

# 한국의 계절별 특성을 고려한 고정확도 GPS 수증기 추정 모델링

## GPS water vapor estimation modeling with high accuracy by consideration of seasonal characteristics on Korea

송동섭<sup>1)</sup>

Song, Dong Seob

### Abstract

The water vapor weighted vertically mean temperature( $T_m$ ) models, which were developed by the consideration of seasonal characteristics over the Korea, was used in the retrieval of precipitable water vapor (PWV) from GPS data which were observed at four GPS permanent stations. Since the weighted mean temperature relates to the water vapor pressure and temperature profile at a site, the accuracy of water vapor information which were estimated from GPS tropospheric wet delay is proportional to the accuracy of the weighted mean temperature. The adaption of Korean seasonal weighted mean temperature model, as an alternative to other formulae which are suggested from other nation, provides an improvement in the accuracy of the GPS PWV estimation. Therefore, it can be concluded that the seasonally appropriate weighted mean temperature model, which is used to convert actual zenith wet delay (ZWD) to the PWV, can be more reduced the relative biases of PWV estimated from GPS signal delays in the troposphere than other annual model, so that it would be useful for GPS PWV estimation with high accuracy.

Keywords : Seasonal characteristic, weighted mean temperature model, actual tropospheric wet delay, GPS water vapor

### 초 록

본 연구에서는 GPS 관측 데이터로부터 가강수량을 복원하는 과정에 있어서 한국의 계절별 특성을 고려한 가중 평균 기온 모델( $T_m$ )을 개발하고 4개소의 GPS 상시관측소에 대하여 이를 적용하였다. 가중 평균 기온은 지역의 수증기 압력과 기온 프로파일에 관계하기 때문에, GPS 대류권 습윤 지연으로부터 추정된 수증기 정보의 정확도는 가중 평균 기온 추정 정확도에 비례하게 된다. 다른 국가에서 제시한 모델들과 비교하여 한국의 계절별 가중 평균 기온 모델의 적용이 GPS 가강수량 추정 정확도를 개선시킬 수 있다는 결과를 제공하였다. 따라서 실제 습윤 지연량을 가강수량으로 환산하는 단계에서 계절적으로 적합한 가중 평균 기온 모델은 다른 모델들에 비하여 대류권에서의 GPS 신호 지연으로부터 가강수량 추정의 상대적 편의 제거 효과가 크기 때문에 고정확도 수증기량 추정에 유용하다고 판단된다.

핵심어 : 계절별 특성, 가중 평균 기온 모델, 실제 대류권 습윤 지연, GPS 수증기

## 1. 서 론

수증기 분포는 구름의 형성과 강수량 발생에 큰 상관 관계를 가지고 있으며 수증기 성분의 위상 변화와 함께 일어나는 잠열의 급격한 변동은 태풍과 같은 악기상이 전개되는 과정에 깊은 관련이 있다(Bevis 등, 1992). 시

공간적으로 급변하는 수증기의 본질적 특성 때문에 기상 예보 정확도를 만족시킬 수 있는 수증기의 수치 모델링은 거의 불가능하다. 오직 기상 예보와 예측을 위한 정확한 수증기 정보를 얻기 위해서는 직접적인 관측이나 다른 종류의 관측데이터로부터 유도하는 것이 유일한 방법이다.

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

수증기량의 수평과 수직 분포에 대한 정확한 정보는 기상 예보와 예측 정확도 개선에 매우 큰 의미를 가질 수 있다고 할 수 있다. Rocken 등(1993)은 500km 이내에 배치한 GPS 관측소를 이용하여 계산한 수증기 정보가 수치 기상 예보 모델과 동화(assimilation) 작업이 가능하다고 제시하였다. GPS 위성 신호의 대류권 지연 추정에 의한 수증기 복원과 같은 GPS 기상 기술은 대기에 분포하는 수증기량의 증가와 감소에 대해서 시공간적으로 높은 해상도를 지닌 정보 제공이 가능하며, 전 세계적 기후 변화 추세를 연구하기 위한 분석을 가능하게 하고 있다. 또한 국제적으로 GPS 네트워크의 증가는 수증기 복사계와 레디오존데 관측과는 별도로 육지 부분만 아니라 해양 부분에서 관측된 장기간의 수증기 변화 정보를 대기 과학자들에게 제공하는 수단이 되고 있다(Yuan 등, 1993).

대류권내에서 수증기, 대기수상(大氣水象)에 의해 야기된 GPS 위성 신호의 습윤 지연량을 가강수량으로 복원하는 단계에 있어서 가중 평균 기온 모델에 의한 평균 기온이 필요하다. 가중 평균 기온은 GPS 수증기 추정 정확도에 밀접한 상관성을 가지고 있는 파라미터로서 여러 국가별로 장기간의 지상 관측 기온과 대기 상층 레이더 관측 기온의 평균값을 이용하여 선형 회귀 방법을 통한 독자적인 모델을 개발하고 이를 적용하고 있다(Bevis 등, 1992; Mendes, 1999; Solbrig, 2000; Schüler, 2001; Liou 등, 2001; Cao 등, 2008; Feng 등, 2001). 그러나 우리나라와 같이 고유한 사계절의 특성을 지닌 국가에서 장기간 기온 관측 데이터의 통합 회귀 분석을 통한 선형 가중 평균 기온 모델을 GPS 수증기 추정 프로세스에 적용함에 있어서 정확도 부분의 한계성을 가질 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 계절별 특성을 고려한 각기 다른 가중 평균 기온 모델의 적용이 GPS 수증기 복원 정확도 검증에서 어떠한 영향을 미치는가를 파악하는 것이 본 연구의 목적이다. GPS 수증기 복원 단계에서 계절별 영향을 고려하기 위하여 1년을 3개월씩 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)의 순서대로 사계절로 구분하고 각 계절별 가중 평균 기온 모델을 개발하였다. 계절 구별을 상기 월별로 구분하는 것은 위도(latitude)적으로 보편성을 가지고 있는 태양의 고도와 밤낮의 길이 변화를 반영한 기상학적 계절구분에 근간한 것이다(두산세계대백과, 2006). GPS 위성 신호의 대류권 천정 실제 습윤 지연에서 가강수량으로 환산하는 과정에서 본 연구에서 개발한 모델을 적용한 평균 기온을 모델링하고 다양한 통합 선형 회귀 가중 평균 기온 모델과의 비교를 수행하였다.

## 2. 가중 평균 기온 모델의 고찰

대류권에서의 천정 방향에 대한 GPS 위성의 실제 습윤 지연량(Zenith Wet Delay; ZWD)을 가강수량(Precipitable Water Vapor; PWV)으로 변환하기 위해서는 다음과 같은 환산식을 적용한다.

$$GPS\ PWV = \frac{ZWD}{\rho \cdot R_V \left[ \left( \frac{k_3}{T_m} \right) + k_2' \right]} \times 10^8 \quad (1)$$

여기서,  $\rho$  : 물의 밀도 ( $kg/m^3$ ),  $R_V$  : 수증기의 기체 상수 ( $Jkg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $k_2' : 22.1 \pm 2.2 (K/hPa) = k_2 - mk_1$ ,  $k_3 : 3.739 \pm 0.012 \times 10^5 (K^2/hPa)$ ,  $T_m$  : 가중 평균 기온 (K)

식 (1)에서  $k_1, k_2, k_3$ 는 대기 굴절 계수(N)에서 광범위하게 사용하는 물리 상수이며, 은 수증기와 건조 공기의 물 증량 비율( $M_w/M_d$ )이다. 실제 습윤 지연량으로부터 가강수량을 환산하기 위한 식 (1)에서 물리 상수, 기체 상수, 물의 밀도와 같은 파라미터를 제외하면, 가중 평균 기온인  $T_m$ 은 GPS PWV에 영향을 미치는 중요한 파라미터이다. 따라서 GPS를 이용한 수증기 추정의 정확도는 가중 평균 기온 모델에 의해 추정된 평균 기온의 정확도에 직접적으로 비례하게 된다. 가중 평균 기온은 계절, 위치, 기상에 따라 다르다. 가중 평균 기온은 수증기의 연직 분포와 기온 프로파일에 의존하며 Davis 등 (1985)은  $T_m$ 을 다음과 같이 정의하였다.

$$T_m = \frac{\int_0^\infty \frac{P_w}{T} dz}{\int_0^\infty \frac{P_w}{T^2} dz} = \frac{\int_{P_s}^0 \frac{\rho_w}{\rho_0} dp}{\int_{P_s}^0 \frac{\rho_w}{\rho_0 T} dp} \quad (2)$$

여기서,  $P_w$  : 수증기의 부분압 (hPa),  $P_s$  : 지표면 기압 (hPa),  $T$  : 기온 (K),  $\rho_w$  : 수증기 밀도 ( $kg/m^3$ ),  $\rho_0$  : 대기 밀도 ( $kg/m^3$ )

각 대기층별 가강수량과 비습도( $q$ ) 및 물의 비중( $g$ ) 이 용하여 식 (2)를 다시 표현하면 다음 식 (3)과 같으며, 기온 프로파일은 각 대기층별 가강수량에 반비례하여 가중된다.

$$T_m = \frac{\rho_w \cdot g \cdot PWV}{\int_{P_s}^0 \frac{q}{T} dp} = \frac{\rho_w \cdot g}{\int_{P_s}^0 \left( \frac{q}{PWV} \right) \frac{dp}{T}} \quad (3)$$

Ross와 Elliott(1996)에 의하면 가강수량의 반비례 가중치는 고위도 지역의 0.4 에서 적도에 가까워질수록 0.6으로 나타난다고 제시하였다. 또한, 브라질의 상파울로나 몬타나의 글라스고우 지역처럼 해발 500m 이상 고도에 있는 지역에서는 반비례 가중치가 대기압 500hPa의 대기층에 비하여 35%가 더 작다고 밝혔다. 이와 같이 지형학적으로 지배적인 영향을 받는 가중 평균 기온 모델은 다수의 레디오존데 관측값을 토대로 하여 국가나 지역별로 최적합한 통계적 해석을 통해 결정되어야 한다. 만일 모든 지역과 계절에 따라 동일한 가중 평균 기온(가령  $260 \pm 20$ )을 적용한다면, GPS로 추정된 가강수량은 다른 가강수량 관측 장비와 상대 정확도를 비교할 경우 약 15% 범위의 오차를 가지게 된다(Bevis 등, 1992). 이러한 오차 범위는 비교적 낮은 수증기 관측 정확도로서 동일 가중 평균 기온을 적용하여 복원한 GPS 수증기 정보를 기상 예보나 기후 예측을 위한 수치 기상 모델로의 적용에 있어서 한계를 갖게 된다. 만일 지구 대기가 등온(isothermal) 상태라면 가중 평균 기온은 항상 일정하며 지표면의 기온과 일치할 것이다. 그러나 대기는 권계면 아래에서 항상 순환하는 과정을 거치고 있으므로 상층 대기의 기온은 매우 불규칙하게 변하고 있으며 식 (2)에서처럼 대기층별 수증기의 부분압에 의한 시공간적 변화에 따른 가중 평균 기온이 GPS 위성 신호의 대류권 지연을 이용한 가강수량 복원에 필요한 것이다.

가중 평균 기온은 지표 기온과 대류권의 중단 대기층별 기온 및 수증기의 연직 분포에 의존된다. 따라서 레디오존데를 통해 관측한 각 고도별 기온 관측값과 수증기압을 이용하여 구한 평균 기온과 지상 관측에 의한 지상 기온과의 선형 회귀 관계를 통하여 가중 평균 기온 모델을 결정할 수 있다(Bevis 등, 1992). 일반적인 가중 평균 기온 모델은 지상 기온( $T_s$ )과의 함수 관계식 (4)와 같은 형태를 취하며, 상관 계수  $a$  와  $b$  는 식 (2)로부터

레디오존데 프로파일의 수증기 부분압력( $P_w$ )과 기온( $T$ )으로부터 결정된 대기층의 가중 평균 기온과 지상 기온과의 회귀 관계를 통해 결정한다.

$$T_m = a \times T_s + b \tag{4}$$

GPS 대류권 지연으로부터 가강수량으로 환산하기 위한 각 국가별 다양한 가중 평균 기온 적합 모델들이 여러 연구를 통해 평가되었으며 이를 정리하면 표 1과 같다.

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 비교적 뚜렷하게 나타난다. 계절에 따라 다양한 대기 순환 운동에 의해 지표의 기온과 상층 대기의 기온 변화도 계절별 다른 특성을 갖게 된다. 특히 지표면 기온은 상층 대기 순환 운동과는 다르게 태양의 복사열을 방사하는 조건이 계절에 따라 다르게 되며 상층 대기도 계절별로 다른 기압골의 영향을 받아 기온 변동이 달라진다. 이러한 사실은 계절별로 각기 다른 가중 평균 기온 모델을 개발하고 이를 적용할 경우, GPS 가강수량 추정 정확도에 어떠한 영향을 미치는지 조사하기 위한 중요한 연구 동기가 된다고 판단한다.

### 3. 고정확도 GPS 수증기 추정 모델링

#### 3.1 계절별 가중 평균 기온 모델 개발

본 연구에서는 2003년부터 2005년 3년 동안 우리나라에서 운용 중인 레디오존데 관측소 6개소의 평균 기온 관측값과 지상의 자동 기상 관측소(Automated Weather Station; AWS)에서 레디오존데 관측소와 동일한 지역의 지상 기온 관측값을 수집하여 선형 회귀 방법(linear regression method)에 의한 계절별 가중 평균 기온 모델을 개발하였다. 레디오존데는 그림 1에서 별표로 표시한 오

표 1. 각 국가별 가중 평균 기온 모델

국가	a	b	데이터 수	RMSE (K)	데이터 취합 기간
미국(Bevis 등, 1992)	0.720	70.2	8,718	4.74	1989~1991(3yrs)
전세계(Mendes, 1999)	0.789	50.4	32,467	3.07	1992(1yrs)
독일(Solbrig, 2000)	0.770	54.7	수치 예보 모델로부터 유도		
전세계(Schüler, 2001)	0.647	86.9	수치 기상 모델 기반		1999~2001(2yrs)
대만(Liou 등, 2001)	1.070	-31.5	586	1.67	1988~1997(10yrs)
한국(하지현과 박관동, 2008)	0.884	23.4	미제시	3.08	1998~2005(8yrs)
중국(Cao 등, 2008)	0.777	54.60	2,710	9.34	2004~2007(4yrs)
호주(Feng 등, 2001)	0.726	70.03	2,493	3.16	1999~2000(2yrs)

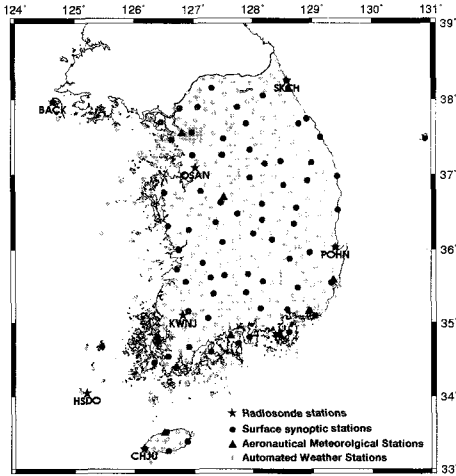


그림 1. 우리나라의 기상 관측소 위치도

산, 포항, 광주, 제주, 속초, 백령도, 흑산도 등 총 7곳에서 운용 중이나 흑산도의 관측데이터는 2003년 7월부터 이용할 수 있어 본 연구의 대상 관측소에서 제외하였다. 2003년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 수집한 레디오존데 관측데이터의 고도별 기온 관측값으로 계산한 평균 기온 관측값은 오산(OSAN) 4,246개, 포항(POHN) 2,180개, 광주(KWNJ) 4,255개, 제주(CHJU) 2,238개, 속초(SKCH) 2,085개, 백령도(BACK) 2,125개 등 총 17,129개의 표본 데이터를 획득하였다. 지역별로 관측데이터의 개수가 다른 이유는 레디오존데를 띄울 때에 하루에 부착하는 센서가 오 작동하는 경우와 관측 정보 전송 오류 및 미관측 상황과 악천후시 추가 관측의 차이에 비롯된 것이다(Solbrig, 2000). 레디오존데 프로파일로부터 획득한 평균 기온과 지상 기온의 차이는 이상적인 대기 상태에서는 그 차이가 일률적이어야 한다. 그러나 고도별로 기록된 기온의 합성을 통해 계산한 평균 기온과 지표면의 기온은 고도에 따른 대기 순환의 형태가 다르기 때문에 편차가 일률적이지 못하게 된다. 따라서 높은 신뢰성을 갖는 가중 평균 기온 모델을 결정하기 위해서는 편차가 큰 관측값을 제거하는 통계적인 절차가 필요하다(송동섭, 2007). 두 기온의 관측값에서 과대 편차를 추정하기 위한 가장 좋은 방법은 두 관측값의 차이에 대한 표준 편차( $\pm 1\sigma$ )를 계산하여  $3\sigma$  이상인 값을 과대 편차로 판단하여 필터링을 통해 제거하는 것이다(Schüler등, 2001). 정밀한 모델링을 위해서 본 연구에서도 총 표본 데이터의 표준편차보다 3배 이상인 과대 편차를 보이는 관측 데이터를 순차적으로 제거하는 과정을 수행하였

다. 과대 편차를 제거한 후에 총 데이터 개수는 16,939개로 총 데이터 개수 대비 제거 데이터의 손실률은 1.1%로 나타났다. 가장 큰 데이터의 손실률은 백령도가 105개의 데이터가 제거되어 총 표본 데이터 2,125개에 비하여 4.9%가 제거되었다.

그림 2는 레디오존데 관측소 6개 지역에 대한 3년간의 지상 관측 기온을 계절별로 표시한 것이다. 지상 관측 기온은 과대 편차를 제거한 후에 수정한 데이터를 이용하였으며, 그림 2에서 검은색 점으로 표시된 것은 지상 기온이고, 적색 막대그래프는 계절의 구분 간격을 의미한다. 그래프 상단에 표시한 기온과 표준편차는 계절별 구간에 포함된 지상 기온 관측값의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 사계절별 각 구간의 평균 지상 기온은 전형적으로 겨울이 274.3 K로 가장 낮고, 여름이 296.8 K로 가장 높다. 또한 계절별 지상 기온의 표준편차를 보면, 여름과 겨울은  $\pm 5.2$  K 이하인 반면에 봄철과 가을철은  $\pm 6.2$  K 이상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 봄과 가을에 기온의 편차가 여름과 겨울보다 크다는 것을 정량적으로 보여주는 것이다. 이러한 비교를 통해 계절별로 다양한 변화 양상을 보이는 기온 관측값을 GPS 가강수량 결정에 신중히 고려하기 위하여 모델링을 실시하고 최소제곱법에 의한 선형 회귀 방법에 의하여 그림 3과 같은 계절별 가중 평균 기온 모델을 개발하였다. 표 2는 계절별 가중 평균 기온 모델식의 파라미터인 기온기와 절편값 및 통계 분석에 따른 표준편차와 상관계수를 정리한 것이다.

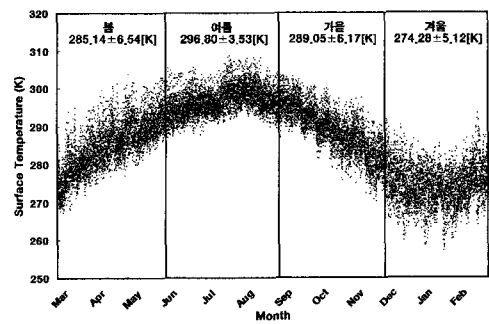


그림 2. 계절별 지상 관측 절대 기온 분포와 통계

### 3.2 GPS 가강수량 추정

본 연구에서 GPS를 이용한 가강수량을 추정하기 위하여 미국의 제트추진연구소(Jet Propulsion Laboratory; JPL)에서 개발한 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System and Orbit Analysis and Simulation Software; GOA

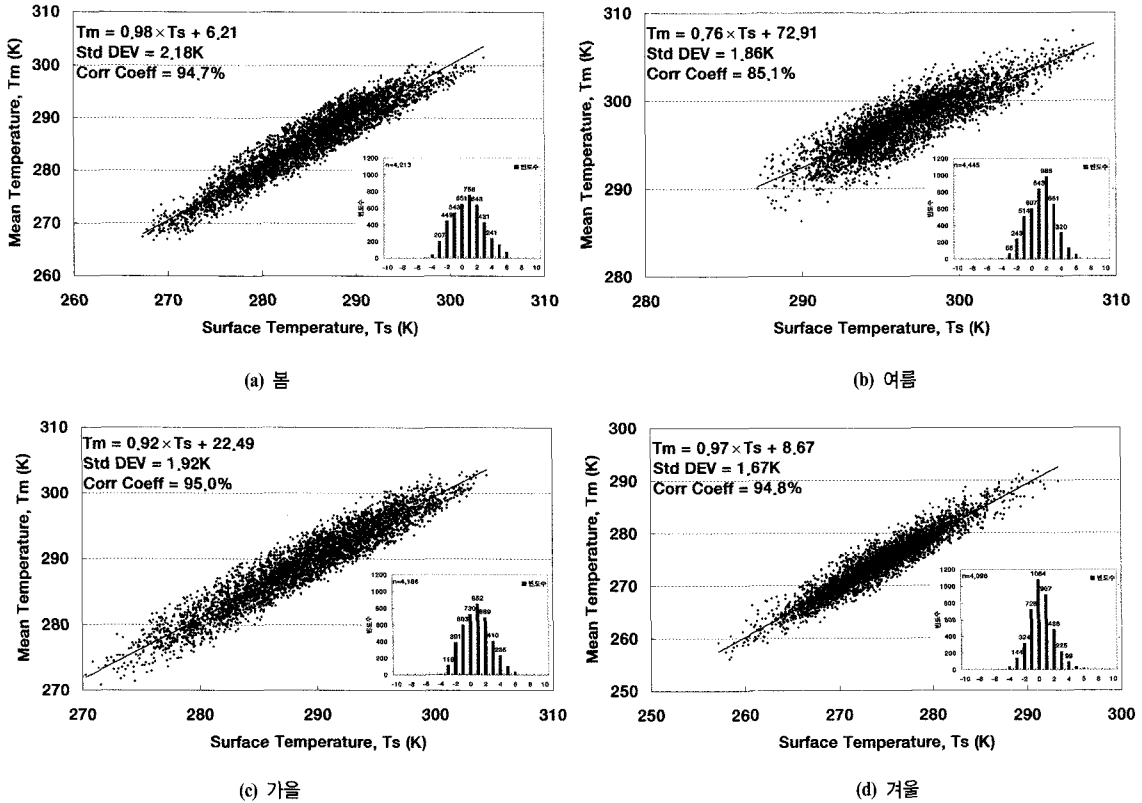


그림 3. 계절별 가중 평균 기온 모델 및 잔차 빈도 히스토그램

표 2. 계절별 가중 평균 기온 모델과 통계 분석 결과

계절	가중 평균 기온 모델 ( $T_M = a \times T_S + b$ )	통계 분석 결과 ( $c$ =표준편차, $D$ =상관계수)
봄	$a=0.98, b=06.21$	$c=\pm 2.18 \text{ K}, D=0.947$
여름	$a=0.76, b=72.91$	$c=\pm 1.86 \text{ K}, D=0.851$
가을	$a=0.92, b=22.49$	$c=\pm 1.92 \text{ K}, D=0.950$
겨울	$a=0.97, b=08.67$	$c=\pm 1.67 \text{ K}, D=0.948$

II)를 이용하였다. GOA II는 일반적인 GPS 해석 소프트웨어처럼 이중차분법(double difference technique)을 사용하지 않고 시간 변화에 대한 매개변수를 이용하여 상대 측위와 같은 좌표를 결정하는 방법을 사용한다 (Gregorius, 1996). 따라서 GOA II에서는 정밀 단독 측위 (Precise Point Positioning; PPP)가 가능하며, 수치해석상 매우 안정된 Kalman 필터링의 개선된 형태인 SRIF(Square Root Information Filter)를 통해 반복 필터링을 수행한다. GOA II를 이용한 대류권의 지연량 추정은 일괄 결합에 의한 연속 필터 방법인 Kalman-Bucy 필터

를 적용한 통계 분석법으로 추정한다(Kalman과 Bucy, 1961). 필터링은 시간에 따른 측정값을 처리하고 해를 축적하고 난 뒤에 각 결합 단계에서 평균화된 계수를 계산한다. 매개변수는 결합 조정 단계에서 구분된 상수를 추정하고 난 뒤에 다음 시간으로 넘어가서 결합 조정을 다시 시작한다. 즉 반복 연산을 통해 최적 솔루션을 추적하는 방법이 기본적인 Kalman 필터라면 Kalman-Bucy 필터는 결합 시간별로 최적 솔루션을 찾아 다음 단계로 진행시키는 방법이라고 할 수 있다. GOA II를 이용한 가강수량의 계산에서는 결합 시간을 매 600초로 설정하고 있으며 이는 가강수량의 계산에 있어서 필요한 충분한 결합 분량이라고 Gregorius(1996)는 설명하고 있다. GOA II에 의한 대류권에서의 GPS 위성 신호의 천정 방향 총 지연량(Zenith Total Delay; ZTD)은 선형적 건조 지연량 (Apriori Hydrostatic Delay; AHD)과 선형적 습윤 지연량 (Apriori Wet Delay; AWD) 및 천정 지연 보정량(Zenith Delay Correction; ZDC)의 합으로 구성된다.

$$ZTD = AHD + AWD + ZDC \quad (5)$$

선형적 건조 지연량은 표준 대기 모델을 사용할 경우에 관측소의 표고와 관련된 함수로서 시간과는 관계가 없다(Webb과 Zumberge, 1993). 선형적 습윤 지연량은 천정 방향에 대한 선형적 모델(Apriori Model)을 이용하고 사상 함수(mapping function)를 적용하여 비교적 간단하게 계산된다. 천정 지연 보정량은 선형적 모델에 대한 보정항으로서 시간에 따라 변화하는 양이며 최소제곱법을 통해 계산한다. GOA II에서는 경사방향의 대류권 지연량을 Niell 사상 함수를 이용하여 천정 방향으로 투영한다(Brunner 등, 1993). 이와 같은 과정을 통해 결정된 대류권의 총 지연량으로부터 가강수량을 계산하기 위해서는 대류권의 실제 천정 건조 지연량(Zenith Hydrostatic Delay; ZHD)을 결정하여야 하며, 본 연구에서는 GPS 기상 연구에서 현재까지 가장 정확한 추정값을 구할 수 있는 Saastamoinen 건조 지연 모델을 이용하여 천정 건조 지연량을 결정하였다. 선형적 모델로부터 구한 총 지연량에서 실제 천정 건조 지연량을 빼주면, 실제 습윤 지연량을 추정할 수 있으며, 식 (1)을 이용하여 가강수량으로 복원하게 된다.

본 연구에서는 라디오존데를 이용하여 계산한 가강수량과 GPS 가강수량의 정밀도를 검증하기에 앞서 고층기상관측소와 인접한 지역의 GPS 상시관측소의 선택이 필요하다. 본 연구에서 이용한 라디오존데 관측소인 오산, 포항, 광주, 제주, 속초, 백령도와 인접한 곳은 국토지리정보원의 수원(SUWN), 광주(KWNJ), 해양수산부의 호미곶(HOMI), 소청도(SOCH), 한국천문연구원의 속초(SKCH), 제주(JEJU)이다. 그러나 GPS 위성 신호의 연속 관측이 내부 시스템 사정으로 끊겨 데이터가 없는 지역이 존재하였다. 최대한 관측데이터 부족이 가장 적은 지역으로 다시 검토한 결과 국토지리정보원의 수원

(SUWN), 장흥(JAHG), 제주(CHJU), 울산(WOLS)의 4곳을 GPS 가강수량의 검증 대상 지역으로 선정하였다. 4개소의 GPS 상시관측소의 2004년 1년간의 관측데이터를 GOA II에 의해 정밀 해석을 실시하고, 기상 관측소의 기압과 기온 관측값을 이용하여 1시간별 가강수량으로 복원을 실시하였다. 2004년 1년간의 GPS 데이터와 라디오존데 데이터를 처리한 결과, GPS 가강수량은 총 30,754개, 라디오존데 가강수량은 총 4,239개의 샘플 데이터를 획득할 수 있었다. 이중에서 동일한 시점에 관측된 표본 데이터는 3,692개로서 정확도 검증을 위한 연구에 충분한 가강수량 데이터를 확보하였다. 앞서 계절별로 개발한 가중 평균 기온 모델을 적용한 정확도를 검증하기 위한 표본 데이터는 봄 1,027개, 여름 906개, 가을 895개, 겨울 864개가 확보되었다.

### 3.3 계절별 특성을 고려한 GPS 가강수량 추정 정확도 평가

본 연구에서 개발한 계절별 가중 평균 기온 모델을 적용하여 추정한 GPS 가강수량 및 해외 연구 사례에서 제시된 가중 평균 기온 모델을 각각 적용하여 복원한 GPS 가강수량의 정확도 평가를 위해서 고층 기상 관측기구인 라디오존데로부터 계산한 가강수량과의 차이를 구하고, 이 차이에 대한 표준 편차 및 평균 제곱근 오차를 구하는 단계로 수행하였다. 또한 잔차의 크기가 3 $\sigma$ 를 초과하는 과대 편차가 포함된 계산 결과를 제외시켜서 GPS 가강수량의 추정 정확도 평가의 신뢰성을 높이도록 하였다. 마지막으로 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량 간의 선형 회귀 분석을 통해 편의량을 소거하여 최종 GPS 가강수량의 추정 정확도를 평가하였다.

표 3은 본 연구에서 개발한 계절별 가중 평균 기온 모

표 3. 계절별/통합별 두 가강수량의 차이(Rad\_PWV-GPS\_PWV) 통계 비교 결과(단위: mm)

지역	구분	계절별	Bevis	Mendes	Solbrig	Liou	Schüler	Cao	하지현
봄	STD	.299	2.96	2.95	2.95	3.26	2.96	2.96	2.95
	RMSE	2.98	3.01	3.01	3.02	4.18	3.07	3.00	3.00
여름	STD	.444	4.27	4.27	4.26	4.29	4.23	4.28	4.28
	RMSE	4.44	4.81	4.76	4.84	8.36	5.14	4.73	4.69
가을	STD	.335	3.19	3.19	3.18	3.19	3.14	3.20	3.20
	RMSE	3.37	3.39	3.39	3.40	4.98	3.47	3.38	3.38
겨울	STD	.211	2.04	2.04	2.03	1.87	2.02	2.04	2.03
	RMSE	2.13	2.10	2.10	2.10	2.37	2.09	2.10	2.10
통합	STD	.333	3.28	3.27	3.28	3.90	3.311	3.28	3.27
	RMSE	3.34	3.47	3.45	3.48	5.42	3.613	3.44	3.42

델과 7개의 다른 모델을 각각 적용하여 복원한 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량의 차이(Rad\_PWV - GPS\_PWV)를 분석한 결과를 계절별/통합별로 정리한 것이다. 두 가강수량의 차이에 대한 과대 편차와 편의량이 소거되지 않은 상태의 결과임을 우선 밝힌다. 각 평가 항목별로 가장 좋은 결과를 보이는 값은 볼드체로 표시하였다.

8개의 가중 평균 기온 모델을 적용하여 구한 GPS 가강수량의 잔차의 정밀도를 나타내는 표준편차 항목에서 봄과 통합 비교에서는 하지현 모델, 여름과 가을은 Schüler 모델, 겨울은 대만의 Liou 모델을 적용한 결과가 좋은 평가를 보이고 있다. 그러나 GPS 가강수량의 정확도를 평가할 수 있는 통계적인 기준이 되는 것은 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량의 차이인 잔차의 제곱의 총 합에 대한 표본 산술 평균인 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)이다. RMSE 평가에서는 겨울의 Schüler 모델의 적용 결과를 제외하고는 모든 계절별로 본 연구에서 개발한 모델 적용 결과가 다소 좋은 정확도를 나타내는 것으로 분석되었다.

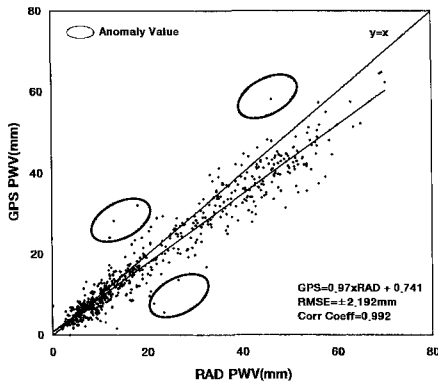


그림 4. GPS와 레디오존데 가강수량 회귀 관계

본 연구에서 분석한 GPS 가강수량의 정확도는 약 3.34mm의 전후의 범위를 보이고 있다. 이러한 결과는 동아시아 중위도 지역에 대한 다른 연구 결과들의 정확도보다는 향상된 결과를 나타내고 있다(Liou 등, 2001; Ohtani, 1999, Takiguchi 등, 2000). 더구나 GPS 기상에 대한 다른 연구 결과들에서 제시한 정확도는 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량의 회귀 관계로부터 도출된 편(bias)를 제거한 후에 평가된 결과이다. 이상적으로 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량은 그림 4에서와 같이  $y=x$ 의 선형 관계를 가져야 한다. 그러나 두 가강수량에는 편의로 인한 회귀 관계의 편차가 발생하며, 또한

선형 회귀 관계의 최적선으로부터 크게 벗어나는 과대 편차도 포함되어 있다. 이 과대 편차는 레디오존데 관측 환경의 급격한 변화에 기인한 이상 값(anomaly value)으로 보며 비현실적인 관측값으로 취급한다(Takiguchi 등, 2000). Ohtani(1999)는 레디오존데와 GPS 가강수량간의 오차 발생에 관한 몇몇 요인을 분석하였다. 첫 번째 원인은 GPS로 추정된 가강수량은 컴퓨터를 이용한 해석을 실시하여 기상 관측 정보와 결합한 수치라서 실제 가강수량의 측정 시스템과는 다를 수 있다는 것이다. 이러한 결과에 대하여 Kobayashi(1999)는 몇몇 변수를 조정해가며 GPS 데이터를 이용한 대류권의 총 지연량(TZD) 계산을 실험하였다. 그의 결과에서는 GPS 관측 데이터 해석에서 파라미터 조정에 의한 대류권 총 지연량에는 변화가 없다고 밝혔다. 두 번째는 가중 평균 기온 모델에 의한 오차이다. Ross와 Rosenfeld(1997)는 23년간의 데이터를 축적하여 결정한 전 세계 가중 평균 기온 모델을 근거로 Bevis가 제시한 식에 대한 가강수량의 영향을 검증하였다. Ross와 Rosenfeld는 Bevis의 기온 모델이 단지 0.1~0.5mm의 가강수량 오차를 가진다고 제시하였다. 본 연구에서 계산한 계절별 가중 평균 기온 모델의 정확도는 Bevis의 식보다 더욱 정확한 결과를 보이고 있어 본 연구의 표준편차에는 큰 영향을 미치고 있지 않다고 판단된다. 마지막 오차 발생 요인으로는 레디오존데로 관측한 연직 프로파일의 상대 습도 정보에 오류가 발생하는 경우로서 Kobayashi(1999)에 따르면 네 가지로 분류하여 설명하고 있는데 그 내용은 다음과 같다.

- ① 경우 1 : 존데 데이터의 첫 번째 상대 습도 관측값은 지표면의 기상 데이터와 차이를 가지고 있음
- ② 경우 2 : 존데 데이터의 첫 번째 기온 관측값은 지표면의 기온 데이터와 차이가 있음
- ③ 경우 3 : 존데의 상대 습도는 구름을 통과하는 경우에 포화 수증기 상태로 기록됨
- ④ 경우 4 : 존데가 상승하면서 중위도 지역의 원인불명 관측 중지로 인하여 대기 프로파일 정보가 끊김

따라서 이와 같은 경우로 인한 레디오존데 가강수량은 GPS와 차이를 가지게 되며 실제 대류권의 가강수량은 레디오존데와 GPS 가강수량의 중간에 해당될 것이라는 결론을 내리고 있다(Kobayashi, 1999). 따라서 GPS와 레디오존데의 조합을 통한 가강수량 추정이 가장 이상적인 방법으로 인식되고 있으며, 보편적으로 조합을 위한 간편한 방법은 식 (6)과 같이 경험적으로 GPS를 이용하여 레디오존데 가강수량을 보정하는 것이다(Liou 등,

2001; Ohtani, 1999, Takiguchi 등, 2000, song 등, 2008).

$$GPS\ PWV = a \times RAD\ PWV + b \quad (6)$$

본 연구에서 단순 회귀 분석을 적용하여 레디오존데 가강수량의 품질을 검사와 편의를 제거한 후에 RMSE를 재평가하였다. 또한 편의를 제거하기 전에 두 가강수량의 차이가 표준편차의 3배인 3σ를 초과하는 추정값을 미리 제외시켜 면밀한 GPS 가강수량의 정확도 평가를 수행하였다. 표 4는 8개의 가중 평균 기온 모델을 적용하여 복원한 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량의 차이에 대한 과대 편차 제거 전/후의 RMSE 평가 결과를 나타낸 것이다. 과대 편차를 제거하기 전의 RMSE는 Schüler의 가중 평균 기온 모델을 적용한 겨울을 제외하고는 다른 계절에서는 모두 본 연구에서 개발한 계절별 모델의 적용 결과가 다소 정확한 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 대만 지역의 Liou 등(2001)이 제시한 평균 기온 모델의 적용 결과가 가장 큰 RMSE를 보이는 것으로 나타나 우리나라의 기상 조건과 계절적 환경 상황에 적용하기에는 부적합한 모델로 증명되었다. 또한 가장 많은 과대 편차를 보였던 여름철의 경우, 제거된 과대 편차 데이터가 많은 관계로 다른 계절별 모델에 비하여 상대적으로 정확도 향상률이 가장 높게 나타났다.

그림 5는 과대 편차를 제거하고 난 후의 통계 결과를 나타낸 것이다. 계절별 모델을 적용하여 구한 표준편차를 기준 편차로 설정하고 과대 편차를 가진 가강수량 추정값을 제외시킨 결과에서는 모든 계절마다 계절별 기

온 모델의 적용 결과가 다소 정확한 RMSE를 보였다. 또한 과대 편차를 제거하기 전에 비하여 계절별 모델의 적용 결과는 봄 15%, 여름 24%, 가을 16%, 겨울은 6% 정도가 줄어들면서 모든 항목에서 정확도가 향상되었음을 표 4와 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 시공간적인 계절 변화는 지표면 기온 조건과 상층 대기 프로파일의 계절별 기온 및 수증기압의 변화가 밀접하게 관계되어 있다. 따라서 GPS 위성 신호의 대류권 내 실제 습윤 지연량을 추정하여 가강수량으로 복원하는 과정에 있어서 적용되는 가중 평균 기온은 한반도에 대한 계절 변화 양상을 고려하여 개발한 계절별 다중 평균 기온 모델이 연간 기온 정보를 이용하여 구축한 단일 선형 모델보다 더욱 향상된 정확도를 보이는 것으로 판단된다.

계절별 모델 적용을 통한 GPS 가강수량의 최종 정확도 평가를 위해서 계절별로 두 가강수량간의 회귀 관계를 결정하고 이 회귀 관계에 의한 편의를 계절별로 분류한 가강수량 값에 보정하였다. 그림 6은 계절별 GPS와 레디오존데 가강수량의 선형 회귀 관계를 보여주고 있다. 두 가강수량의 상관도 지수인 상관계수는 봄 0.972, 여름 0.969, 가을 0.979, 겨울 0.916을 보였다. 전반적으로 GPS 가강수량은 레디오존데와 밀접한 상관관계를 갖는 것으로 평가되었다. 식 (6)과 같은 선형 회귀 관계에 의해 계절별로 분석한 편의를 소거하여 GPS 가강수량의 복원 정확도를 재분석하였다. 표 5는 3년간의 지상 기온과 상층 대기의 평균 기온을 이용하여 계절별로 결정한 가중 평균 기온 모델을 적용하여 GPS 상시 관측소 4개소의 일 년간 GPS 관측데이터의 정밀 해석을 통하여 구한 가강수량의 최종 정확도를 정리한 것이다.

표 4. 과대 편차 제거 전/후의 RMSE 비교

계절	구분	계절별	Bevis	Mendes	Solbrig	Liou	Schüler	Cao	하지현
봄	제거전(mm)	2.98	3.01	3.01	3.02	4.18	3.07	3.00	3.00
	제거후(mm)	2.59	2.62	2.61	2.63	3.83	2.68	2.61	2.61
	향상률(%)	15.21	15.19	15.19	15.06	9.03	14.78	15.22	15.17
여름	제거전(mm)	4.443	4.81	4.76	4.84	8.36	5.14	4.73	4.69
	제거후(mm)	3.583	3.95	3.90	3.98	7.89	4.33	3.86	3.82
	향상률(%)	24.01	21.78	22.19	21.43	5.96	18.74	22.52	22.9
가을	제거전(mm)	3.37	3.39	3.39	3.40	4.98	3.47	3.38	3.38
	제거후(mm)	2.90	2.94	2.94	2.96	4.74	3.05	2.93	2.93
	향상률(%)	16.35	15.1	15.19	14.89	5.07	13.86	15.35	15.3
겨울	제거전(mm)	2.13	2.10	2.10	2.10	2.37	2.08	2.10	2.10
	제거후(mm)	2.01	2.02	2.02	2.03	2.39	2.03	2.02	2.02
	향상률(%)	5.59	3.85	3.81	3.62	-0.51	3.17	3.95	3.80



GPS와 레디오존데로부터 계산한 가강수량을 모두 포함한 표본 데이터의 회귀분석을 실시한 후, 이 회귀 관계로부터 구한 편의량을 소거한 결과는 편의 보정 전  $\pm 2.80\text{mm}$ 에서  $\pm 0.60\text{mm}$ 로 줄어들었음을 표 5를 통해 알 수 있다.

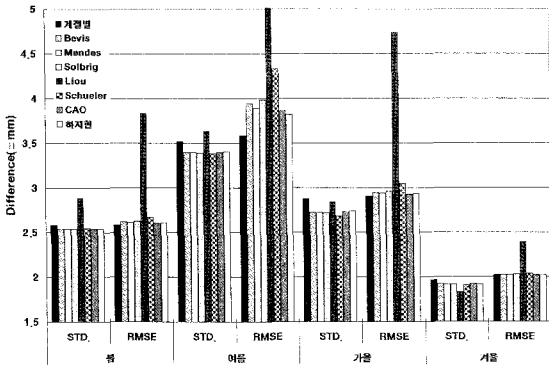


그림 5. 가중 평균 기온 모델별 GPS 가강수량 통계 분석 결과

더욱이 계절별로 분리하여 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량의 선형 관계로부터 편의량을 보정한 결과는 통합 분석 결과보다 더욱 향상된 정확도를 보이고 있다. 이러한 사실은 계절별 가중 평균 기온 모델로부터 추정된 평균 기온이 두 가강수량의 선형 관계에서의 편

의량을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 실제로 GPS 가강수량의 복원 과정에서 실제 상층 대기의 각 레이어별로 관측한 기온값을 토대로 계산한 평균 기온을 이용하는 것이 이상적이라고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 모든 GPS 관측지점에서 이러한 상층 기온을 관측하는 것을 불가능하다. 따라서 본 연구에서 개발한 계절별 가중 평균 기온 모델을 이용하여 추정된 가중 평균 기온은 다년간의 데이터를 통합하여 구한 평균 기온 모델의 추정 기온보다 실제 평균 기온과의 상대적 차이를 줄일 수 있으며, 이는 GPS 가강수량 복원 정확도를 향상시킬 수 있는 방안이라고 판단된다.

표 5. 편의 보정 후 GPS 가강수량의 최종 복원 정확도 결과

구분	봄	여름	가을	겨울	통합
RMSE( $\pm$ mm) (편의 보정 전)	2.59	3.58	2.90	2.01	2.80
RMSE( $\pm$ mm) (편의 보정 후)	0.13	0.18	0.57	0.46	0.60

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 사계절의 특성을 가지고 있는 우리나라의 기후 환경 내에서 GPS 위성 신호의 대류권 지연을 이용한 가강수량 복원 과정에서 요구되는 가중 평균 기온 모델을 계절별로 개발하고, 이를 적용하여 고층 기상 관측기 구인 레디오존데로부터 계산한 가강수량과의 비교를 수행하였다. 또한 7개의 다른 가중 평균 기온 모델을 적용하여 복원한 GPS 가강수량과의 정확도 비교·평가를 함께 실시하였다. 그 결과, 과대 편차를 제거하고 난 후, 계절 특성을 고려하여 개발한 가중 평균 기온 모델로부터 추정된 평균 기온의 적용 결과가 다른 모델들에 비하여 미소하나마 상대적으로 정확한 것으로 평가되었다. 이러한 사실은 계절상 종관 기상의 물리적 특성이 고려된 모델로부터 계산한 가중 평균 기온이 GPS 수증기 복원 과정에서 야기하는 편의량을 감소시킴으로서 상대적으로 정확도 향상을 유도한 결과라고 판단된다. 또한 GPS 위성 신호의 대류권 내 실제 습윤 지연으로부터 가강수량으로 복원하는 과정에 있어서 한반도의 계절 변화 양상을 고려한 우리나라의 계절별 가중 평균 기온 모델의 적용한 GPS 가강수량과 레디오존데 가강수량과의

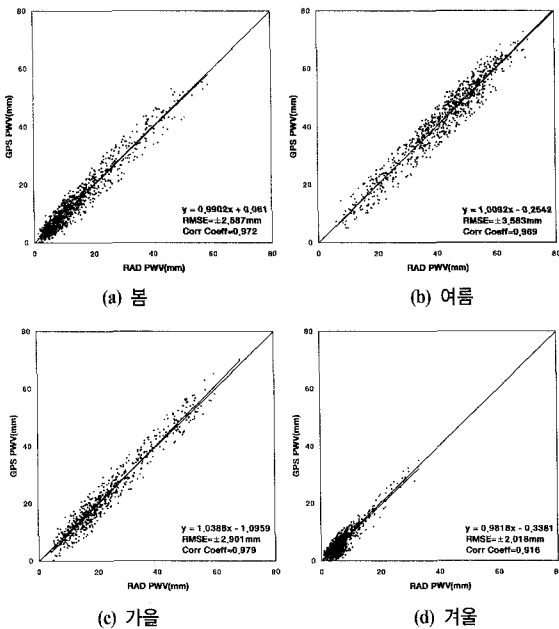


그림 6. 과대 편차 제거 후 계절별 GPS와 레디오존데 가강수량 선형 회귀 관계

편의를 제거한 결과, 계절별 편의를 제거한 결과가 통합한 데이터의 편의를 제거한 결과보다는 상대적인 편의를 줄일 수 있었으며, 계절별 모델의 적용이 다소 GPS 가강수량 복원 정확도를 향상시킬 수 있는 방안이라고 판단된다.

## 참고문헌

- 두산세계대백과 (2006), 기상학적 계절구분, 엔사이버, <http://www.encyber.com>
- 송동섭 (2007), GPS 관측데이터 정밀 해석을 통한 가강수량 추정 정확도 향상, 박사학위논문, 성균관대학교, pp. 90-120.
- 하지현, 박관동 (2008), GPS 가강수량 결정을 위한 한국형 평균온도식 비교, 한국우주과학회지, 한국우주과학회, 제 25권, 제 4호, pp. 425-434.
- Bevis, M., S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes, and R. Ware (1992), GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 15,787-15, 801.
- Brunner, F., W. Welsch (1993), Effect of the Troposphere on GPS Measurements, *GPS World*, Vol. 4, No. 1, pp. 42-51.
- Cao, Y., F. Zheng, Y. Xie, and Y. Bi (2008), Impact of the Weighted Mean Temperature on the Estimation of GPS Precipitable Water Vapor, Microwave and Millimeter Wave Technology, *International ICOMT2008 Proceedings*, Vol. 2, pp. 799-801.
- 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.
- Feng, Y., Z. Bai, P. Fang, and A. Williams (2001), GPS Water Vapour Experimental Results From Observations of the Australian Regional GPS Network (ARGN), *A Spatial Odyssey: 42nd Australian Surveyors Congress*.
- Gregorius, T. (1996), *GIPSY-OASIS II, How it Works*, Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne.
- Kalman, R. and R. Bucy (1961), A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transactions of the ASME*, Vol. 95, No. 83D.
- Kobayashi, H. (1999), *Examination of precipitable water vapor from GPS tropospheric delay in the tropics*, Ms. D. dissertation to the University of Tokyo, p. 69.
- Liou, Y. A., Y. T. Teng (2001), Comparison of Precipitable Water Observations in the Near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 40, pp. 5-15.
- Mendes, V. B. (1999), *Modeling the Neutral-atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques*, Ph.D. dissertation, Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Ohtani, R. (1999), *A study on the evaluation of GPS retrieved precipitable water vapor*, Ph. D. dissertation to the University of Tokyo, p. 91.
- Rocken, C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger (1993), Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 20 No. 23, pp. 2631-2634.
- Ross, R. J. and W. P. Elliot (1996), Tropospheric precipitable water: A radiosond e-based climatology, *NOAA Tech. Memo. ERL ARL-219*, National Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md, p. 132.
- Ross, R. J. and S. Rosenfeld (1997), Estimating mean weighted temperature of the atmosphere for Global Positioning System applications, *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, No. 21, pp. 719-730.
- Schüler, T. (2001), *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Doctor's Thesis, Studiengang Geodsie und Geoinformation, University FAF Munich, Germany.
- Solbrig, P. (2000), *Untersuchungen ber die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems*, Diploma Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, (In German).
- Song, D. S., H. S. Yun, and D. L. Lee (2008), Verification of Accuracy of Precipitable Water Vapour from GPS during Typhoon Rusa, *Survey Review*, Vol. 40, No. 307, pp. 19-28.
- Tagiguchi, H., T. Kato, H. Kobayashi and T. Nakaegawa (2000), GPS Observations in Thailand for hydrological applications, *Earth Planets and Space*, Vol. 52, pp. 913-919.
- Webb, F. H. and Zumberge, J. F. (1993), *An Introduction to th GIPSY/OASIS-II*, JPL Publication, Pasadena, California, D-11088.
- Yuan, L. L., R. A. Anthes, R. H. Ware, C. Rocken, W. D. Bonner, M. G. Bevis, and S. Businger (1993), Sensing Climate Change Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, Vol. 98 No. D8, pp. 14,925-14,937.