

GPS를 이용한 시선방향 습윤지연 결정 Determination of Slant Wet Delay using GPS

하지현***, 박관동***, 박종욱*
Jihyun Ha***, Kwan-Dong Park***, Jong-Uk Park*

한국천문연구원 GPS연구그룹*, 충북대학교 천문우주학과**,
국민대학교 산림과학대학 산림자원학과***
Tel: 042-865-3238; FAX: 042-861-5610; E-mail: hajh@kao.re.kr

Abstract: 본 연구에서는 Canada Southern Alberta Network의 6곳의 GPS(Global Positioning System) 상시관측소 데이터를 바탕으로 관측소와 각 GPS 위성간의 시선방향 습윤지연량을 결정하였다. 고정밀 GPS 데이터를 이용하여 천정방향 습윤지연량을 결정하고 이를 WVR(Water Vapor Radiometer)에서 측정된 천정방향 습윤지연량과 비교하였다. 그 결과 WVR의 천정방향 습윤지연량과 비교할 때 GPS로 관측한 천정방향 습윤지연량은 최대 1.39cm, 최소 0.99cm의 RMS 오차를 보였다. 또한 GPS로 관측한 시선방향 습윤지연량은 WVR과 비교할 때, PRN 25번 위성의 경우 최대 17cm, 최소 0.05cm의 차이가 났다.

Keywords: GPS, WVR, 시선방향 습윤지연

1. 서론

수증기는 대기중의 에너지 전달에 핵심적인 역할을 하므로 기후연구 및 일기예보에 대단히 중요한 요소이다. 따라서 수증기의 시공간적인 분포를 알아내는 일은 기상관련 연구에 필수적이다. 그러나 이 수증기는 GPS(Global Positioning System)를 이용한 정밀측위에 가장 큰 오차요인으로 작용한다. 왜냐하면 GPS 신호는 지상의 수신기에 도달하기 전 지구대기를 통과하면서 대류권의 수증기에 의해 신호지연 현상이 생기게 되기 때문이다. 하지만 이를 역으로 이용하면, 수증기에 의한 신호지연 정도를 산출할 수 있다(박관동 등, 2003). 이렇게 계산된 신호지연량은 전산 일기예보에 동화될 수 있는 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)으로 변환할 수 있다. PWV는 관측소에서 시선방향의 지연량을 천정방향으로 투영시킨 천정방향 총 지연량(TZD, Total Zenith Delay)에 의거한 2차원적인 수치이다. 그러므로 3차원적인 지연량을 계산하기 위해서는 관측소에서 GPS 위성으로의

시선방향 습윤지연량(SWD, Slant Wet Delay)을 결정할 필요가 있다.

본 논문에서는 먼저 GPS 신호의 대류권에 의한 신호지연 현상의 수학적 모델과 측정되는 수증기량을 SWD로 변환하는 과정을 기술한다. 그리고 수증기에 의한 GPS 신호지연을 결정하고, 그 결과를 WVR(Water Vapor Radiometer)의 측정값과 비교한다.

2. SWD 결정

이 장에서는 GPS 데이터를 이용하여 SWD를 결정하는 방법과 WVR에 대해 소개한다.

2.1 GPS

GPS 위성에서 보내는 신호는 대류권을 통과하면서 굴절이 일어나며, 그 결과 신호지연이 생기게 된다. 신호지연은 산소나 질소와 같은 건조가스에 의한 건조지연(Hydrostatic Delay)과 수증기에 의한 습윤

지연(Wet Delay)으로 나누어 진다. 이 중 건조 지연은 기상 데이터를 이용하면 2-3mm 정도로 정밀하게 계산할 수 있다 (Bevis et al., 1992). 하지만 습윤지연은 건조지연 경우의 1/10 정도의 크기이지만, 수증기의 시공간적인 변화는 예측하기 어렵기 때문에 습윤지연에 의한 오차는 GPS 정밀측위의 가장 큰 오차 요인으로 분류된다.

대류권의 총 지연량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{trop} = d_d + d_w \quad (1)$$

여기서 d_{trop} 이 총 지연량이며, d_d 와 d_w 는 각각 건조와 습윤지연 성분이다. 대류권의 총 지연량은 사상함수(mapping function)를 사용하여 식 (2)와 같은 천정방향 총 지연량으로 표현된다.

$$\begin{aligned} TZD &= m_d(E)d_d + m_w(E)d_w \\ &= ZHD + ZWD \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $m_d(E)$ 와 $m_w(E)$ 는 각각 임의의 위성 고도각(E, elevation angle)에 따른 건조와 습윤 사상함수를 나타낸다. 식 (2)의 첫째항은 천정방향 건조지연량(ZHD, Zenith Hydrostatic Delay)이고, 나머지 항은 천정방향 습윤지연량(ZWD, Zenith Wet Delay)이다.

본 연구에서는 Niell 사상함수를 이용하였다. Niell 사상함수 식은 다음과 같다 (Niell, 1996).

$$m(E) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}}{\frac{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}}{1}} \quad (3)$$

여기서 a, b, c는 고도각에 따른 Niell 사상함수의 계수이다.

현재 대류층 신호지연에 관한 경험적 모델은 여러가지가 개발되어 있다. 그러나 경험적 모델만으로는 충분하기 않기 때문에 이를 a priori로 놓고 보정해야 할 나머지 부분을 최소자승법으로 산출한다. a priori는 다음과 같이 표현된다.

$$TZD = AHD + AWD + ZDC \quad (4)$$

여기서 AHD는 a priori 에 의한 천정방향

의 건조지연량(a priori Hydrostatic Delay)으로써 식 (5)와 같이 산출된다.

$$AHD = 2.29951 \times e^{(-0.000116 \times \text{Height})} \quad (5)$$

여기서 Height는 타원체고(ellipsoidal height)이다. AWD는 a priori 모델에 대한 사상함수로 산출되는 천정 방향의 습윤지연량(a priori Wet Delay)으로 GIPSY로 데이터 처리할 경우 임의로 0.1m로 고정되어 있다. ZDC는 a priori 모델에 대한 천정 방향의 지연보정항(Zenith Delay Correction)으로 시간에 따라 변하는 양이며 GPS 데이터 처리과정에서 추정한다.

따라서 TZD에서 ZHD를 빼면 ZWD를 얻을 수 있으며, ZWD는 식 (6)를 이용하여 SWD로 환산된다.

$$SWD = \frac{ZWD}{m_w(E)} \quad (6)$$

여기서 12mm의 ZWD 오차는 대략 2mm의 가강수량 오차로 나타나게 된다(Bevis, et al., 1992).

2.2 WVR

WVR은 GPS 위성의 고도각과 방위각에 따른 강수량(water vapor)과 구름수액량(liquid water content)의 지연정보 관측한다. 그림 1은 WVR의 모습을 나타낸 것이다.

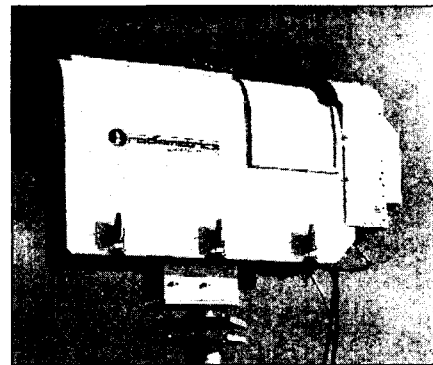


그림 1. WVR-1100

본 연구에 사용된 WVR(Model 1100)은 콜로라도에 위치한 Radiometrics사에서 만든 것으로, 23.8GHz와 31.4GHz의 이중 주파수를 사용하여 관측 가능한 GPS 위성에 대하여 5-6분마다 데이터를 생성한다(Nicholson et al., 2003). 그러나 WVR은 GPS와 달리 날씨의 변화에 민감하여 비가 오는 날에는 관측이 불가능하다는

단점이 있다.

3. GPS 데이터 처리

이 장에서는 먼저 본 연구에 사용된 GPS 데이터 처리 S/W와 Canada Southern Alberta Network에 대해 소개한다. 또한 SWD의 정밀도를 평가하기 위하여 GPS 데이터 처리 후 결정되는 ZWD를 CALG 관측소의 WVR의 ZWD와 비교하였다.

3.1 GIPSY와 Canada Network 소개

본 연구에서는 GPS 데이터의 고정밀 처리를 위하여 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II, 이하 GIPSY라 칭함)를 사용하였다. GIPSY는 미국 제트추진연구소(JPL, Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 고정밀 GPS 데이터 처리 S/W이다(Webb, et al., 1993).

GPS데이터 처리에 사용되는 궤도력에는 4가지가 있는데 이중 정확도가 가장 높은 정밀궤도력을 바탕으로 GIPSY를 이용하여 고정밀 처리하였다. 이를 위해 2003년 7월 19일부터 21일까지 3일간의 Canada Southern Alberta Network의 6개 GPS 상시관측소의 데이터를 이용하였다. Canada Southern Alberta Network은 Southern Alberta지역내 GPS 상시관측소

들로 2003년부터 형성되었다(Nicholson et al., 2003). 사용된 관측소의 위치는 표 1에 나타내었다. 표 1의 관측소 중 CALG 관측소는 WVR이 설치되어있다.

표 1. Canada Alberta Southern Network의 GPS 상시관측소 위치(BRKS: Brooks, SUND: Sundre, VULC: Volcan, CALG: Calgary, COCH: Cochrane, STRA: Strathmore)

관측소	북위(deg)	동경(deg)	고도(m)
BRKS	50.5691	-111.8970	751.438
SUND	51.8076	-114.6354	1084.317
VULC	50.4088	-113.2721	1047.777
CALG	51.0794	-114.1326	1117.823
COCH	51.1896	-114.4693	1143.291
STRA	51.0609	-113.3872	975.403

3.2 ZWD 결정

본 연구에서는 먼저 CALG 관측소의 데이터를 바탕으로 GIPSY를 이용하여 매시간 간격으로 ZWD를 결정하고 WVR의 ZWD와 비교하였다. 이 때 데이터 처리시 위성 고도각 10°이하의 관측치는 이용하지 않았다. 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 2003년 7월 19일 0시에서 2003년 7월 21일 24시까지 3일간 매시간 간격으로 변화량을 보여준다. 실선이 WVR의 ZWD이고, 점선은 GPS로 관측한 ZWD이다. 가로축은 시간을 나타내며 세로축은 ZWD를 cm단위로 나타낸 것이다. 그림 2를 보면 3일동안 WVR과 GPS의 ZWD의 전체적인

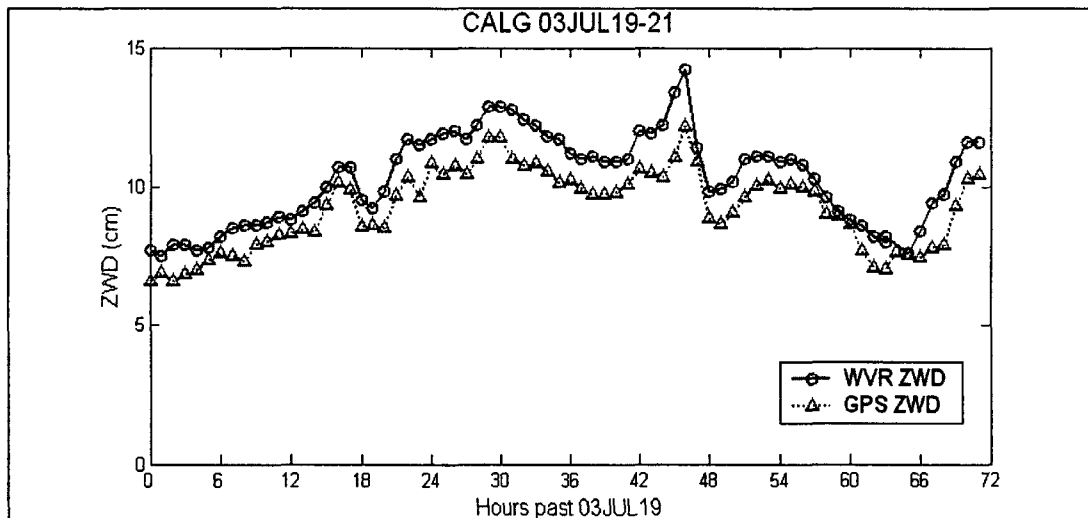


그림 2. CALG 관측소의 ZWD 변화량

경향이 일치하는 것을 볼 수 있다. 그 중 두번째 날이 대체적으로 ZWD의 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있고, 이 중 46시경에 2.01cm로 가장 많은 차이를 보였다. 반면, 65시경에는 0.08cm의 가장 작은 차이를 보였다. 또한 결과 값에 대하여 제곱평균(RMS, root mean square) 오차를 구함으로써 GIPSY로 구한 ZWD의 정확성을 평가하였다. RMS 오차란 기준값과 계산값의 차에대한 제곱평균을 말한다. 기준이 되는 값은 CALG 관측소의 WVR에서 관측한 ZWD이며, 비교대상이 되는 값은 GPS로 관측한 ZWD이다. 그 결과 RMS 오차는 3일 중 첫째날이 0.99cm로 가장 작았으며, 둘째날이 1.39cm로 가장 크게 나타났다. 셋째날은 1.05cm의 RMS 오차가 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 ZWD의 오차가 12mm일 때 PWV의 오차가 2mm 정도로 나타난다. 또한 다수의 논문에서 WVR이나 radiosonde로 측정한 PWV와 1-3mm 오차내에서 일치하는 결과를 보였다(Nam et al., 1996, 조정호 등. 2001).

그러므로 약 1~1.4cm의 ZWD 오차는 모두 2mm 이하의 PWV오차를 나타내게 된다. 즉 가장 큰 오차를 보인 둘째날의 경우도 PWV는 2mm 이하의 오차를 보이는 것이다.

4. SWD 결정

식 (6)을 이용하면 ZWD는 사상항수를 사용하여 SWD로 변환할 수 있다. CALG 관측소의 데이터를 이용하여 관측소의 ZWD를 결정하고, 이를 위성간 SWD로 변환하여 WVR의 관측 데이터와 비교하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. GPS를 이용하여 결정된 SWD와 WVR에서 관측한 SWD의 변화량을 보여준다. 'X'가 WVR에서 관측한 SWD이고, '•'이 GIPSY를 이용하여 구한 SWD이다. 3일 동안 25번과 29번 GPS 위성의 SWD의 변화량으로, 각 그래프의 가로축이 시간이고 세로축이 cm 단위의 SWD이다. 그림 3을 보면 GPS로 결정된 SWD와 WVR에서 관측한 SWD의

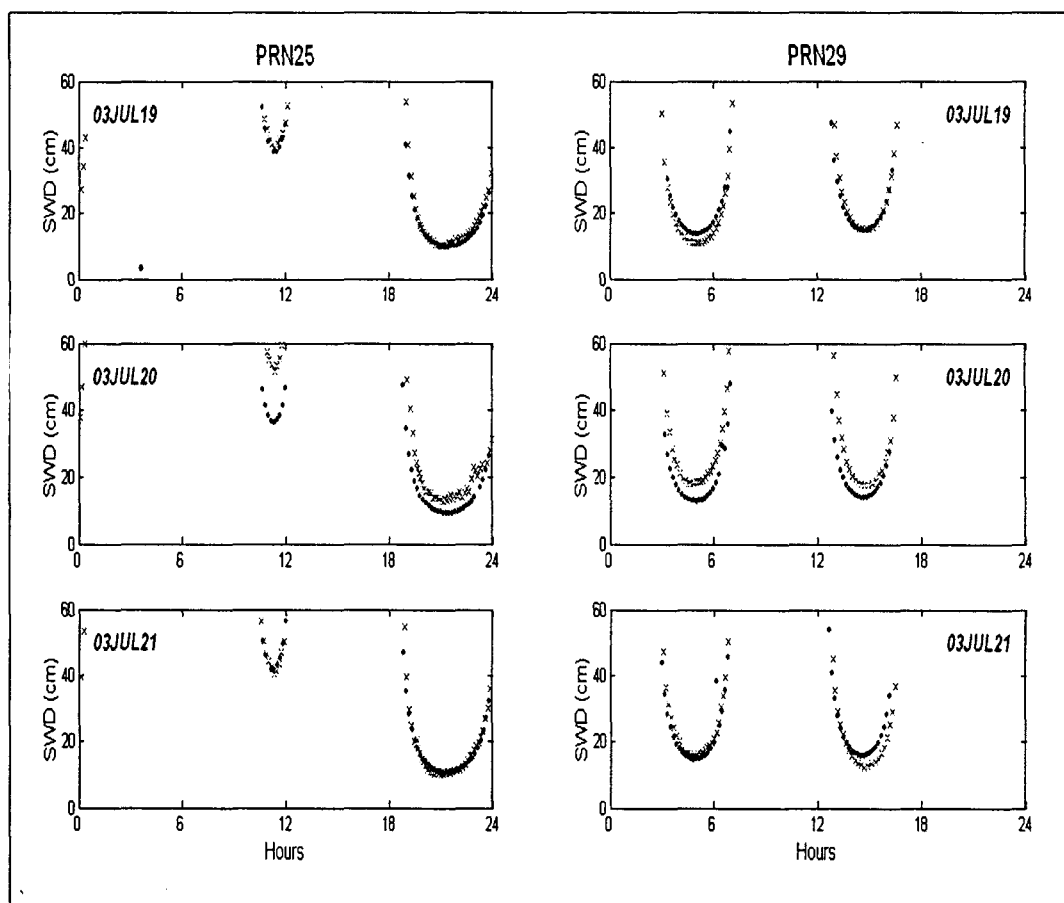


그림 3. CALG 관측소의 SWD 변화량.

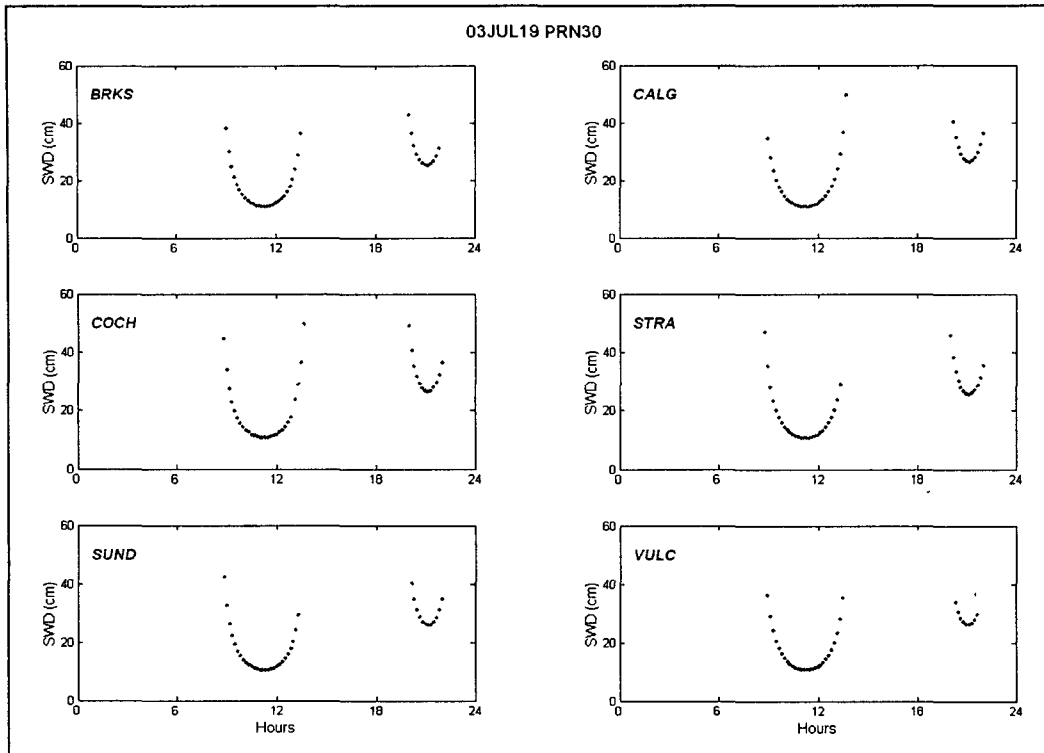


그림 4. PRN 30번 GPS 위성의 Canada Southern Alberta Network의 6곳 관측소 SWD 변화량

표 2. 각 관측소의 SWD 최대값과 최소값

시간(SEC) SWD(cm)		SITE					
		BRKS	CALG	COCH	STRA	SUND	VULC
최소값	시간	11	11	11	11	11	11
	SWD	10.75	10.62	10.57	10.57	10.43	10.64
최대값	시간	20	13	20	9	9	9
	SWD	42.61	49.53	49.00	46.75	42.41	36.22

전체적이 경향이 일치하며, 또한 고도각이 낮을수록 지연량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 고도각이 낮을수록 대기의 통과거리가 길어지기 때문이다. 25번 위성의 경우 WVR의 관측 결과와 비교해 볼 때, 19일과 21일은 매우 잘 일치한 반면 둘째날인 20일은 편향(bias)이 생긴 것을 볼 수 있고 이 중 11시경에 17cm로 가장 많은 차이를 보였다. 반면, 첫째날의 20시경이 0.05cm의 가장 작은 차이를 보였다. 29번 위성의 경우도 마찬가지로 둘째날이 가장 큰 편향이 나타났음을 볼 수 있고, 특히 첫째날의 14-16시 사이와, 마지막날의 4-6시 사이는 GPS와 WVR의 SWD가 거의 일치함을 볼 수 있었다. 특히 첫째날의 15시경이 0.04cm로 가장 작은 차이를 보였다.

다음으로 본 연구에서 대상이 된 6곳의

관측소의 2003년 7월 19일 데이터를 처리하여 SWD를 결정하였다. 각 관측소별로 GPS 위성 30번의 SWD를 결정한 것을 그림 4에 나타내었다. 모든 관측소에서 위성의 SWD는 전체적인 경향이 일치함을 볼 수 있다. 관측소별 최대와 최소 SWD를 표 2에 나타내었다. 6곳의 관측소에서 11시경에 SWD가 가장 작게 나타났으며, CALG 관측소를 제외하면 20시와 9시경에서 가장 크게 나타났다. 또한 관측소 중에서 SUND 관측소가 10.43cm로 가장 작게 나타났으며, CALG 관측소가 49.53cm로 가장 크게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 Canada Southern

Alberta Network의 GPS 상시관측소 중 6 곳의 데이터를 정밀계도력과 GIPSY로 고정밀 처리하여 SWD를 결정하였다. 또한 이 결과를 CALG 관측소에 설치된 WVR에서 측정한 데이터와 비교하여 정확성을 평가하였다. 먼저 GPS로 관측한 ZWD를 결정하여 WVR의 ZWD와 비교하였을 때 최대 1.39cm, 최소 0.99cm의 RMS 오차를 보였다. ZWD의 오차가 12mm일 때 PWV의 오차가 2mm정도임을 고려한다면, 이 결과는 최대 2mm 이하의 PWV오차를 나타내는 것이다. 또한 GPS로 관측한 SWD는 WVR과 비교할 때 최대 17cm, 최소 0.05cm의 차이를 보였다. 본 연구에서는 고가의 WVR을 사용하지 않더라도 GPS 데이터의 고정밀 처리만으로 정확성이 매우 높은 대기수증량을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 본 연구결과를 토대로, 날씨의 변화에 상관없이 항상 어디에서나 관측 가능한 GPS를 이용하면 기상 연구나 기상 예보를 비롯한 각종 대기수증량을 필요로 하는 분야에 많은 예산을 들이지 않고도 매우 높은 정확성의 대기수증량을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

Calgary 대학 Department of Geomatics Engineering의 GPS와 WVR 데이터 제공에 감사 드립니다.

참고 문헌

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, *J. Geophys. Res.*, Vol 97, No. D14, pp.11787-15801

Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A. and Shapiro, I. I., 1991, Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J.*

Geophys. Res., Vol. 96, pp.6541-6555

Nam, Y. S., Kuang, D., and Schutz, B. E., 1996, Comparison of GPS estimates of wet tropospheric delays with WVR measurements, *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the ION*, Kansas City, MO., pp. 827-834

Nicholson, N., Hoyle, S., Skone, S., Cannon, M. E., Lachapelle, G., 2003, 4-D Troposphere modeling using a regional GPS network in Southern Alberta, *Proceedings of the ION GPS/GNSS-03 Conference*, Portland

Niell, A. E., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, Vol 101, No. B2, pp.3227-3246

Webb, F. H. and Zumbege, J. F., 1993, *An Introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., D-11088

박관동, 하지현, 조정호, 박필호, 2003, GPS를 이용한 준실시간 가강수량 측정, 제10차 GNSS Workshop 학술발표논문집, pp. 279-282

조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙, 2001, GPS를 이용한 가강수량 측정정밀도 검증, *한국기상학회지*, Vol. 37, No. 3, pp.557-565