J. Astron. Space Sci. 16(1), 61-68 (1999)

GPS를 이용한 대류권의 수증기량 측정

문용진 · 최규홍
연세대학교 천문우주학과

박필호
표준과학연구원 천문대

ESTIMATION OF PRECIPITABLE WATER VAPOR USING THE GPS

Yong-Jin Moon, Kyu-Hong Choi
Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul
e-mail: gnosis@galaxy.yonsei.ac.kr, khchoi@galaxy.yonsei.ac.kr

Pil-Ho Park
Korea Astronomy Observatory
e-mail: phpark@hanul.issa.re.kr

(Received March 31, 1999; Accepted May 21, 1999)

요 약

GPS신호는 대류권을 지나면서 지연된다. 대류권에서의 신호지연은 건조공기에 의한 건조지연과 수증기에 의한 습윤지연으로 분리할 수 있다. 본 연구에서는 '98년 5월 한달동안 대전, 수원에서 관측된 GPS자료를 최소자승법으로 처리하여 천정방향에 대한 총 대류권 신호지연값을 얻어내었다. 건조지연값은 지상기압을 정확하게 관측하면 얻어지므로 총대류권 지연양에서 건조지연값을 빼주면 천정방향의 습윤지연값을 얻게 된다. 천정 습윤지연값은 대류층의 수증기양과 직접적으로 연관됨으로 수증기량을 측정하였고 결과의 신빙성을 검증하기 위해 오산에서 관측된 라디오존데 자료를 이용하여 계산한 대류권 수증기량과 비교하여 보았다. 그 결과 오산에서 가까운 수원의 경우 수증기량의 변화 경향이 라디오존데의 그것과 대체로 일치하였고 표준편차 3.68mm의 정도의 정확도를 보였다

ABSTRACT

The radio waves transmitted from GPS satellites is delayed by the troposphere as they propagate to Earth-based GPS receivers. The troposphere delay is usually divided into two parts, the dry delay due to the atmospheric gases and the wet delay due to the water vapor. In this study for the month of May in 1998 the GPS data from two stations(Taejon, Suwon) were used to estimate the total troposphere delay in the zenith direction by the least square method. The dry delay in the zenith direction

can be evaluated by using surface pressure values at the station, then the zenith wet delay is obtained by removing the zenith dry delay from the total delay. The zenith wet delay is strongly correlated with the total precipitable water. The quality of the estimate has been assessed by comparison with radiosonde data at Osan. We found the good agreement in precipitable water of the GPS estimates and the radiosonde data. The standard deviation of the difference between the GPS and radiosonde observations was 3.68mm at Suwon.

1. 서 론

GPS위성으로부터의 신호는 지구의 수신소에 도착하기까지 지구의 대류권을 지나면서 신호지연을 일으키게 된다. 대류권의 대기는 건조 가스와 수증기로 되어 있는데 이중 수증기는 영구 다이폴 모멘트(permanent dipole moment)를 가지고 있다는 점에서 다른 성분들과 구별된다.

다이폴 성분이 대류권에서의 굴절에 영향을 미치는 정도는 비다이폴 성분에 비해 20배정도 더 큰 것으로 알려져 있다(Bevis *et al.* 1992). 이 때문에 대류권에서 대기에 의한 신호 지연은 수증기에 의한 습윤 지연(wet delay)과 나머지 성분들에 의한 건조 지연(dry delay)으로 나누어 진다(Saastamoinen 1972: Davis *et al.* 1985). 본 연구에서는 이 대류권에서의 신호지연을 매개변수화 하는 최소자승법을 이용하여 천정 대류권 신호지연을 얻어내었다. 건조지연의 경우 정역학적 평형상태를 가정하기 때문에 지표면의 압력을 측정하면 정확하게 얻어지게 된다. 따라서 총 천정 대류권 지연값에서 건조지연을 빼주면 천정 습윤값을 얻게다. 대기중의 수증기량과 천정습윤 지연값과는 직접적인 연관이 있으므로 이로부터 대류권의 수증기량을 구하였고 그 결과의 정확도를 검증하기 위하여 오산의 라디오존데 관측값으로부터 얻은 결과와 비교하여 보았다.

2. 대류권 신호지연의 원리

대류권에서의 신호지연은 진공(n=1)보다 큰 굴절지수를 갖는 대기층에 의해 발생한다. 대류권의 큰 굴절률 때문에 신호의 대류권 매질에서의 전파 속도는 진공에서의 빛의 속도 보다 작게 되고 미소거리 ds를 진행한 파는 $dx=nds/c$의 지연을 일으킨다. 여기서 n은 굴절지수, c는 광속을 의미한다. 대류권에서의 신호 지연을 거리단위로 나타내면 $cdx=nds$ 로써 표현된다. 공간적으로 변하는 굴절지수 때문에 신호의 경로는 기하학적 직선에 대해 약간의 곡률을 가지게 된다. 따라서 위성과 관측자사이의 경로는 곡선으로 나타나게 된다. 실제의 곡선 경로와 대기층이 없었을 때 신호가 진행할 직선경로 사이에 차는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\Delta L = \int n(s)ds - \int ds \tag{1}$$

$$\Delta L = \int (n-1)ds + \int ds - \int ds = \int (n-1)ds + [L-G] \tag{2}$$

여기서 L은 실제 경로의 길이이고 G는 기하학적 경로의 길이이다. 위 식에서 우변의 첫째 항은 신호의 속도저하로 인한 효과이고 둘째 항은 전파의 휘어짐에 의한 효과이다. 고도각이 15도 이상인 경우에는 휘어짐에 의한 효과는 1cm이하이고, 신호가 천정 방향이고 굴절지수가 수평방향의 gradient가 없을 시에는 그 효과가 없다. 식(2)는 대기 굴절률 N으로도 표현될 수 있는데 굴절률 N은 다음과 같이 정의된다.

$$N = 10^6(n-1) \tag{3}$$

따라서

$$\Delta L = 10^{-6} \int N ds + [L-G] \tag{4}$$

굴절률 N은 대기밀도, 기압, 온도, 수증기의 함수인데 Thayer(1974)에 의하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$N = k_1(\frac{P_d}{T})Z_d + k_2(\frac{e}{T})Z_w^{-1} + k_3(\frac{e}{T^2})Z_w^{-1} \tag{5}$$

여기서 P_d, e는 각각 건조공기와 수증기의 분압이고 단위는 millibars, T는 절대온도, 압축률 Z는 습윤공기와 이상기체의 차를 보정하기 위한 항이다. k_1,k_2,k_3는 실험실에서 얻어진 상수값이다. 윗식의 첫번째 항은 건조항이라 불리고 나머지 항은 습윤항으로 불린다.

3. GPS데이타로부터 수증기량 도출

대류권의 신호지연은 건조공기(산소, 질소등)에 의한 건조지연과 수증기에 의한 습윤지연으로 분리할 수 있으며, 따라서 천정방향에 대한 대류권 신호지연은 다음과 같이 표현된다

$$\Delta L = \Delta L_d + \Delta L_w \tag{6}$$

위에서 ΔL_d와 ΔL_w는 각각 천정방향에 대한 건조지연과 습윤지연을 의미한다. 천정 건조지연은 Elgered *et al.* (1991)에 의하면 다음식으로 주어진다.

$$\Delta L_d = (2.2779 \pm 0.0024)\frac{P_s}{f(\lambda, H)} \tag{7}$$

여기서 P_s는 지표면의 기압이고 f는 관측소의 위도(λ)와 해발고도(H)에 따른 중력 가속도의 변화를 보정하기 위한 항이다. 또한 천정 습윤지연은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta L_w = 10^{-6}(k_2' \int \frac{e}{T}dz + k_3 \int \frac{e}{T^2}dz) \tag{8}$$

여기서 상수 $k_2' = (17 \pm 10)$Kmbar이고 k_2=$(3.776 \pm 0.004)10^5$ 이다.

Davis *et al.*(1985)에 의하면 가중 평균온도를 다음과 같이 정의한다.

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} dz}{\int \frac{e}{T^2} dz} \tag{9}$$

식 (8),(9)식과 이상기체 상태방정식을 연립하여 풀면,

$$\mathrm{IWV} = \int \rho_w dz \approx \kappa \Delta L_w \tag{10}$$

위에서 IWV는 연직 기주의 수증기 총량으로 정의되고 ρ_w는 물의 밀도, κ는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\kappa = 10^{-6}(\frac{k_3}{T_m} + k_2')R_w \tag{11}$$

R_w는 수증기의 기체상수이다.

대기중의 수증기량은 액체상태의 물기둥의 높이로 나타내는데 이를 PW(precipitable water vapor, 가강수량)라고 하고 다음과 정의된다.

$$\mathrm{PW} = \frac{\mathrm{IWV}}{\rho_w} \tag{12}$$

식(9),(10),(11)에서 수증기압과 온도의 수직분포를 알면 IWV와 T_m를 정확히 구할 수 있다. 하지만 그런 자료는 얻기가 힘들므로 관측 통계자료를 통한 예측을 하게된다. Bevis *et al.*(1992)에 의하면,

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s \tag{13}$$

와 같은 관계가 성립한다. 여기서 T_s는 지표면의 기온을 의미한다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서는 스위스 Bern대학에서 개발한 GPS자료처리 소프트웨어인 Bernese 4.0을 이용하여 1998. 5.1 ~ 5.31, 1998. 8.1 ~8.10의 두 기간에 걸쳐 우리나라의 대전, 수원의 GPS raw data를 처리하였다. 이로부터 대전, 수원에서의 대류권 천정지연값을 계산하였다. 대류권 천정지연값을 수증기량으로 바꾸기 위해서는 건조지연값을 구해 이를 전체 천정지연값에서 빼주어야 하는데 이 때 관측소의 지표면 기온과 기압 관측치가 필요하다. 이를 위해 기상청에서 3시간 간격으로 관측하여 발표하는 값들을 이용하였다. 이들 값은 수원과 대전 기상청 관내의 측정치이므로 실제 GPS관측지점의 측정치와는 미세한 차이가 있을 수 있다. GPS위성을 통해 얻은 가강수량의 신빙성을 공군과 기상청에서 관측한 라디오존데 관측자료로부터 계산한 값과 비교하였다. 라디오존데 관측은 오산, 포항, 광주, 제주에서 이루어지고 있는데 이중에서 수원과의 거리가 비교적 가까운 오산 자료를 비교대상으로 하였다. 이 라디오존데 관측은 아침 9시와 저녁 9시 하루 두 번 관측을 하게 되는데 따라서 이 때의 가강수량을 GPS관측에서 얻은 값과 비교하게 되었다. 본 논문에서는 수원의 결과만를 나타내었는데 그림 1은 이들 두 관측값들의 경향이 대체로 일치하는 결과를 보여주고 있다. GPS관측

수 원

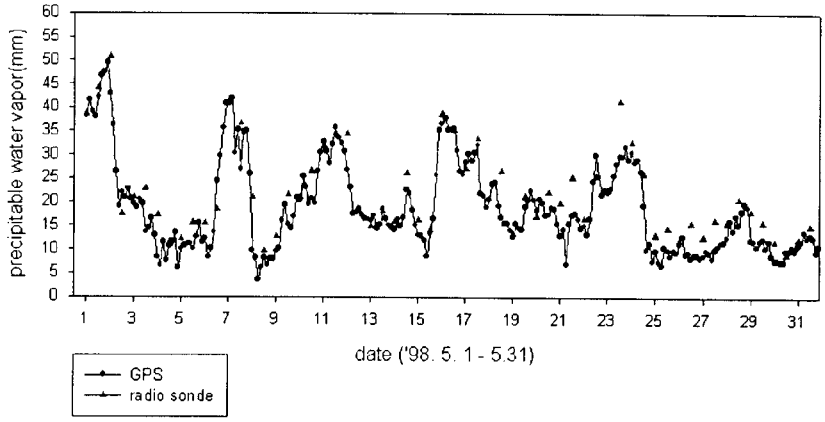

그림 1. GPS처리 결과와 라디오존데 결과와의 비교(98년 5월 1일 - 5월31일)

수 원

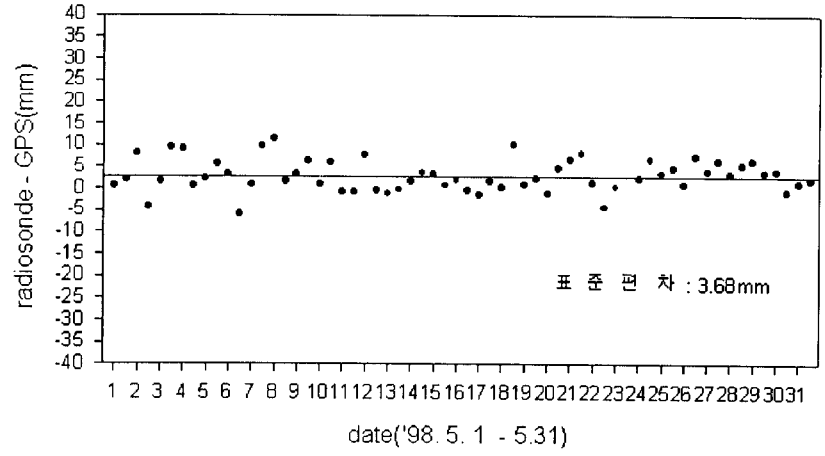

그림 2. GPS처리 결과와 라디오존데 결과와의 비교

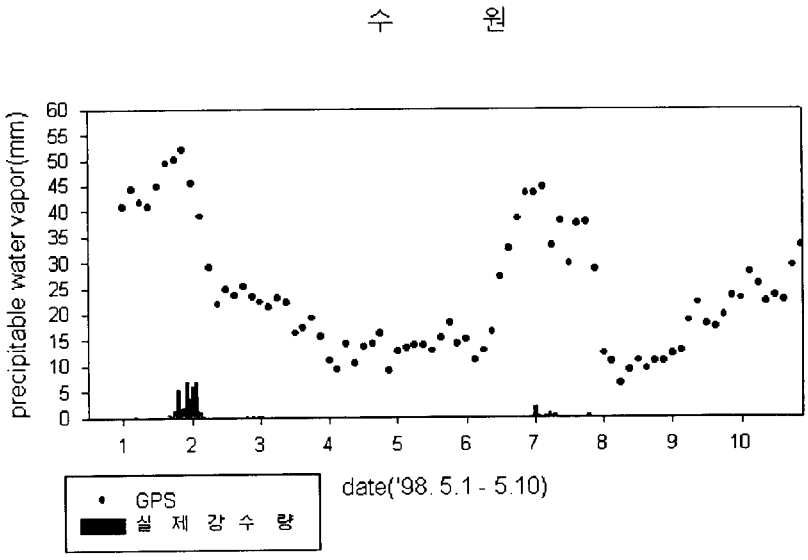

그림 3. 실제강수량과 GPS로 얻은 가강수량과의 비교(98년 5월 1일 - 5월10일)

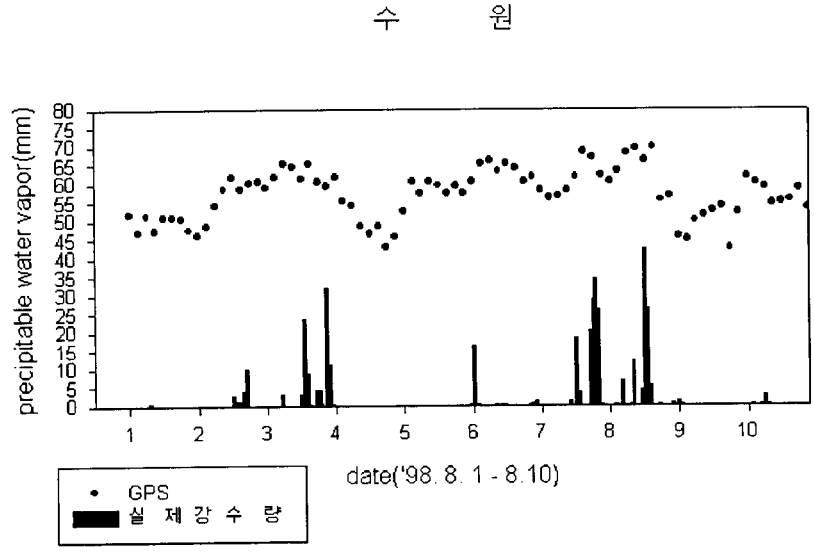

그림 4. 실제강수량과 GPS로 얻은 가강수량과의 비교(98년 8월 1일 - 8월10일)

값과 라디오존데 관측값을 비교한 통계결과를 그림 2에 나타내었는데 수원의 경우 표준편차가 대략 3.68mm정도 되었다. 그 오차원인으로는 다음과 같은 점들이 추정된다. 즉 위의 표준편차는 GPS관측값과 라디오존데 관측값을 아침 9시와 저녁 9시에 일대일로 대응시켜서 얻어진 것인데 실제로는 라디오존데 관측의 경우 관측 시작과 종료사이에는 시간간격(약 1시간 30분)이 존재하기 때문에 가강수량이 시간에 대해 변화가 심할 경우에는 두 관측값이 정확히 동기화(Synchronization)되지 않음으로 인한 오차 가능성이 커진다. 또한 수원, 대전과 오산 데이타를 비교함으로써 생기는 공간적 차이이다. 이는 앞으로 좀 더 많은 곳에 관측소가 생긴다면 좀더 정확한 비교가 가능하리라고 본다. 그 외에 라디오존데가 관측소 수직 상공을 관측하지 않고 어떠한 원인에 의해 수평이동을 함으로써 생기는 오차를 생각할 수 있다. 이러한 오차들은 현재로선 정량적으로 파악하기에는 상당히 어렵다고 판단된다. 이 외에도 GPS자체의 오차 요인을 생각해 볼 수있다. 즉 GPS자료처리시 임의의 고도각에서의 신호지연을 천정지연과 mapping function의 곱으로 표현할 때는 신호지연이 수평 gradient가 없다는 가정 하에서 가능한데 실제로는 수평 gradient가 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서 앞으로는 수평 gradient를 고려하는 알고리즘이 필요하리라고 본다. GPS로 인한 오차항을 정밀하게 비교, 분석하기 위해서는 앞으로 water vapor radiometer라는 관측장비가 필요하다. 이 장비를 이용하여 얻은 가강수량과 수평 gradient를 고려한 GPS 가강수량은 대략 표준편차 1mm의 정확도까지 접근시킬 수 있으리라 판단된다. 그림 3은 GPS관측으로 얻은 가강수량과 실제 강수량과 비교하여 보았다. 예상대로 이 둘 사이에는 밀접한 상관관계가 있었다. 그림 4는 우리나라에 집중호우가 내렸던 '98년 8월1일에서 8월10일 까지의 가강수량과 실제 강수량을 비교한 것이다. 그림 3과 같이 가강수량이 피크를 이룰 때마다 집중호우가 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라에서 국제적으로 공인된 GPS관측소 2곳(대전, 수원) 자료를 이용하였는데 그 결과 라디오존데 관측자료를 가지고 얻은 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 수증기의 공간적, 시간적 분포를 실시간으로 정밀 추적하기 위해서는 좀 더 많은 수신소가 필요하다는 점을 절실히 느끼게 되었다. 조만간 우리나라에 많은 수신소가 건립될 예정이므로 이 문제는 몇년 내에 거의 해결되리라 생각된다. 많은 수신소에서 관측된 자료를 가지고 한반도의 가강수량에 관한 실시간 지도를 그릴 수 있다면 기존의 기상관측 자료와 더불어 수치모델의 기본자료로 활용되어 기상예보 향상에 일조를 하리라고 생각된다.

감사의 글: 이 논문은 과학재단 특정기초연구비(96-0702-0301-3)와 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI 98-5408)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A., Anthes, & R. H. Ware 1992, JGR, 97,

15,787-15,801

Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. Rogers, & G. Elgered 1985, Radio Science, 20, 1593-1607

Rauch, J. L. & Roux, A. 1982, JGR, 87, 8191

Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring, & I. I. Shapiro, 1991, JGR, 96, 6541-6555

Saastamoinen, J. 1972, Geophysical Monograph 15, AGU, Washington, DC.

Thayer, G. G. 1974, Radio Science, 9, 830