

대류권 천정 방향 건조 지연량 계산을 위한 우리나라 가중 평균 온도식 결정

Determination of Korean Weighted Mean Temperature for Calculation of Tropospheric Zenith Hydrostatic Delay

송동섭¹⁾ · 황학²⁾ · 윤홍식³⁾

Song, Dong Seob · Huang, He · Yun, Hong Sic

¹⁾ 연결저자 · 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료(E-mail:dssong@geo.skku.ac.kr)

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:duejihh@skku.edu)

³⁾ 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 부교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)

Abstract

Water vapor is an important parameter in monitoring changes in the Earth's climate and it can be used to improve weather forecasting. However, it hasn't observed accurately by reasons of structural and economic problem of observation. GPS meteorology technique for precipitable water vapor measurement is currently actively being researched an advanced nation. Main issue of GPS meteorology is an accuracy of PWV measurement related weighted mean temperature and meteorological data. In this study, the korean weighted mean temperature had been recalculated by a linear regression method based on meteorological observations from 6 radiosonde stations for 2003 year. We examined the accuracy of PWV estimates from GPS observations and Radiosonde observations by new korean weighted mean temperature and others.

1. 서론

GPS Meteorology 기술은 대기를 구성하는 요소 중에서 대류권을 통과하는 GPS 위성 신호의 지연량을 이용하여 대류권내의 수증기량을 역으로 측정하는 기술이다(Bevis 등, 1992). 일반적으로 대류권에서의 GPS 신호 지연은 GPS를 이용한 정밀 위치결정에 오차를 가져온다. 최근 들어 GPS 상시관측소로부터 연속 관측된 데이터를 이용하여 기본적인 이론에 의해 높은 정확도로 대기 파라미터들을 결정할 수 있게 되었다. 따라서, 대류권의 수증기로 인한 GPS 신호의 지연량을 분석할 수 있으며, 이 지연량을 수증기량으로 환산할 수 있다. 기상 예보의 중요성에도 불구하고 수증기는 열악한 상태에서 측정되고 있으며, 지구 대기의 연속적인 연구 및 데이터 베이스 구축에 있어서 미흡한 실정이다. 이러한 상황에서 GPS는 어떠한 기상 조건에서 탁월한 안전성을 가지고 고층기상관측기구인 라디오존데와 비슷한 정확도로 30초 간격의 시간 해상도를 지닌 수증기량을 계산할 수 있다. 또한, 라디오존데는 하루 2번 관측을 실시하게 되는데 한 번 관측 시 약 \$500의 비용이 소요되는 반면에, 기 구축되어있는 국내의 GPS 상시관측소를 이용하면 데이터 공유 시설의 증축만으로도 수증기 관측에 있어서 전례가 없는 혁신이 가능하다.

현재 선진국을 중심으로 GPS 상시관측소 네트워크를 이용한 기상 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국 기상청의 FSL(Forecast Systems Laboratory)에서는 미국내의 55개 GPS 상시관측소를 이용하여 GPS 가강수량(Precipitable Water Vapor; 이하 PWV)의 거의 실시간 구현을 실시하고 있으며, 현재 1시간 간격으로 그 분포를 제공하고 있다. 앞으로의 계획은 기상 예보 목적으로 약 800 개소로 늘리는 것이다. 일본의 기상청에서 GEONET(GPS Earth Observing Network)을 운영중이며 약 1000여점에서 GPS PWV 데이터를 제공하고 있다. 독일에서는 1997년부터 GPS Atmosphere Sounding Project(GASP)라는 대규모의 연구 프로젝트를 진행중인데 측량과 항법을 목적으로 기 구축된 약 200개의 상시관측소 데이터를 이용하여 GPS 기상 연구에 이용하고 있으며, 약 2mm의 정확도를 가진

PWV를 획득하고 있다(Feng 등, 2001).

GPS Meteorology 기술을 이용한 대류권의 수증기량 측정에 관련된 매커니즘은 모두 알려져 있으며, 선진국의 경우에는 이러한 매커니즘에 기반하여 GPS PWV 정확도 향상을 위한 연구가 추진되고 있다. GPS PWV의 정확도에 영향을 미치는 인자로는 GPS 상시관측소와 지상 기상 관측소간의 이격으로 인하여 실제 GPS 상시관측소의 기상 관측 자료가 이용되고 있지 못해서 발생하는 오차, 대류권의 습윤 지연량을 수증기량으로 환산시 필요한 가중 평균 온도식의 오차, 지상 기상관측소 관측 장비의 정확도 관련 오차, 건조 지연 모델을 이용한 건조 지연량 계산시 GPS 상시관측소의 위치 정보 오차등으로 나뉘어 진다(Feng 등, 2001). 이 중에서 가중 평균 온도식은 1992년에 bevis등이 제시한 가중 평균 온도식이 GPS PWV 추정 연구에 많이 이용되고 있다. 그러나, 엘리노, 라니냐와 같은 기상 이변과 지구 온난화 현상으로 인해 지구의 온도 변화가 급속히 진전됨에 따라 여러 학자들에 의해 자국에 알맞은 가중 평균 온도식이 재계산되어 GPS PWV 정확도 향상을 위한 분석에 이용되고 있다. 이에 본 연구에서는 국내에서 운용중인 라디오존데 관측소 6개소의 고층 기상 관측데이터와 지상 기상 관측 데이터를 토대로 한국의 실정에 알맞은 가중 평균 온도식을 결정하고, 이 가중 평균 온도식을 이용하여 GPS PWV의 정확도를 평가함을 목적으로 한다.

2. 한국형 가중 평균 온도식 결정

GPS 위성으로부터 전송된 GPS 위성 신호는 대기를 통과하면서 신호의 지연을 일으킨다. 대류권에 의한 지연은 건조 지연과 습윤 지연으로 나뉘어지는데 이 중 건조 지연량은 총 지연량의 약 90%를 차지한다. 건조 지연량은 건조 지연 모델식에 의해 쉽게 계산할 수 있지만, 습윤 요소에 의한 습윤 지연량은 건조 지연량에 비해서 적은 반면 매우 다양한 변화가 이루어져 계산에 있어서 많은 어려움을 갖게 된다. 임의 고도각에서의 GPS 위성 신호의 대류권에서의 지연량은 맵핑 함수를 이용하여 천정 방향으로 계산할 수 있으며, 건조 공기에 의한 천정 방향의 건조 지연량(zenith hydrostatic delay; ZHD)과 수증기에 의한 천정 방향의 습윤 지연량(zenith wet delay; ZWD)로 표현한다. 이 두 지연량의 합을 천정 방향의 총 지연량(zenith total delay; ZTD)로 부른다(송동섭 등, 2002).

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

Elgered(1991) 등에 의하면 관측소의 기압 데이터와 GPS 정밀 해석을 통해서 결정된 GPS 상시관측소의 위도와 타원체고를 이용하여 ZHD를 계산한다.

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.00024 [mm]) \cdot P_s}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\phi - 0.00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (2)$$

여기서, ZHD : 천정방향 건조 지연량

P_s : 측정지역의 기압 [hPa]

ϕ : 측정점의 위도

h : 측정점의 타원체고 [km]

앞서 구한 총 지연량으로부터 이 건조 지연량을 빼주면 실제 습윤 지연량을 산출하게 되며, 이 습윤 지연량을 PWV로 환산하게 된다(Bevis 등, 1994).

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

여기서, 습윤지연량을 PWV로 환산하기 위한 Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \frac{10^8}{\rho \cdot R_v \left[(k_3 / T_m) + k_2 \right]} \quad (4)$$

여기서, ρ : 물의 밀도 (kg/m^3)

R_v : 수증기의 기체상수 ($J/kg-K$)

k_2 : $22.1 \pm 2.2 (K/mb)$

k_3 : $(3.739 \pm 0.012) \times 10^5 (k^2/mb)$

T_m : 가중 평균기온 (K)

Bevis 등(1992)에 의하면 가중 평균온도를 다음과 같이 정의한다.

$$T_m = \frac{\int \frac{P_V}{T} dH}{\int \frac{P_V}{T^2} dH} \quad (5)$$

식 (4)를 볼 때 실제 습윤 지연량을 PWV로 환산하는 경우에 그 정확도 향상을 위해서는 가중 평균 온도인 T_m 의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 이 가중 평균 온도는 계절, 위치, 기상에 따른 함수로 구성된다. 그 편차는 약 20%의 범위정도이다(Bevis 등, 1994). 습윤 지연량을 PWV로 환산하는데 있어서 가장 많이 사용되는 식은 앞서 설명한 바와 같이 Bevis 등(1992, 1994)이 제시한 식으로 미국의 13개 지점의 2년간 지상 온도 T_s 와 라디오존데 관측에 의한 T_m 과의 회귀 방법으로 결정한 식이다. 다음 식(6)은 Bevis 등(1992)이 제시한 식을 나타낸다.

$$T_m = 70.2 + 0.72 \times T_s \quad (6)$$

여기서, T_s : 표면온도[K]

T_m : 대기의 가중평균온도[K]

이후 Mendes 등(2000)이 1년간 50개소의 라디오존데 관측소로부터 유도된 식을 발표하였으며, 다음과 같다.

$$T_m = 50.4 + 0.789 \times T_s \quad (7)$$

또한, 같은 해 Solbrig(2000)가 독일 지역에 국한한 기상 데이터를 처리하여 식(8)을 제안하였으며, Schueler(2001)가 대기 온도에 대한 전지구장 모델을 토대로 식(9)을 제시하였다. 가장 최근에는 Liou 등(2001)이 대만 지역에서 10년간 수집된 586개의 라디오존데 관측값을 기반으로 자국에 알맞은 식(10)을 발표하며, GPS PWV의 정확도를 평가하였다.

$$T_m = 54.7 + 0.77 \times T_s \quad (8)$$

$$T_m = 86.9 + 0.647 \times T_s \quad (9)$$

$$T_m = -31.5 + 1.07 \times T_s \quad (10)$$

본 연구에서는 지난 2003년 1년간 우리나라에서 운용중인 라디오존데 관측소 6개소의 평균 기온 관측치와 지상 기상 자동 관측소(Automated Weather Station; AWS)의 동일 지역 기온 측정 데이터를 토대로 선형 회귀 방법을 이용하여 가중 평균 온도식을 결정하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 라디오존데 관측소의 위치를 표시한 것이며, 표 1은 라디오존데 관측소의 위치 정보와 장비 제원에 관련된 사항을 나타낸다. 본 연구에서는 2003년 1월 1일부터 12월 31일간 오산(OSAN) 1,439개, 포항(POHN) 749개, 광주(KWNJ) 1,438개, 제주(CHJU) 758개, 속초(SKCH) 653개, 백령도(BACK) 746개 등 가중 평균 온도식 결정을 위해서 이용 가능한 총 5,783개의 샘플 데이터를 사용하였다.

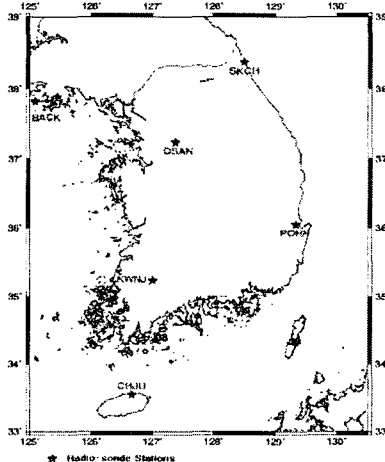


그림 1. 라디오존데 관측소 위치

표 1. 라디오존데 관측소 위치와 장비 제원

WMO Station No	Site Name	Lat.(°)	Log.(°)	Ortho. Height	Sonde Type	Ground Equipment
47090	SKCH	38.25	128.57	18.0m	RS80	DigiCORA II MW15
47102	BACK	37.97	124.63	158.0m	RS80	DigiCORA II MW15
47122	OSAN	37.10	127.03	52.0m	Jinyang 1524-511	GL-5000
47138	POHN	36.03	129.38	6.0m	RS80	DigiCORA II MW15
47158	KWNJ	35.11	126.81	13.0m	Jinyang 1524-511	GL-5000
47185	CHJU	33.28	126.16	73.0m	RS80	DigiCORA II MW15

5800여개의 라디오존데 데이터와 지상 관측 온도 측정 데이터를 통해 결정된 한국형 가중 평균 온도 식은 식(12)와 같다.

$$T_m = 16.70 + 0.94 \times T_s \quad (12)$$

본 선형 회귀식의 통계 결과는 표준편차는 1.46K, 상관 계수는 0.972로 분석되었다. 이는 Bevis 등 (1992)의 가중 평균 온도식 결정 연구에서 표준편차가 4.7K를 나타내는 것에 비해 매우 정밀하게 계산 되었음을 알 수 있다. 또한, 가장 최근에 발표된 Liou등의 연구에서 표준편차가 1.67K, 상관 계수가 0.907인 결과에 비해 매우 정밀한 상관관계를 갖는 회귀식이 결정되었음을 증명한다. 그림 2는 본 연구 결과를 통해 결정된 지상 기온과 가중 평균 기온과의 관계를 나타낸다.

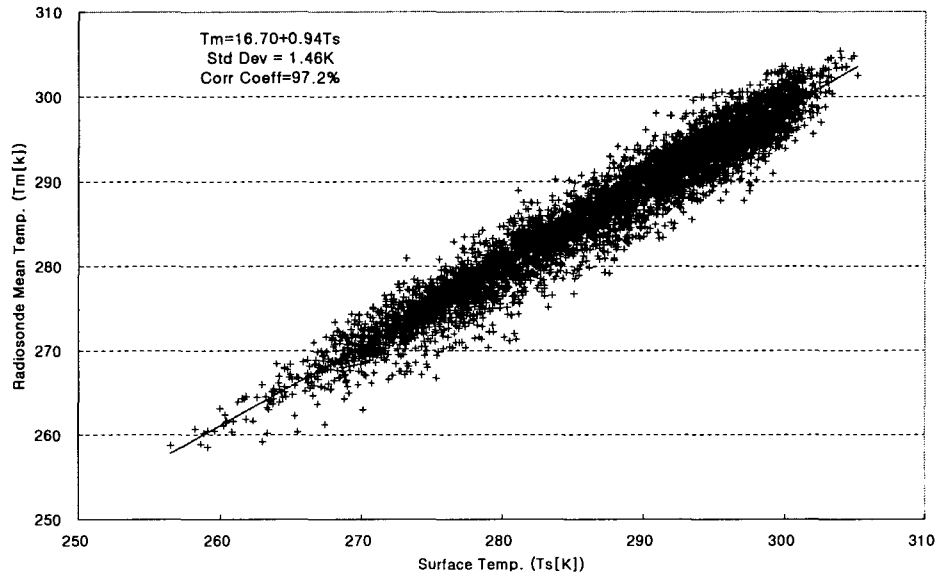


그림 2. 가중 평균 온도와 지상 온도와의 회귀 관계

3. 가중 평균 온도식의 정확도 검증

본 연구를 통해 결정된 한국형 가중 평균 온도식의 정확도를 검증하기 위해서 오산과 광주 라디오존데 관측소와 인접한 지역의 GPS 상시관측소 관측 데이터를 처리하여 한국의 유일한 고층 기상 관측 기구인 라디오존데로부터 구한 PWV와 비교·분석을 수행하였다. 라디오존데 PWV 계산에 관한 알고리즘은 지면관계상 참고문헌으로 대체한다(송동섭 등, 2002). 정확도 검증에 이용된 GPS 관측 데이터는 2003년 9월 7일부터 9월 14일까지 총 8일간의 국토지리정보원의 수원과 광주 GPS 상시관측소의 데이터이다. 특히, 이 기간은 태풍 매미가 한반도에 영향을 미친 기간이 포함된 것으로 악천후시의 GPS PWV의 정확도 검증의 의미도 내재되어 있어서 비교·분석에 있어 매우 적합한 기간이라고 사료된다. 표 2는 라디오존데 PWV와 앞서 서술한 여러 가중 평균 온도식을 적용하여 계산한 GPS PWV간의 차이에 대한 평균 차이를 나타낸다. 새롭게 결정된 한국형 가중 평균 온도식은 편의상 대표저자의 영문 이니셜인 SDS로 표시하였다.

표 2. 가중 평균 온도식별 GPS PWV와 라디오존데 PWV간의 평균 차이

구 분		Bevis	SDS	Mendes	Solbrig	Liou	Schueler	
평균 차이 (mm)	기압	수원	4.80	3.37	4.73	4.90	9.50	5.41
	미보 정	광주	7.06	5.32	6.96	7.16	12.55	7.80
		기압	수원	1.52	0.03	1.45	1.63	6.65
	보정	광주	5.03	3.20	4.93	5.13	10.78	5.80

표 2의 구분 항목 중 기압에 대한 보정 항목은 GPS PWV 계산을 위해서 사용되는 GPS 상시관측소 지역의 기압 관측치가 해수면상의 기압으로 실제 GPS 상시관측소의 표고 위치에서의 기압으로 고려되지 않음으로 인하여 고도에 따른 기압의 변화를 보정한 것을 나타낸다. 즉, GPS PWV 계산을 위해서는 GPS 관측소 높이에서의 기압 측정치가 필요하다는 것을 의미한다. 그림 3은 GPS 상시관측소와 자동 기상 관측소(AWS)간의 이격에 따른 기하학적인 차이를 나타낸다.

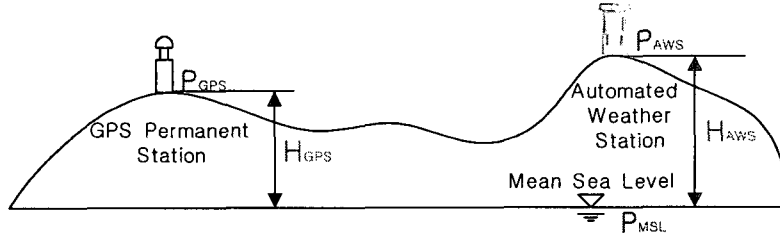


그림 3. GPS 상시관측소와 자동기상관측소와의 기하학적 관계

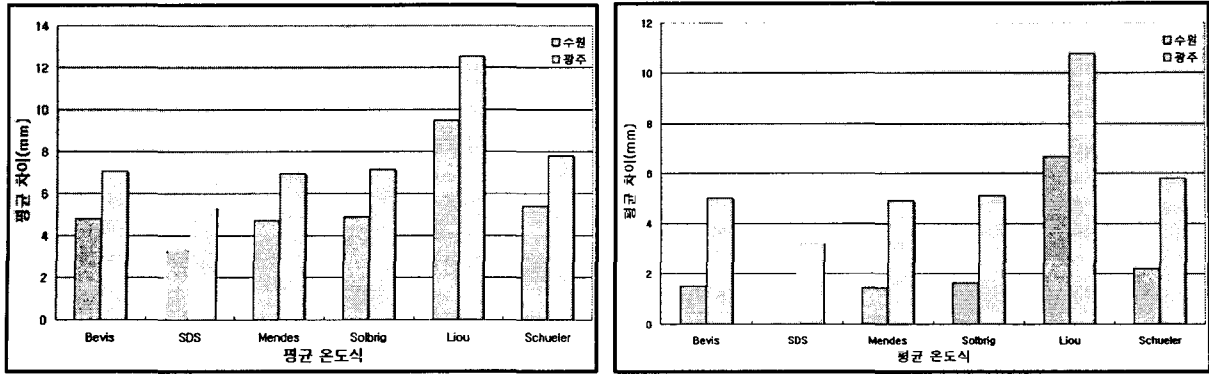
자동 기상 관측소에서의 기압 관측치는 앞에서 설명한 바와 같이 평균 해수면을 기준으로 값이며, 상대적으로 의사(擬似) 비정수역학적(quasi-non-hydrostatic)인 높이이다. 평균 해수면 기압인 P_{MSL} 로부터 자동 기상 관측소의 정표고인 H_{AWS} 만큼 떨어진 높이에서의 기압인 P_{AWS} 로의 환산이 필요하게 된다. 본 연구에서는 Feng 등(2001)이 제시한 다음의 공식을 사용하였다.

$$P_{AWS} = P_0 \left(\frac{P_{MSL}}{P_0} \right)^{R/g} - H_{AWS} \times \frac{u}{T_0/R} \quad (13)$$

- P_{AWS} = AWS상의 기압
- $P_0 = 1013.25 \text{ hPa}$
- P_{MSL} = 평균해수면상의 기압
- $R = 287.04 \text{ m}^2/\text{C sec}^2$
- $u = 0.0065 \text{ m/sec}^2$
- $g = 9.80655 \text{ m/sec}^2$
- H_{AWS} = 자동기상관측소의 정표고(m)
- 여기서, H_{GPS} = GPS상시관측소의 정표고(m)
- $T_0 = 288.16 \text{ (K)}$

식 (13)을 통해 P_{GPS} 는 GPS 관측소의 정표고인 H_{GPS} 를 사용하면 구할 수 있다. 예를 들어, 평균 해수면 상의 기압이 1017 hPa이고, GPS 측정의 표고가 606m 일 때, $P_{GPS} = 946.92 \text{ hPa}$ 을 얻을 수 있다.

이상의 이론에 입각하여 GPS PWV의 정확도를 비교한 결과, 기압 보정전이나 보정 후나 새로이 계산된 한국형 가중 평균 온도식을 이용하여 계산된 GPS PWV가 라디오존데 PWV와의 평균 차이가 가장 작게 나타났음을 알 수 있다. 특히, 지상 기상 관측 기압을 GPS 상시관측소 높이 상의 기압으로 보정을 하여 계산한 결과가 전체적으로 라디오존데 PWV와 차이에 있어서 적었으며, 이는 GPS meteorology 기술 적용에 있어서 실제 관측소 높이로 기압 보정이 필수적으로 수행되어야 함을 의미한다. 그림 4(a)와 4(b)는 기압 보정전과 기압 보정후의 GPS PWV와 라디오존데 PWV간의 평균 차이를 도표로 나타낸 것이다.



(a) (b)
그림 4. 가중 평균 온도식별 GPS PWV의 정확도 비교

기압 보정을 실시한 수원과 광주 지역의 GPS PWV와 라디오존데 PWV의 평균 차이는 가장 최근에 발표된 우리나라 인접 지역의 대만의 Liou의 연구 결과보다는 평균 7.10mm나 더 향상된 결과를 보였으며, GPS Meteorology 적용에서 가장 많이 이용되는 Bevis 식보다는 평균 1.66mm, 기존 연구 결과를 이용한 비교 분석 중에서 가장 작은 차이를 보이는 Mendes의 식보다는 1.58mm가 개선되는 결과를 보였다. 이는 한국형 가중 평균 온도의 선형 회귀식의 통계 분석 결과, 표준편차가 작고 상관계수 높게 결정되어 매우 정밀하게 결정된 결과에 기인한다고 본다. 앞으로 한국에서 GPS 위성 신호를 이용한 GPS Meteorology 기술 응용시에는 본 연구에서 결정된 한국형 가중 평균 온도식의 사용을 통해 보다 정확한 GPS PWV 계산이 이루어질 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 GPS Meteorology 기술을 이용한 GPS PWV 계산에 있어서 정확도 향상을 위해 우리나라에 적합한 가중 평균 온도식을 결정하기 위하여 국내에서 운용중인 라디오존데 6개소의 데이터와 지상 관측 기상 데이터를 이용하여 표준편차 1.46K, 상관 계수 0.972를 가지는 우리나라에 적합한 가중 평균 온도식을 결정할 수 있었다. 그 식은 다음과 같다.

$$T_m = 16.70 + 0.94 \times T_s$$

본 연구를 통해 결정된 한국형 가중 평균 온도식과 기존 연구 결과에서 제시된 가중 평균 온도식을 함께 이용하여 GPS PWV의 정확도를 분석한 결과, 한국형 가중 평균 온도식에 의해 계산된 GPS PWV의 정확도가 다른 선진국의 연구 결과에 비하여 매우 향상됨을 알 수 있었다. 또한, 보다 정밀한 GPS PWV의 정확도 분석을 위하여 기압 관측치를 실제 GPS 상시관측소 높이로 보정하여 정확도를 재평가한 결과에서도 한국의 기후 관측치를 토대로 결정된 가중 평균 온도식에 의한 GPS PWV의 정확도가 높게 평가되었다. 특히, GPS Meteorology 응용에서 가장 많이 이용되는 Bevis 식보다는 평균 1.66mm, Mendes의 식보다는 1.58mm가 개선되는 결과를 보였다. 또한, GPS PWV의 정확도 평가를 위해서는 반드시 표고에 따른 기압 보정이 반드시 필요함을 알 수 있었다.

GPS Meteorology 기술의 초기 단계에 있는 한국에서 GPS 위성 신호의 지연을 이용한 수증기량 측정에서는 본 연구를 통해 결정된 한국형 가중 평균 온도식을 적용하도록 하여 한국 기상 상태에 적합한 효율적인 연구가 이루어 질 수 있다고 제안한다. 또한, 선진국에서와 같이 GPS 수증기 관측 시스템을 구축하여 장기적인 수증기 변화량의 모니터링 데이터 확보 및 거의 실시간적인 수증기 결정이 이루어지면 홍수, 가뭄과 같은 기상 현상 징후를 포착하여 기상이변 현상 연구에 있어서 충분한 연구 정보를 제공할 수 있다고 판단되며, 해마다 우리나라에 피해를 주는 태풍등과 같은 재난을 최소화하기 위한 방지

대책 수립을 위한 귀중한 기상 데이터로의 활용이 이루어 질 수 있다고 사료된다.

측량 및 GIS 분야에 있어서도 GPS 위성 신호에 의한 대류권 지연 정보는 원격 탐사 위성인 SAR 영상의 기상 보정을 위한 데이터의 활용과 GPS leveling에 의한 정표고 계산에 많은 오차를 가지는 대류권의 천정 지연량 역계산을 통해 보다 정확한 정표고 계산을 위한 보정 방법 결정을 위해 본 연구의 결과가 우리나라에 적합한 연구 초석으로 사용될 수 있다고 결론을 내린다.

참고문헌

- 송동섭, 윤홍식, 조재명 (2002), GPS를 이용한 대류권의 수증기량 추정에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제20권, 제2호, pp. 215-222.
- 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.*, Vol. 97, pp. 15787-15801.
- Bevis, M., S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware (1994), GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 33, pp. 379-386.
- Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro (1991), Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of Wet Delay, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, No. B4, 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*.
- Liou, Y. A., Y. T. Teng (2001), Comparison of Precipitable Water Observations in the Near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 40, pp. 5-15.
- Mendes, V. B., G. Prates, L. Santos, and R. B. Langley (2000), An Evaluation of the Accuracy of Models of the Determination of the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere, *Proceedings of ION*, 2000 National Technical Meeting, January 26-28, 2000, Pacific Hotel Disneyland, Anaheim, CA.
- Schueler, T. (2001), *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Doctor's Thesis, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München (University FAF Munich), Germany, Volume 73, Neubiberg.
- Solbrig, P. (2000), *Untersuchungen über die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems*, Diploma Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany.