정 정확도 검증에 한계를 가지고 있다고 판단된다. 본 연구에서는 우리나라 기상청에서 제공하고 있는 해면 경정된 기압 정보를 GPS 관측소 위치로의 역해면 경정 보정에 대한 기존 연구 결과에 대하여 상세한 적용

방법을 추가적으로 제시하고 이를 적용한 장기간의 GPS 데이터 처리를 통한 GPS 수증기 복원 능력을 레디오존테로부터 복원한 수증기 정보와 비교하고자 하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 GPS 수증기 복원 능력을 개선하기 위한 기압 정보의 기하학적 보정 방안을 제시하였다.

## 2. 기압의 역해면 경정 보정 과정

GPS PWV(Precipitable Water Vapor)의 계산은 이론적으로 구한 대류권의 총 지연량으로부터 대기의 화학적 조성 상태가 일정하다는 가정 하에 기체 정역학적 평형 방정식을 사용하여 실제 건조 지연량을 얻을 수 있다. 이 실제 건조 지연량은 관측소 지역의 기온과 기압 정보 및 관측소까지의 타원체고를 이용하면 경험적 건조 지연 모델에 의하여 계산이 가능하다. 경험적 건조 지연 모델은 Hopfield 모델, Black 모델, MOPS 모델 및 Saastamoinen 모델 등 여러 가지 모델이 존재하나 현재 GPS를 이용한 수증기 복원에 있어서 가장 적합한 모델은 다음의 식 (1)과 같은 Saastamoinen 모델로 알려져 있다.

$$\begin{aligned}
 ZHD &= \frac{0.022275 \left[ \frac{m^2}{s^2 \cdot h \cdot Pa} \right] p_0}{9.784 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \left( 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028 \left[ \frac{1}{km} \right] \cdot h \right)} \\
 &= \frac{0.0022767 \left[ \frac{m}{h \cdot Pa} \right] p_0}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028 \left[ \frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,  $h$  : 타원체면에서 GPS 안테나까지의 높이,  
 $\varphi$  : 타원체상의 위도,  $p_0$  : 관측소 기압

Saastamoinen 모델은 높은 정확도로 인하여 GPS 기상 연구에서 가장 많이 이용된다. Elgered 등(1991)은 굴절 상수의 오차가 대략 2.4mm이면 전세계 기체 상수의 불확실성 값인 0.1mm와 건조 평균 물증량 0.1mm의 합에 의하여 중력 보정의 불확실성에는 0.2mm에 가까운 영향을 지닌다고 건조 지연량의 RMS 오차 원인을 분석하였다. 또한 Hopfield 모델에 비하여 Saastamoinen 모델은 어떠한 기온 관측값도 필요치 않으며, 중력 보정 계산을

위해서 관측소의 고도와 위도만이 필요하다고 밝혔다.

경험적 건조 지연량을 계산하기 위해서 필요한 GPS 안테나의 타원체고는 GPS 상시관측소 운영 기관에서 고시하거나 결정된 타원체고를 적용하면 되고, 임의 관측이나 캠페인 관측일 경우에는 GPS 관측데이터의 기선 해석을 실시하여 계산된 타원체고를 이용하면 된다. 한편 기상 정보는 GPS 안테나를 설치한 동일 지점에 기상 센서를 설치하여 그 정보를 이용하는 것이 이상적이거나 현실적으로는 GPS 기상 연구를 목적으로 운영되는 GPS 상시관측소를 제외하고는 일반적인 GPS 상시관측소에는 기상 관측 기구가 동일한 위치에 설치되어 있지 않다. 따라서 GPS 상시관측소와 기상 관측소 사이에는 기하학적으로 이격이 되어 있게 된다. 경험적 건조 지연 모델에서 중요한 기상 변수인 GPS 상시관측소의 기압과 기온은 관측소 표면상의 측정값이 요구되며 기상 관측값의 정확도에 따라 실제 건조 지연량의 정확도가 달라질 수 있다. Bevis 등(1992)은 기압 관측값 0.3hPa 당 약 0.1mm의 PWV 오차를 유발할 수 있다고 제시하였다. 고도에 따른 기온의 변화는 다음의 식(2)로 구할 수 있다.

$$\Delta T = \beta \cdot \Delta H \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 고도에 따른 온도의 변화율이며,  $-6 \pm 0.5$  K/km 정도가 된다. 열대 지역에서는  $\beta = -6.05$  K/km, 온대 지역에서는  $\beta = -6.25$ , 북극 지방에서는  $\beta = -6.525$  정도가 된다. 가령 기상 관측소와 GPS 관측소의 고도차( $\Delta H$ )가 100m라면 온대 지역에 위치한 우리나라의 경우에는  $\Delta T = -6.25 \times 0.1 = -0.625$  K로 계산할 수 있으며, 이러한 기온 차이는 GPS PWV 계산에 있어서 매우 적은 오차를 갖게 된다. 따라서 대부분의 GPS 기상 연구에서는 고도차에 의한 기온 변화량을 고려하지 않는다. 본 연구에서도 GPS 관측소의 기온 정보는 GPS 관측소가 설치된 지역의 기상 관측소의 관측 정보를 직접 이용하였다.

우리나라의 기상청에서 제공하고 있는 기압 정보는 일기도 작성을 위하여 기상 관측소에서 관측한 기압을 일정한 고도상의 기압으로 보정하여 제공하고 있다. 보편적으로는 이 일정한 고도면을 편위상 평균해수면으로 취급하며 각각의 관측소 기압은 이 평균해수면상의 기압으로 환산하게 된다. 이러한 일련의 작업을 해면 경정(reduction to mean sea level)이라고 한다. 해면경정은 관측소의 고도·기온·습도·중력 등에 의하여 다르다. 각 나라에서도 자국에 적합한 경정식을 사용하여 평균해수

면상에 경정된 기압 보정값을 구한 후에 기상 관측소의 측정 기압에 이 기압 보정값을 보정하여 평균해수면상의 기압으로 이용하고 기압골 등의 분석에 적용하고 있다. 우리나라 기상청은 1950년 이래로 다음의 식 (3)을 사용하여 기압의 해면 경정값을 구하고 있다(소선섭 등, 2000).

$$\Delta P = P_W \times \left[ \exp \frac{gH}{287.04 \left( 273.15 + \frac{t + (\Gamma H)}{2} \right) + \epsilon_m} - 1 \right] \quad (3)$$

여기서,  $\Delta P$ : 해면 경정값 [hPa],  $P_W$ : 기상관측소 측정기압 [hPa],  $\exp$ : 지수함수의 기호,  $g$ : 중력가속도[ $\frac{m}{s^2}$ ],  $H$ : 해발고도 [m],  $\Gamma$ : 기온감률,  $\epsilon_m$ : 수증기에 의한 영향 보정값

그림 1은 실제 기상 관측소의 측정 기압을 GPS 관측소 고도로의 기압으로 보정하는 과정을 설명하고 있다. 평균해수면으로부터 해발고도( $H_w$ )만큼 떨어져있는 기상 관측소에서 측정된 기압( $P_w$ )은 식 (3)을 이용하여 구한 해면 경정값( $\Delta P$ )을 빼어 평균해수면으로 기준한 기압( $P_M$ )으로 제공된다. 이 기압은 상대적으로 의사(擬似)비정수역학적(quasi-non-hydrostatic)인 높이이다. GPS PWV를 계산하기 위하여 기상청에서 제공하고 있는 이 평균해수면 기준의 기압( $P_M$ )을 그대로 이용한다면 GPS로 복원한 가강수량의 정확도는 저하된다.

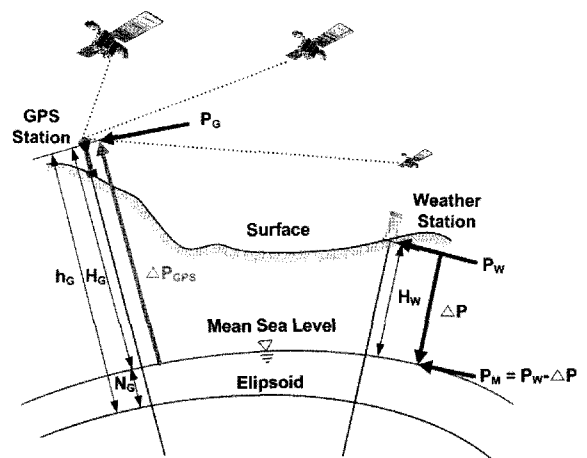


그림 1. GPS 상시관측소 고도로의 기압 역해면 경정 과정을 들어 평균해수면상의 기압이 1000 hPa로 관측되

있을 때 해발고도 500m에 위치한 GPS 상시관측소에서 기압은 기온이 15℃라는 동일한 조건이라고 가정할 때 식 (3)의 해면 경정에 의해 역 보정된 기압은 약 940.8 hPa로서 약 60 hPa의 차이를 보이게 된다. 이러한 기압의 차이는 GPS 가강수량의 계산에 있어서 약 20mm의 오차를 유발한다. 이 오차는 GPS 가강수량의 분포가 보통 30~80mm 범위에서 분포하는 것을 감안할 때 GPS 가강수량의 정확도를 크게 저하시키는 원인이 되는 것이다. 본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 평균 해수면상의 기압인  $P_M$ 을 GPS 관측소의 해발고도인  $P_G$ 를 토대로 식 (3)을 이용한 해면 경정값( $\Delta P_{GPS}$ )을 구하여 기상청에서 제공하는 해수면상의 기압( $P_M$ )에 역으로 보정한 보정기압( $P_G$ )을 경험적 건조 지연 모델에 적용이 가능한 방법을 제시하였다. 이러한 역해면 경정 과정을 정리하면 다음 식과 같다.

$$(P_W - \Delta P) + \Delta P_{GPS} = P_M + \Delta P_{GPS} \quad (4)$$

GPS 관측소 고도로의 역해면 경정값을 구하기 위해서는 GPS 관측소의 해발고도를 알고 있어야 한다. 직접 수준측량에 의해 GPS 관측소의 해발고도를 계산한 결과가 있다면 이를 이용하여 역해면 경정값을 구하거나, GPS 관측소의 타원체고( $h_G$ )와 정밀 지오이드 모델로부터 구한 지오이드고( $N_G$ )를 이용하여 다음 식 (5)와 같이 기하학적인 관계로부터 구한 정표고( $H_G$ )를 적용해도 된다. 단, 이 과정에서 지오이드모델의 정확도는 정표고의 정확도에 직접적인 영향을 주며, 정표고의 정확도는 역해면 경정값의 정확도에도 관계가 있다는 점에 유의하고 가능한 지역적/국가적으로 가장 최적합한 지오이드 모델을 사용하여야 한다. 여러 GPS 위성 신호의 대류권 지연을 이용한 수증기 복원과 관련된 기상 연구에서 지오이드모델은 EGM96 모델이 이용되고 있다(Baltink 등, 2002).

$$H_G = h_G - N_G \quad (5)$$

### 3. 기압의 역해면 경정 보정을 통한 GPS PWV의 복원 정확도 평가

#### 3.1 기압의 역해면 경정 보정

자동기상관측소(Automated Weather Station; AWS)에서 관측한 평균 해수면상의 기압을 GPS 관측소 현지 고도

로의 역해면 경정 보정값을 구한 뒤, 이 보정 기압을 이용하여 복원한 GPS PWV와 레디오존데를 통해 관측한 상층 대기의 PWV(RAD PWV)와의 정확도를 검증하기 위해 고층기상관측소와 인접한 지역의 GPS 상시관측소의 선택이 필요하다. 우리나라에서 운용중인 레디오존데 관측소인 오산, 포항, 광주, 제주, 속초, 백령도와 인접한 곳은 국토지리정보원의 수원(SUWN), 광주(KWNJ), 해양수산부의 호미곶(HOMI), 소청도(SOCH), 한국천문연구원 속초(SKCH), 제주(CHJU)이다. 그러나 본 연구의 연구 기간인 2004년 동안 GPS 관측소 운영이 내부 시스템 사정으로 관측이 끊겨 데이터가 없는 지역이 있는 관계로 인하여 최대한 데이터 협조를 받을 수 있는 기관과 데이터 부족이 가장 적은 지역으로 다시 검토한 결과, 국토지리정보원의 수원(SUWN)과 제주(CHJU), 장흥(JAHG) 및 울산(WOLS)의 4 개소를 GPS 가강수량의 복원 평가 대상으로 선정하였다.

표 1은 연구 대상 GPS 상시관측소의 위치 성과를 나타낸 것으로 기준 좌표계는 ITRF2000(기준 타원체 : GRS80)이다. GPS 상시관측소의 표고는 인천만의 평균 해수면으로부터 ARP(Antenna Reference Point)까지의 높이이다. GPS 상시관측소의 표고는 2009년에 고시된 국토지리정보원의 위성측량기준점 측량성과를 기준 처리 결과(송동섭, 2007)에 새롭게 갱신/적용하였다(국토지리정보원, 2009). 레디오존데 관측소의 위치 성과는 소선섭 등(2000)의 부록에서 발췌한 성과를 기재하였다. 표 2는 GPS 상시관측소와 고층기상관측소(GPS-Rad) 및 지

표 1. GPS 상시관측소와 레디오존데 관측소 위치 성과

GPS 상시관측소 (레디오존데 관측소)	위도	경도	타원체고 (m)	정표고 (m)
수원 (오산)	37-16-31.8529 (37-06)	127-03-15.2638 (127-02)	83.816	60.114 (52.0)
울산 (포항)	35-30-14.2082 (36-02)	129-24-57.6523 (129-23)	95.948	66.110 (6.0)
장흥 (광주)	34-40-31.2562 (35-07)	126-53-58.4548 (126-49)	116.774	91.386 (13.0)
제주 (제주)	33-23-05.0471 (33-17)	126-37-08.6106 (126-10)	785.490	759.462 (73.0)

주) 레디오존데 관측소는 타원체고 정보 없음.

표 2. GPS 상시관측소와 기상 관측소간의 기하학적 이격 정보

GPS 상시관측소	거리차(km)		고도차(m)	
	GPS-Rad	GPS-Met	GPS-Rad	GPS-Met
수원(SUWN)	19.6	2.1	8.114	26.518
울산(WOLS)	58.7	10.4	60.110	31.413
장흥(JAHG)	49.51.8	73.386	46.188	
제주(CHJU)	43.6	16.7	686.462	738.460

상시상관측소(GPS-Met)간의 거리와 고도의 차이를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 GPS 관측데이터로부터 대류권 지연을 추정하기 위하여 NASA/JPL에서 개발한 GIPSY-OASIS II(GOA II) 소프트웨어를 사용하였다. GOA II를 이용하여 2004년 1월 1일부터 12월 31일간 4개소의 GPS 상시 관측소에 대한 1시간별 이론적 건조 지연량(ZHD; Zenith Hydrostatic Delay)과 습윤 지연량(ZWD; Zenith Wet Delay)을 추정하였으며, 이 두 지연량을 합한 이론적 총 지연량(ZTD; Zenith Total Delay)로부터 식 (1)의 Saastamoinen 건조 지연 모델에 AWS의 관측 기압(미보정 기압)과 역해면 경정 보정에 의한 보정 기압을 적용한 경험적 건조 지연을 산출하여 ZTD에서 빼주어 실제 습윤 지연량을 계산하였다. 이 실제 습윤 지연량을 GPS PWV로 환산하여 RAD PWV와 평가를 실시하였다.

### 3.2 레디오존데 PWV 복원

본 연구에서는 기압의 역해면 경정 보정 전후의 GPS PWV의 상대적인 정확도를 평가하기 위하여 고층기상관측기구인 레디오존데로부터 관측한 상층 대기층 별로 관측한 데이터를 이용하여 PWV를 복원하였다. 레디오존데는 상층 대기의 기압, 기온, 노점온도, 습도, 풍향, 풍속 등을 측정한다. 상층 대기의 기압은 반경 4cm의 공함(空盒)을 2개 겹친 것, 기온은 쌍금속, 습도는 6cm의 모발(毛髮)을 이용하여 측정한다. 측정된 각 요소의 변화는 기계에 붙어 있는 바늘에 전달되며 바늘은 부호판에 접촉된다. 이에 따라 부호가 지상에 발신된다. 국제 고층 기상 관측망을 구성하는 모든 관측소에서는 협정 세계시(UTC)로 매일 0시와 12시에 2회씩 상층 기상요소를 관측하고 있다. 레디오존데를 통해 관측한 기온과 노점 온도로부터 Clausius-Clapeyron의 적분 형태의 식 (6)을 통해 상대습도의 계산이 가능하다.

$$T - T_d = 4.25 \times 10^{-4} T T_d (-\log U_w) \quad (6)$$

여기서,  $T$  : 기온 [K],  $T_d$  : 노점온도 [K],  $U_w$  : 상대습도

실제 수증기압과 포화 수증기압의 비로서 정의되는 상대습도를 통해 실제 수증기압을 계산하기 위해서는 다음의 Magnus 공식의 적용을 통해 포화 수증기압을 계산할 수 있다.

$$\log e_w = \frac{-2937.4}{T} - 4.9283 \log T + 23.5470 \quad (7)$$

여기서,  $e_w$  : 포화수증기압

습윤 상태의 공기에서 단위 질량당 수증기의 질량으로 나타내는 비습도(specific humidity)는 레디오존데 데이터로부터 가강수량 복원 과정에서 요구되며, 식 (8)과 같은 경험식에 의하여 산출할 수 있다.

$$q = 622 \frac{e}{(P_a - 0.378e)} \quad (8)$$

여기서,  $q$  : 비습도

$P_a$  : 기압 [hPa]

$e$  : 실제 수증기압

레디오존데를 이용한 가강수량의 복원은 대기층별 내부의 평균 기압과 층의 상부 및 하부에서의 기온, 습도 등의 측정에 의해 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$W_p = \Sigma 0.01 \cdot \bar{q} \cdot \Delta P_a \quad (9)$$

여기서,  $W_p$  : 가강수량(mm)

$\Delta P_a$  : 대기층 내의 기압 변화량 [hPa]

$\bar{q}$  : 대기층의 상부와 하부에서의 비습도 평균값 [g/kg]

본 연구에서는 이러한 일련의 과정을 거쳐 1년간의 레디오존데 6개 관측 지점에 대하여 PWV를 계산하였다. 그림 2는 GPS PWV 복원 정확도를 평가하기 위하여 이용한 레디오존데 4개 관측소의 2004년 PWV 복원 결과에 대한 시계열 그래프를 나타낸 것이다. 그래프 상단에는 각 지역별로 최대 RAD PWV를 기재하였다. 2004년에 최대 RAD PWV는 오산에서 63.62mm(8월 17일 06

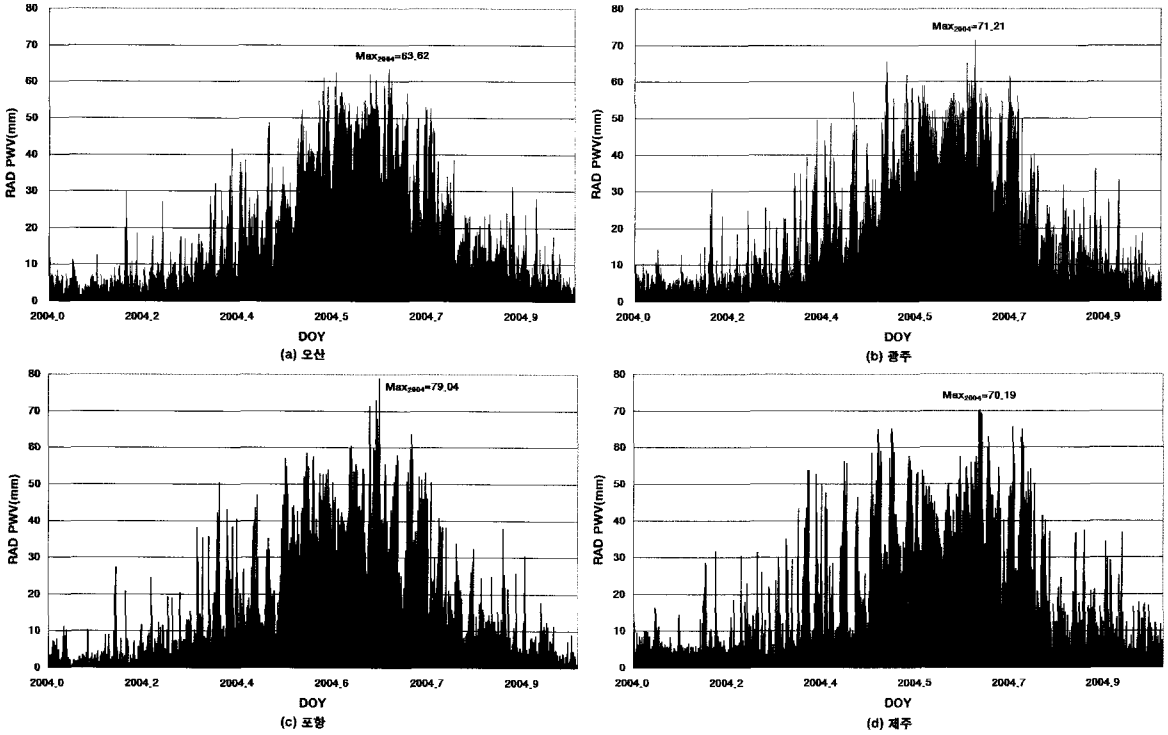


그림 2. 최대 RAD PWV의 시계열 그래프(2004년)

시), 광주는 71.21mm(8월 18일 18시)를 보였으며, 포항과 제주는 각각 8월 19일 00시와 8월 18일 06시에 79.04mm, 70.19mm(8월 18일 06시)의 최대 RAD PWV의 크기를 나타냈다.

### 3.3 GPS PWV 복원 능력 평가

그림 3은 기압 미보정과 보정후의 GPS PWV와 RAD PWV의 차이에 대한 분포를 나타내고 있다. AWS로부터 제공된 평균 해수면 상의 해면 기압을 적용하여 구한 GPS PWV와 RAD PWV의 편차는 붉은 색 실선으로 표시하였으며, 식 (4)를 통해 구한 역해면 보정 기압을 적용한 편차는 파란 색 점선으로 표시하였다. 각 그래프의 좌측에서 0으로 표시되는 중앙선은 GPS PWV와 RAD PWV의 차이가 없다는 것을 의미하며 중앙선으로부터 떨어질수록 GPS PWV와 RAD PWV간의 차이가 커진다는 것을 의미한다. 기압의 보정/미보정에 따른 편차의 그래프에서 중심에 위치하고 있는 굵은 적색 실선과 굵은 청색 점선은 각 편차량의 선형 회귀식을 나타낸 것으로서 0의 값을 나타내는 중앙선과의 이격 정도를 쉽게 파악할 수 있도록 하기 위하여 삽입한 것이다. GPS 상시

관측소와 AWS의 고도차가 약 26m에서 46m의 차이를 나타내고 있던 수원과 울산 및 장흥 지역을 보면 역해면 경정 보정 기압의 적용 전, 두 PWV의 차이가 중앙에서 조금 떨어져 있다가 역해면 경정 보정을 통한 보정 기압 적용을 통하여 편차가 중앙선으로 집중하면서 그 차이가 적어지는 것을 볼 수 있다. 특히 GPS 관측소와 기상 관측소간의 고도차가 약 740m에 달했던 제주 지역의 경우는 앞서 설명한 바와 같이 큰 고도차에 의한 기압 차이로 가장수량의 편차가 기압 보정 전에는 매우 크게 나타나고 있다.

표 3은 평균 해수면상의 기압과 2절에서 제시한 역해면 경정을 보정한 기압을 적용하여 구한 GPS PWV와 RAD PWV간의 차이에 대한 통계 결과를 나타낸다. GPS PWV 계산 과정에 있어서 모든 조건은 동일하게 부여하였으며, 단지 기압 관측값만을 다르게 입력하여 분석한 것이 표 3의 결과이다. 그림 4는 역해면 경정 보정 기압 적용 전후에 대한 RMSE 정확도 비교를 막대그래프로 표현한 것이다.

기압 보정 전에 비하여 기압 보정후의 표준편차는 오히려 수원과 제주에서 매우 미소하나마 커지는 것을 알

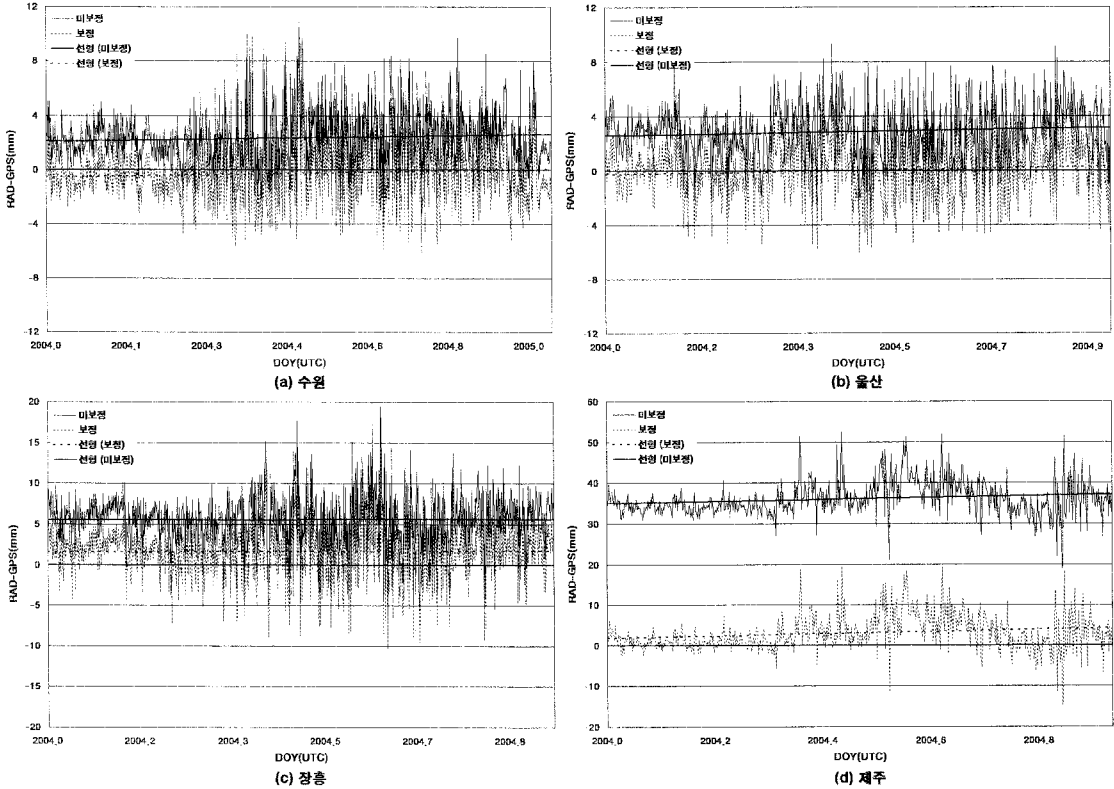


그림 3. 지역별 역해면 경정 보정 기압 적용 전후의 PWV 차이 비교

표 3. 역해면 경정 보정 기압 적용 전후의 PWV 차이 비교

구분		수원	울산	장흥	제주
기압	표준편차	2.187	2.280	3.266	4.291
	RMSE	3.230	3.661	6.497	36.418
미보정	표준편차	2.189	2.278	3.261	4.383
	RMSE	2.203	2.278	3.642	5.335
RMSE 향상률(%)		46.62	60.71	78.39	582.62

수 있다. 그러나 실제 GPS PWV 정확도 평가의 기준이 되는 RMSE(Root Mean Square Error)는 개선이 되는 것을 알 수 있다. 수원의 경우에는 기압 보정 전에  $\pm 3.230\text{mm}$ 를 보이다가 역해면 경정된 기압을 적용함으로써 47%의 정확도가 향상된  $\pm 2.203\text{mm}$ 를 보였으며, 울산은 61%, 장흥은 78%의 향상된 결과를 보였다. 표 2에서 GPS 상시관측소와 지상기상관측소 간의 고도차가 약 740m에 달하였던 제주의 경우에는 역해면 경정한 보정 기압을 사용함으로써 거의 6배 정도(583%)의 복원 정확도가 높

아졌다. 이러한 사실은 GPS를 이용한 가강수량 추정에는 반드시 GPS 관측소 지점의 기압이 이용되어야 한다는 것을 정량적으로 보여주는 것이다. 따라서 GPS 상시관측소를 이용한 GPS PWV 복원 연구나 기상 현업으로의 적용을 위해서는 GPS 관측소와 동일한 지점에 설치된 기압계를 이용하여 현지 기압을 측정하거나 최소한 본 연구에서 제시한 역해면 경정 과정을 적용하여 보정된 기압을 이용할 것을 제안한다.

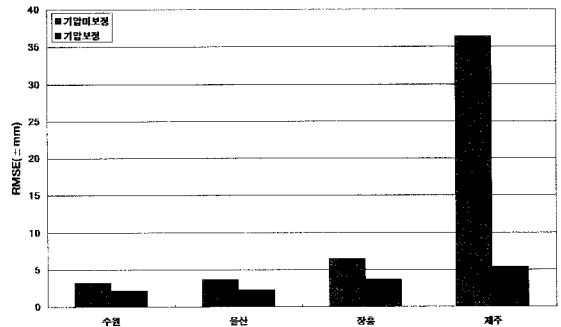


그림 4. 지역별 역해면 경정 보정 기압 적용 전후의 가강수량 차이 RMSE 비교

그림 5는 역해면 경정 보정 기압 적용 전후의 GPS PWV와 RAD PWV의 상관 관계를 분석한 결과를 나타낸다. 두 변량 사이의 상관 계수는 상관 분석에 대한 지표의 의미이다. 상관 분석은 연속되는 변수들간에 한 변수가 다른 변수와 관련성이 있는지를 비교하기 위한 분석법이다. 측정 단위에 관계없이 두 변수의 관계를 비교하기 위하여 공분산을 표준화한 것이다. 정적 상관인 관계에서는 두 변수의 관계는 같은 방향으로 움직이는 경

향이 있다. X변수가 증가하면 Y변수도 증가하고, X변수가 감소하면 Y변수도 감소한다. 부적 상관에서는 두 변수의 방향이 서로 반대로 나타난다. 따라서 양의 상관 관계일 경우에는 상관 계수가 (+)로 나타나며 음의 상관 관계일 경우에는 (-)로 나타난다. 상관 분석은 여러 종류가 있는데 변수의 수와 측정 기준에 따라 달라진다 (Mikhail 과 Gracie, 1981). 변수의 수에 대해서는 단순 상관 관계, 다중 상관 관계, 부분 상관 관계로 나뉘며 본 연구의 회귀식의 상관 계수는 변수가 GPS PWV와 RAD PWV의 두 변수이므로 단순 상관 관계를 보여준다. 측정 수준에 대해서는 서열 변수간 상관 관계와 등간 변수간 상관 관계로 구분된다. 변수간의 관련성의 척도 기준은 특정 변수의 분산 중에 다른 변수와 같이 변화하는 분산인 공분산이 어느 정도가 되느냐에 따라 좌우된다. 공통으로 변화하는 부분이 많은 수록 상관도가 높게 나타나며 공통으로 변하는 부분이 완전히 일치하면 상관 관계는 1이 된다. 상관 관계의 강도를 나타내 주는 것이 상관 계수로서 상관 관계의 제곱을 흔히 결정 계수라고 부른다. 식 (10)은 상관 계수의 수식을 나타낸 것이다. 이러한 상관 관계는 회귀 분석 결과를 평가함에 있어서 유용하다.

$$\rho_{xy} = \left[ \left( \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left( \frac{Y - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right] = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

여기서,  $\rho_{xy}$  : 상관 계수,  $\sigma_{xy}$  : 공분산

수원과 울산의 경우에는 기압의 역해면 경정 보정 전후에 RMSE의 상승뿐만 아니라 선형 회귀식의 절편과 기울기의 변화도 나타났으나 상관 계수의 변화는 보이지 않았다. 이러한 결과는 기압계의 고도와 GPS 상시관 측소의 해발 고도차가 약 30m 이내의 범위에서는 기압 경정과 역해면 경정 후의 PWV의 차이에 대한 편의량 (bias)이 일률적임을 의미한다. 그러나 고도 차이가 약 45m를 넘어서는 장흥은 역해면 경정 보정전에는 상관 계수가 0.9783에서 0.9828, 580m가 넘는 제주의 경우에는 0.9698에서 0.9783으로 상향 조정되면서 상관 강도가 강하게 변하는 것으로 나타났다. 상관 계수의 강도가 상승하는 것은 기압의 역해면 경정 보정을 통한 GPS PWV의 복원 능력이 레디오존데를 이용하여 복원한 PWV와 보다 작은 편의량을 가지고 밀접하게 대응한다는 것을 의미한다. 따라서 대류권 내에서의 수증기 분자, 에어로

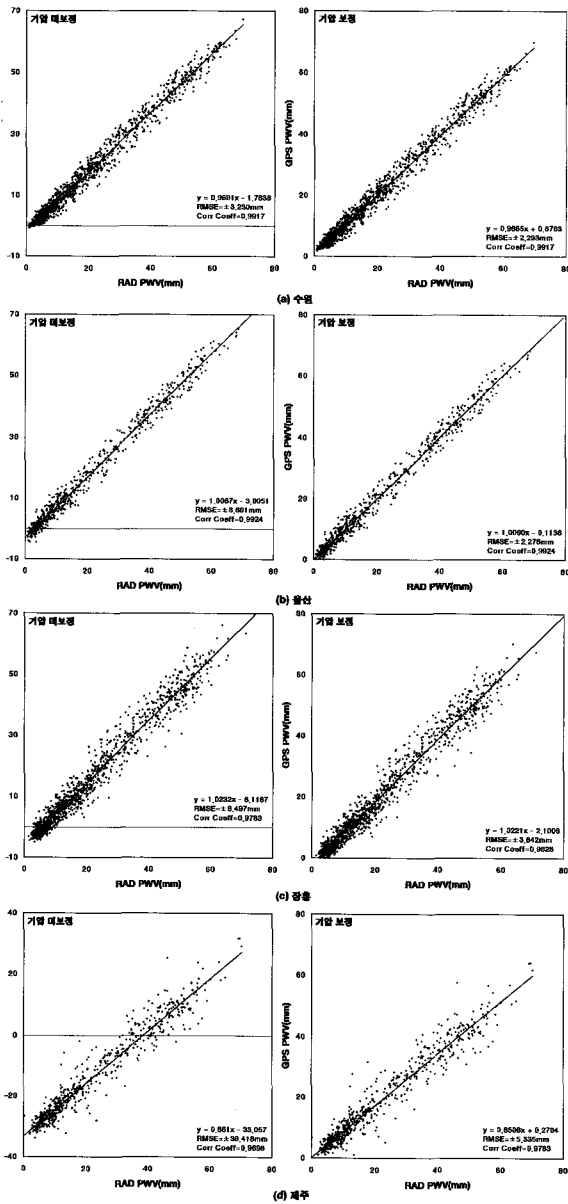


그림5. 역해면 경정 보정 기압 적용 전후의 GPS PWV와 RAD PWV의 상관 분석 결과



줄, 대기수상(大氣水象, hydrometer)과 같은 매질들로 인한 GPS 신호의 굴절로부터 수증기 복원의 능력을 개선하기 위해서는 GPS 관측소의 현지 기압 정보의 직접 이용을 위한 방안을 마련하거나 기상 관서에서 제공하는 기압 정보의 역해면 경정 보정에 의한 이용이 필수적으로 요구된다고 판단된다.

마지막으로 우리나라의 역해면 경정 보정 모델과 기존 송동섭과 윤홍식(2004)의 연구 결과에서 적용하였던 호주 모델의 적용에 따른 GPS PWV 복원 정확도를 비교/평가하였다. 그림 6은 두 모델의 적용을 통한 RMSE의 평가 결과를 나타낸 것이다. 호주 모델을 적용한 결과에 비하여 우리나라 모델을 적용한 RMSE는 수원 0.136%, 울산 0.293%, 장흥 1.032% 제주 6.661%의 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한 호주 모델을 적용한 GPS PWV 복원 정확도는 두 관측소의 고도 차이에 따라 선형적으로 저하되는 것을 그림 6을 통해 알 수 있다.

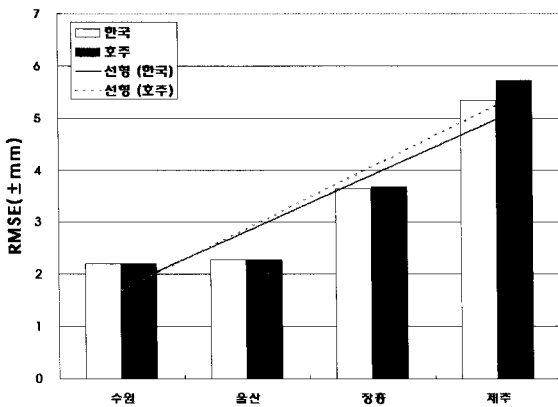


그림 6. 우리나라와 호주의 역해면 경정 보정 모델 적용 비교 결과

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GPS 위성 신호의 대류권 총 지연량을 추정하고 총 지연량으로부터 실제 습윤 지연량을 결정하는 과정에 있어서 요구되는 GPS 관측소의 기압 정보에 대한 우리나라의 역해면 경정 보정 방법을 제안하였다. 역해면 경정 보정 기압을 적용하여 천정 방향에 대한 수증기 정보인 가강수량으로 환산함에 있어서 그 복원 능력을 평가하기 위하여 레디오존데로부터 추정한 가강수량 정보와 정확도를 비교·평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GPS 관측소와 지상 기상 관측소간의 고도 차이에 따라 비례적으로 복원 정확도가 향상되는 것을 파악할 수 있었다. 또한 역해면 경정 보정 기압의 적용 전후에 대한 상관 분석을 통하여 GPS를 이용한 수증기 복원 능력이 레디오존데 가강수량보다 보정 후의 상관 강도가 상승되는 것을 확인할 수 있었다.
2. 기압의 역해면 경정에 의한 GPS 가강수량 복원 능력의 개선 결과를 통해 GPS를 이용한 가강수량 추정시 GPS 관측소 지점으로 기압계나 기온계와 같은 기상 관측 장비의 위치 동기화(co-located)를 통하여 관측 기압의 직접적인 이용을 고려하거나 최소한 관련 연구 분야에 있어서 역해면 경정을 실시한 보정 기압의 적용이 필수적임을 증명할 수 있다고 판단된다.
3. 한국천문연구원 의 GPS 가강수량 정보 제공 서비스에서와 같이 GPS 상시관측소에 MET3A와 같은 디지털 기상 센서를 부착하여 기온, 기압, 상대습도와 같은 자료를 GNSS 기상 기술에서 적용하고 있는 사례는 매우 좋은 예이다. 앞으로 현재 우리나라에서 운용중인 GPS 네트워크의 조밀성을 극대로 이용한 GPS 기상 기술의 구현과 응용은 예측이 어려운 오늘날의 악천후 발생과 진행 상황을 모니터링하기 위한 개선된 방안으로 이용될 수 있다고 판단한다.
4. 기존 연구에서 이용하였던 호주의 역해면 경정 보정 모델을 적용하여 우리나라의 경정 모델의 적용 결과와 상호 비교한 결과, GPS 상시관측소와 지상 기상 관측소간의 고도 차이에 따라 우리나라 모델을 적용한 GPS PWV 복원 정확도가 선형적으로 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 우리나라를 대상으로 하는 GPS 기상 연구를 위해서 본 연구에서 제시된 역해면 경정 보정 방법의 적용이 적합하다고 판단된다.
5. GPS 위성 신호를 이용한 수증기량 복원 능력의 정밀한 평가를 위해서 수증기 복사계(WVR, Water Vapor Radiometer)와의 위치 동기를 통한 한반도 전역에 대한 실험 연구(campaign research)가 향후 필요할 것으로 판단된다. 또한 기상 관측 장비가 가지고 있는 고유 관측 정밀도 및 궤도력 종류와 GPS의 다양한 오차 원인이 GPS PWV 복원 능력에 미치는 종합적인 영향을 평가하기 위한 부가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다. 이와 같은 추가적인 연구

를 바탕으로 GPS를 이용한 수증기 추정에 있어서 다른 수증기 관측 시스템과의 편의량을 줄일 수 있는 방안을 마련하여 수증기 관측을 위한 신뢰성을 지닌 우주측지기술의 활용 가능성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (KRF-2008-357-D00272). 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

국토지리정보원 (2009), 위성측량기준점 측량성과 고시 (제 2009-170호), 국토해양부.

소선섭, 이천우, 김맹기 (2000), 대기관측법, 교문사, pp. 61-64.

송동섭 (2007), GPS 관측데이터 정밀 해석을 통한 가강수량 추정 정확도 향상, 박사학위논문, 성균관대학교, pp. 90-120.

송동섭, 윤희식 (2004), GPS PWV 추정을 위한 가중 평균 온도식 결정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 22권, 제 4호, pp. 323-329.

송동섭, 윤희식 (2006), 태풍 예위니아 영향력에서의 GPS 가강수량 변화 분석, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제 26권, 제 6D호, pp. 1033-1041.

Askne, J. and H. Nordius (1987), Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, Vol. 22, pp. 379-386.

Baltink, H. K., H. Marel, A. G. A. Hoeven (2002), Integrated atmospheric water vapor estimates from a regional GPS network, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. D3, 10.1029/2000JD000094.

Bevis, M., ST. Businger, TH. A. Herring (1992), GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 15,787-15,801.

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 Science*, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607.

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.*, Vol. 96, pp. 6541-6555.

Feng, Y., Z. Bai (2001), GPS Water Vapour Experimental Results From Observations of the Australian Regional GPS Network (ARGN), *A Spatial Odyssey : 42nd Australian Surveyors Congress*.

Herring, T. A. (1990), Geodesy by Radio interferometry: The application of kalman filtering to the analysis of VLBI data", *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, pp. 12561-12581.

Meertens, C., C. Rocken, J. Braun, B. Stephens, C. Alber, R. Ware, M. Exner, and P. Kolesnikoff (1997), *Antenna Type, Mount, Height, Mixing, and Snow effects in High-Accuracy GPS Observations*, The Global Positioning System for the Geosciences, National Academy Press, pp. 211-218.

Mikhail. E. M. and G. Gracie (1981), Analysis and Adjustment of Survey Measurements, Litton Educational Publishing, Inc., New York, U.S.A..

Saastamoinen, J. (1972), Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, in: HENRIKSEN, The Use of Artificial Satellites for Geodesy, *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol. 15, pp. 247-251, AGU, Washington, D. C. U.S.A.

Tralli, D. M. and S. M. Lichten (1990), Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements, *Bulletin geodesique*, Vol. 64, pp. 127-159.

Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, B. Herman, H. Kuo, T. Mechan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Schreiner, S. Sokolovsky, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger, And K. Trenberth (1996), GPS sounding the atmosphere from low Earth orbit, preliminary results, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 77, pp. 5-18.