한국측량학회지, 제 20 권 제 2 호, pp. 215~222(2002년 6월 30일)

GPS를 이용한 대류권의 수증기량 추정에 관한 연구
Estimation of Tropospheric Water Vapor using GPS Observation

송동섭* · 윤홍식** · 조재명***
Song, Dong Seob · Yun, Hong Sic · Cho, Jae Myung

要 旨

GPS위성으로부터 전송된 GPS신호는 대기를 통과하면서 신호의 지연을 일으킨다. 대류권에 의한 지연은 건조지연과 습윤지연으로 나누어지는데 이 중 건조지연은 총 지연량의 약 90%를 차지한다. 건조지연량은 여러 모델에 의해 쉽게 산정할 수 있지만, 습윤 요소에 의한 습윤 지연량은 건조지연량보다는 그 양이 적지만 매우 변화가 다양하여 그 산정에 있어서 많은 오차를 갖게 된다. 건조 지연량(ZHD)은 지표면의 압력으로부터 산정할 수 있으며, 총 지연량(TZD)으로부터 건조 지연량을 빼주게 되면 습윤 지연량을 얻게 된다. 본 연구에서는 제주, 광주, 수원, 대구지역에서 운용중인 GPS상시관측소 데이터를 이용하여 습윤지연량 산출하고, 이를 천정방향의 수증기량(IWV)으로 환산, 수증기량으로부터 가강수량(PWV)을 도출하였다. 이 가강수량의 검증을 위해 수원에서 가까운 오산지역의 라디오존데 데이터와 광주 지역의 라디오존데 데이터로부터 구한 가강수량을 비교하였다. 그 결과, 수원에서는 평균차이가 3.77 mm(표준편차 = ±0.013 mm), 광주에서는 2.70 mm (표준편차 = ±0.011 mm)의 차이를 보였다.

ABSTRACT

As the GPS signals propagate from the GPS satellites to the receivers on the ground, they are delayed by the atmosphere. The tropospheric delay consists of two components. The hydrostatic (or "dry") component that is dependent on the dry air gasses in the atmosphere and accounts for approximately 90% of the delay. And the "wet" component that depends on the moisture content of the atmosphere and accounts for the remaining effect of the delay. The Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) can be calculated from the local surface pressure. The Total Zenith Delay (TZD) will be estimated and the wet component extracted later. Integrated Water Vapor (IWV) gives the total amount of water vapor that a signal from the zenith direction would encounter. Precipitable Water Vapor (PWV) is the IWV scaled by the density of water. The quality of this PWV has been verified by comparison with radiosonde data(at Osan). We processed data for JULY 2 and JULY 14, 1999 from four stations(Cheju, Kwangju, Suwon, Daegu). We found the coincidence between PWV of the estimations using GPS and PWV of pressing the radiosonde data. The average of the difference between PWV using GPS and PWV using radiosonde was 3.77 mm(Std. = ±0.013 mm) and 2.70 mm(Std. = ±0.0011 mm) at Suwon & Kwangju.

1. 서 론

GPS위성을 이용한 측지측량분야에서 지표면상의 수신기와 GPS위성과의 거리는 위성에서 송신된 신호가 수신기에 도달하는 시간을 측정하여 결정한다. 그러나, GPS위성으로부터 송신된 신호는 지구의 대기권을 지나면서 속도변이를 발생하면서 신호지연이 일어나게 된다. 특히 이 대기권중에서 이온층과 대류권에서의 신호지연량이 크다. 이중 이온층에서의 신호지연은 신호의 주파수에 따라 그 크기가 다르므로, GPS위성에서 송신되는 두 주파수(L1: 1.575 GHz, L2: 1.228 GHz)를 이용하여 선형조합을 통해 소거할 수 있다.[17] 그러나, 대류권의 경우에는 주파수가 영향을 받지 않는다. 대류권의 지연오차는 크게 두가지로 나뉘어지는데 건조공기에 의한 건조지연(dry delay)과 습윤공기에 의한 습윤지연(wet delay)으로 구별된다.[7] 건조지연은 유체 정역학적 평형상태에 있기 때문에 hydrostatic delay라고도 한다. 이들 신호 지연은 천정방향시 가장 작고, 고도각이 낮아질수록 점점 커지는데

*성균관대학교 토목환경공학과 석사과정
**성균관대학교 토목환경공학과 조교수
***성균관대학교 토목환경공학과 박사과정

임의 고도각에 대한 지연오차는 천정지연과 맵핑함수(mapping function)의 곱으로 나타낸다. 여기서, 맵핑함수는 고도각의 함수이다. 지표면의 압력측정값을 0.3 mb보다 더 정확히 알면 천정방향의 건조지연량은 1 mm 이내로 예측할 수 있다.[11]

본 연구에서는 국내 GPS 상시관측소데이터의 정밀해석을 통한 대류권에서의 GPS신호의 지연량을 산출하였다. 여기서 산출된 습윤지연량을 추정하면 대류권에 존재하는 수증기량을 산출할 수 있는 이론에 의하여 그 후 동일 기간동안의 radio sonde데이터를 분석하여 GPS신호의 지연량과 누적수증기량과의 상관관계를 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 대류권의 신호지연 요소

대류권에서 신호지연을 일으키는 주된 두가지 요소는 중성 대기(neutral atmosphere)의 정역학적 평형 상태하에서 발생되는 건조지연(dry delay)과 수증기에 의한 습윤지연(wet delay)이다. 건조지연은 지표면의 수증기가 아닌 대기의 다른 요소(온도, 압력)를 알면 쉽게 결정할 수 있어서 정확한 위치결정에 보정을 하기가 간편하다. 반면에 습윤지연은 대기중의 다양하게 변화하는 수증기에 기인하므로, 천정 방향에 대한 대류권의 총 지연량으로부터 기상데이터를 이용하여 산출한 건조지연량을 빼주게 되면 습윤지연량을 산출할 수 있다.

대류권에서의 신호지연은 실제로 각각의 위성으로부터 독립된 방향으로 측정할 수는 없다. 대신, 각 위성으로부터 신호지연을 취합하여 맵핑함수를 이용하면 천정방향으로의 신호지연량을 계산할 수 있게 된다. 천정방향으로 발생하는 대류권의 신호지연량은 약 2.5 m 정도이다. 이 중에서 약 90%는 건조지연에 의해 발생되고 나머지는 수증기에 의한 습윤지연량이다.

대류권의 신호지연은 진공상태(굴절률 = 1)보다 더 큰 굴절률을 가지기 때문에 발생하게 된다. 대류권의 굴절률이 크기 때문에 대류권 매질에서의 GPS신호의 전파속도는 진공에서의 빛의 속도보다 줄어들게 되고 시간지연을 일으키게 된다. 공간상 변동하는 굴절률로 인하여 신호의 경로는 기하학적 직선에 대하여 약간의 곡률을 가지게 된다. 따라서, 기하학적 직선경로와 실제경로와의 차이가 생기는데 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.[11]

$$\Delta L = \int_L n(s)\,ds - G \qquad (2\text{-}1)$$

여기서, n(s): 경로 L을 따라서 위치 s에서의 굴절 함수
G: 기하학적인 직선경로

식 (2-1)을 다시 쓰면,

$$\Delta L = \int_L [n(s) - 1]\,ds + [S - G] \qquad (2\text{-}2)$$

여기서, S: 실제경로

위 식에서 $\int_L [n(s) - 1]$ 은 GPS신호의 속도 저하로 인한 영향이고, [S-G]는 GPS신호의 구부러짐에 의한 영향이다. 대부분의 고도각이 15도 이상인 경우에 [S-G]에 의한 영향은 1 cm 이하이며, 신호가 천정방향이고 굴절률이 수평방향에 대해 경사가 없을 시에는 그 영향이 미치지 않는다. 따라서, 대부분의 초과되는 신호지연량은 굴절률에 속도 저하에 의한 영향에 기인한다.

식 (2-2)는 대기 굴절률을 사용하는 것이 더 간편한데 n과의 관계식은 다음과 같다.[16]

$$N = 10^6\,(n-1) \qquad (2\text{-}3)$$

3. 대류권 지연량과 수증기량

3.1 대류권 지연량

연구 대상지역인 제주, 광주, 수원, 대구의 4개 상시관측소로부터 획득한 GPS데이터를 처리하여 대류권 총 지연량을 산출하였다. 먼저 연구 기간동안의 일별 AHD (apriori hydrostatic delay)를 산출하는데 AHD는 apriori 모델에 의한 천정 방향의 건조지연으로써 표준대기모델을 사용할 경우에는 관측소 표고에만 관계가 있고 시간과는 무관하다.

다음의 식을 사용하여 AHD를 산출하였다.[16]

$$AHD = 2.29951 \times e^{-0.000116 \times h} \qquad (3\text{-}1)$$

여기서, h : 타원체고

다음은 AWD를 산출하는 것인데 AWD(Apriori Wet Delay)는 apriori모델에 대한 맵핑함수로써 임의로 0.1 m로 고정이 되어 있다. 총 지연량을 산출하기 위해 가장 중요한 습윤지연에 관계된 ZDC(Zenith Delay Correction)의 경우는 apirori모델에 대한 보정항으로써 시간에 따라 변화하는 양이며 최소자승법으로 얻어지는 값이다. GPS

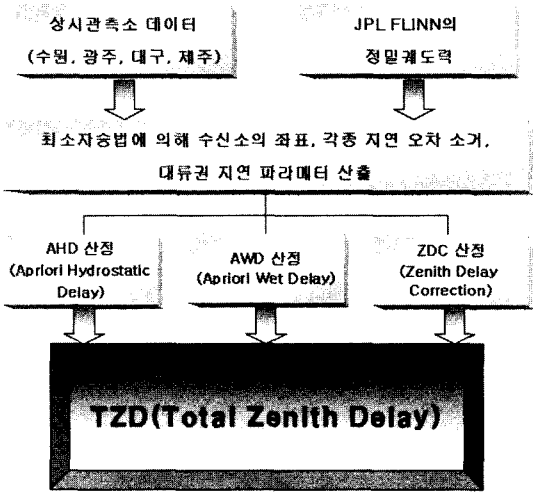

그림 1. 총 지연량 산출과정도

데이터를 1시간 간격으로 처리하여 얻은 ZDC는 다음의 가강수량 산출을 위해 3시간 간격의 평균값을 사용하였다. 이러한 과정을 통해 구한 AHD와 AWD 및 ZDC를 합산하여 대류권에 의한 GPS의 총 지연량을 산출하게 된다. 그림 1은 대류권의 총 지연량을 산출하기 위한 과정을 나타낸다.[10]

3.2 수증기량

대류권의 천정지연값을 수증기량으로 환산하기 위하여 지상 관측소에서 측정한 기압치와 기온이 필요하다. GPS 상시관측소 인근지역에서 3시간에 한번씩 관측된 기상관측치와 GPS상시관측소의 위도와 높이를 이용하여 건조지연량을 산출한 뒤 이를 총 지연량에서 빼주게 되면 습윤지연량이 남게된다. 따라서, 하루 8번의 습윤지연량이 산출되었고, 이 습윤지연량을 관측소의 기온을 이용하여 가강수량(PWV; Precipitable Water Vapor)으로 환산하게 된다.[16]

본 연구에서는 건조지연량(Zenith Hydrostatic Delay)을 계산하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

$$\Delta L_{HYD} = ZHD = 10\times^{-6}(2.767\pm0.0024)\frac{P_S}{f(\varphi, h)} \tag{3-2}$$

여기서, P_S: 관측소 기압

$f(\varphi, h)$: 중력가속도에 따른 함수

중력가속도에 따른 함수는 다음에 의해 산출된다.

$$f(\lambda, h) = (1 - 0.00266\times\cos2\varphi - 0.00028h) \tag{3-3}$$

기상 관측소에서 관측한 GPS 상시관측소 지역의 기압 데이터와 정밀 해석을 통한 GPS상시 관측소의 위도와 타원체고를 이용하여 건조지연량을 산출하였다. 이 건조지연량을 앞서 구한 총 지연량에서 빼주어 습윤지연량을 산출하였다. 실제 강수량과의 비교를 위해 여기서 구한 습윤지연량을 수증기로 환산할 필요가 있다. IWV (Integrated Water Vapor)라고 하는 단위 면적당 수직 방향에 대해 모두 더한 수증기량을 먼저 구해야 하는데 이는 다음의 식으로 구하게 된다.

$$IWV = \int\rho_w\, dh = \frac{ZWD}{k} \tag{3-4}$$

여기서, ρ_w: 수증기의 밀도

k는 무차원 상수로 수증기의 기체상수와 기온에 관계되는 식이다.

$$k = 10^{-6}\left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2\right) \tag{3-5}$$

여기서, $k'_2 = (17\pm10)$[K/hPa]

$k_3 = (3.776\pm0.03)\times10^5$[K²/hPa]

T_m: 관측소의 평균기온[K]

Davis[1985]에 의하면 평균온도를 다음과 같이 정의한다.

$$T_m = \frac{\int\frac{P_V}{T}dH}{\int\frac{PV}{T^2}dH} \tag{3-6}$$

평균온도 T_m은 지구상 여러 지역의 radio-sonde 관측자료를 통계적으로 처리한 결과 지상 관측소의 온도 T_S와 다음의 관계가 있음이 밝혀졌다.

$$T_m = 70.2 + 0.72T_S \tag{3-7}$$

이 T_m의 오차는 약 4.7 K를 갖는 것으로 보고되어 있다.

본 연구에서는 식 (3-7)을 이용하여 평균온도(절대온도)를 산출하여 3시간별로 무차원 상수 k를 구하였다. 이를 통해 구한 IWV는 실제 강수량과 비교하기 위해 가강수량(PWV)으로 환산을 하였다.

IWV를 가강수량으로 환산하기 위해서는 수증기의 밀도로 나누어주면 계산이 된다.[13]

$$PWV = \frac{IWV}{\rho_w} \tag{3-8}$$

여기서 구한 가강수량과 실제 강수량을 비교하였다. 다음의 그림들은 GPS를 이용하여 산출한 3시간별 가강수량과 기상청에서 협조를 받은 1시간별 실제 강수량을 비교한 그림이다. 또한 표 1에서 표 4는 가강수량이 정점을 이루는 부근에서 가강수량과 실제 강수량의 값을 비교한 것이다.

그림 2의 제주지역에서는 1999년 7월 8일 21시에 PWV값이 6.058 cm를 보이는 정점에서 실제 강수량이 1.4 mm를 보였으나 6시간 후에 실제 강수량은 연구기간 중 가장 큰 수치인 14.9 mm를 보였다. 이 시간차는 GPS시간계와 실제 강수량을 관측하는 시간계간의 차이에 의해 발생할 가능성이 있다고 분석된다. 다음의 연구지역에서도 이 사실을 알 수 있다.

그림 3의 광주지역에서도 7월 8일 24시에 최대 PWV값이 산출되었다.

그때의 실제 강수량은 10.1 mm를 기록하였으며, 3시간이 지난 뒤에는 18.6 mm의 연구기간중 가장 큰 강수량을 나타내었다.

그림 4에 표시한 수원지역은 연구 기간중 최대 실제 강수량인 23 mm를 보이는 7월 9일 정오에 4.933 cm의 최대 PWV값을 보여주고 있다.

또한, 그림 5에 표시한 바와 같이 대구지역에서는 최대 실제 강수량을 보인 시점은 1999년 7월 2일 03시의

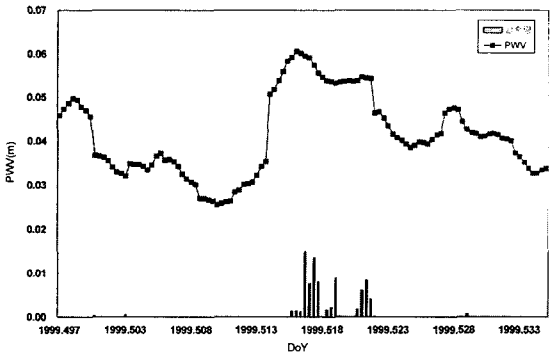

그림 2. 가강수량과 실제 강수량 비교(제주)

표 1. 최대 가강수량과 실제 강수량 비교(제주)

DoY	가강수량(m)	실제 강수량(m)
1999.5156	0.05922	0.00120
1999.5159	0.06058	0.00140
1999.5163	0.06009	0.00130
1999.5167	0.05952	0.01490
1999.5170	0.05922	0.00760

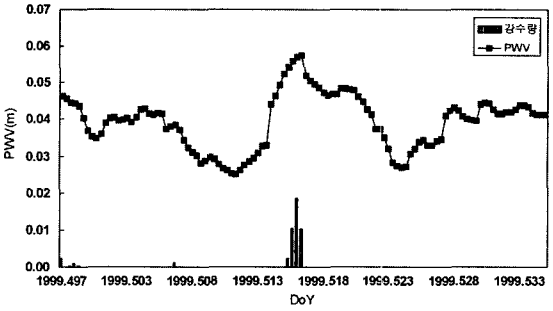

그림 3. 가강수량과 실제 강수량 비교(광주)

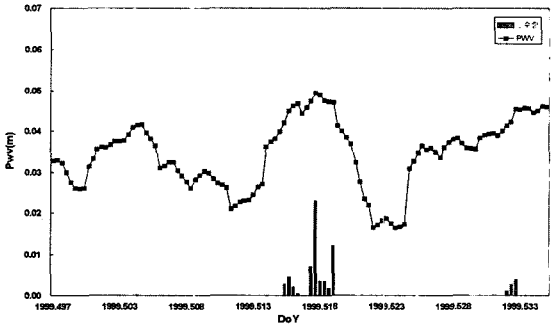

그림 4. 가강수량과 실제 강수량 비교(수원)

표 2. 최대 가강수량과 실제 강수량 비교(광주)

DoY	가강수량(m)	실제 강수량(m)
1999.5160	0.05690	0.0023
1999.5163	0.05746	0.0105
1999.5167	0.05193	0.0186
1999.5170	0.05057	0.0101

표 3. 최대 가강수량과 실제 강수량 비교(수원)

DoY	가강수량(m)	실제 강수량(m)
1999.5174	0.04736	0.0069
1999.5177	0.04933	0.0230
1999.5180	0.04902	0.0034

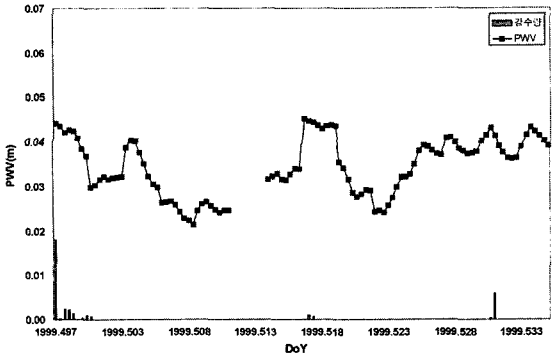

그림 5. 가강수량과 실제 강수량 비교(대구)

표 4. 최대 가강수량과 실제 강수량 비교(대구)

DoY	가강수량(m)	실제 강수량(m)
1999.4975	0.044210	0.0180
1999.4978	0.043514	0.0002
	⋮	
1999.5167	0.045070	0.0009
1999.5170	0.044610	0.0007

18 mm(가강수량 = 4.421 cm)이나 최대 가강수량(4.507 cm)은 7월 9일 03시에 기록되었으며 이 때의 실제 강수량은 0.9 mm였다. 이는 전체 한반도 지역의 대기내 수증기량이 7월 9일경에 많이 포함되어 있었으나 대구 지역에는 큰 강우를 내리지 않았음을 판별할 수 있다.

또한, 7월 8일과 9일간의 실제 강우량과 GPS에서 구한 가강수량에서 시간에 따른 이동이 보여지고 있다. 7월 8일 21시에 제주에서 먼저 최대 정점을 이룬 가강수량이 7월 8일 24시에 광주에서 최대 정점을 이루고 있으며, 7월 9일 12시에 수원에서 최대 정점을 보이는 것을 보아 비구름의 이동이 제주에서 한반도의 서쪽을 경유하여 북상하였다고 판단된다. 하지만 동일 기간내에 대구지역은 가강수량이 최대 정점을 이루고 있으나 실제 강수량은 거의 미흡하므로 구름의 크기가 한반도 전역에 걸쳐있지 않은 상태에서 이동을 했다고 판단된다.

4. Radio Sonde 가강수량과 GPS 강수량의 비교

4.1 Radio Sonde 데이터의 처리

기상청에서 사용하는 Radio Sonde 장비는 1,680 MHz 대의 주파수를 사용하는 것으로써 자동 추적 Radio-Theodolite를 사용하므로 기압센서의 정확도가 ±1 hPa로써 비교적 정확하고 악천후에도 관측이 가능하다. 측정고도는 약 35 km 정도이다.

이 데이터에는 각 측정 지점에 대한 번호와 기압, 고도, 온도, 노점온도, 풍향, 풍속등의 내용을 가지고 있다.[19]

Radio Sonde 데이터로부터 획득한 온도와 노점온도를 이용하여 다음의 Clausius-Clapeyron 방정식을 적분하여 얻은 다음 공식을 통해 상대습도를 얻을 수 있다.[2]

$$T - T_d = 4.25\times 10^{-4}\ TT_d\ (-\log U_w) \qquad (4\text{-}1)$$

여기서, T: 온도(K), T_d: 노점온도(K), U_w: 상대습도

또한, Magnus 공식을 이용하여 포화 수증기압을 구할 수 있다.

$$\log e_w = \frac{-2937.4}{T} - 4.9283\log T + 23.5470 \qquad (4\text{-}2)$$

여기서, e_w: 포화수증기압

상대습도는 포화수증기압과 실제 수증기압과의 비이므로 위에서 구한 상대습도와 포화수증기압을 이용하여 실제 수증기압을 산출할 수 있다.

Radio Sonde 데이터를 통해 가강수량을 산출하기 위해서는 비습도가 필요하다. 비습도(specific humidity)는 습윤공기 단위질량당의 수증기의 질량(g/kg)으로 정의되며 다음의 경험식으로 계산할 수 있다.

$$q = 622\frac{e}{(P_a - 0.378e)} \qquad (4\text{-}3)$$

여기서, q: 비습도, P_a: 대기압(milibars), e: 실제 수증기압

가강수량을 산출하기 위해서는 기층내에서의 평균압력과 층의 상부 및 하부면에서의 온도, 습도등의 측정에 의해 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$W_P = \sum 0.01 \cdot \bar{q} \cdot \Delta P_a \qquad (4\text{-}4)$$

여기서, W_P: 가강수량(mm)

ΔP_a: 층내의 대기압 변화량(milibars)

$\bar{q}$: 층의 상부면과 하부면에서의 비습도 평균값 (g/kg)

4.2 가강수량의 비교

본 연구에서는 연구지역중의 하나인 수원과 밀접한 지

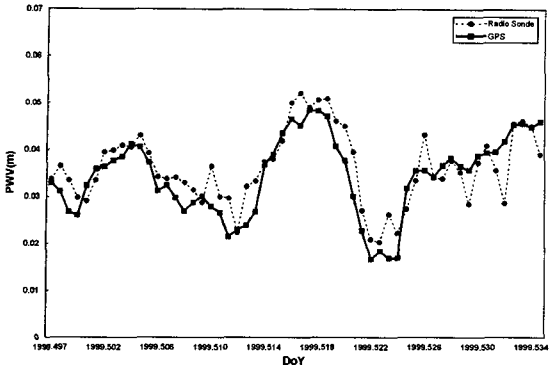

그림 6. 가강수량의 비교(수원)

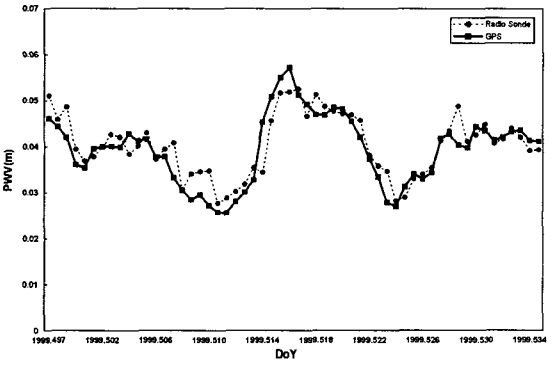

그림 7. 가강수량의 비교(광주)

역인 오산과 광주지역의 radio sonde데이터를 기상청에서 협조 받아 동일 연구기간동안 데이터를 처리하였다. Radio Sonde는 6시간에 한번씩 하루 4번 관측을 실시한다. 이를 통해 획득한 가강수량과 GPS 데이터를 처리하여 얻은 가강수량을 비교 · 검증하였다.

그림 6은 오산의 Radio Sonde 데이터에서 얻은 가강수량과 수원의 GPS 데이터에서 얻은 가강수량의 비교를 나타내며, 그림 7은 광주지역의 비교이다.

Radio Sonde에서 획득한 가강수량과 GPS를 통해 얻은 가강수량이 서로 일치하는 경향을 보이고 있다. 두 관측된 가강수량의 비교에 있어서 비교적 큰 차이를 보이는 경우는 GPS관측시간과 Radio Sonde 관측시간과의 정확한 시각 동기화(Time Synchronization)가 이루어지지 않아 발생된 차이일 가능성이 크며, 또한 Radio Sonde 관측시 순간적인 강수량의 급격한 증대로 인해 차이가 많은 가강수량이 산출되어 GPS를 통해 얻은 가강수량과의 차이일 가능성도 있다.

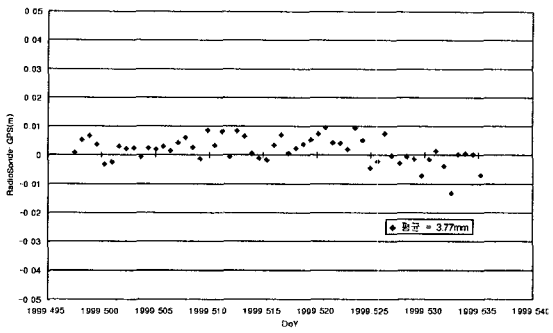

그림 8. 두 관측에서 얻은 가강수량의 차이(수원)

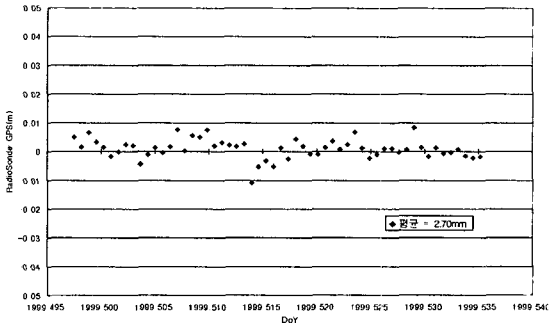

그림 9. 두 관측에서 얻은 가강수량의 차이(광주)

또한, 7월 8일과 9일간의 실제 강우량과 GPS에서 구한 가강수량으로부터 시간 진행에 따라 정점의 이동을 판별할 수 있다. 7월 8일 21시에 제주에서 먼저 최대 정점을 이룬 가강수량이 7월 8일 24시에 광주에서 최대 정점을 이루고 있으며, 7월 9일 12시에 수원에서 최대 정점을 보이는 것을 보아 비구름의 이동이 제주에서 한반도의 서쪽을 경유하여 북상을 했을 가능성을 예측할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 두 관측값을 비교한 통계결과이다. 이 두 관측값은 수원에서 평균 3.77 mm(표준편차 = ± 0.013 mm), 광주에서 2.70 mm(Std. = ± 0.0011 mm)의 차이를 보이고 있으며 거의 근사한 차이를 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 GPS상시관측소 제주, 광주, 수원, 대구의 관측데이터를 정밀해석프로그램을 이용하여 대류권에 대한 총 지연량을 계산하였다. 그리고, GPS상시관측소의 지역의 해당 기간별 기상자료를 이용하여 GPS를 이용한 가강수량을 산출하여 이 가강수량과 실제 강수량

을 비교하였다. 또한, Radio Sonde데이터를 이용하여 가강수량을 산출하여 GPS를 이용해 구한 가강수량과 비교・검증하였다. 그 결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) GPS데이터를 정밀 해석하여 대류권의 총 지연량을 산출한 결과를 바탕으로 기상데이터를 이용해 10^{-6}의 해석정밀도로써 가강수량을 산출할 수 있었다. 또한, 가강수량이 정점을 나타낼 때마다 실제 강수량이 발생하는 결과를 보였다. 이는 GPS를 통해 산출한 가강수량의 변화를 추이하면 실제 강수량의 발생정도를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

2) Radio Sonde데이터를 이용하여 가강수량을 산출하여 GPS데이터를 처리하여 얻은 가강수량과 비교・검증을 실시한 결과 수원에서 평균 3.77 mm(표준편차 = ± 0.013 mm), 광주에서 2.70 mm(Std. = ±0.0011 mm)의 차이를 보임을 알 수 있었으며, GPS를 통해 산출한 가강수량과 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

3) GPS를 통해 산출한 가강수량의 지역별 시간적 추이에 따라 가강수량의 변동을 파악할 수 있었으며, 앞으로 거의 실시간적인 가강수량의 산출이 이루어진다면 기존의 기상예보를 위한 모델과 더불어 수치모델의 한 자료로 활용되어 기상예보 향상을 할 수 있으리라고 사료된다.

4) 고가의 Radio Sonde를 이용하여 고층의 기상을 관측하지 않고도, 국내에서 운용중인 GPS상시관측소 데이터를 이용하여 기상변화에 크게 관계되는 수증기량을 산출할 수 있었다.

5) 여러 선형조합을 통해 소거된 오차원인들 이외에도 GPS궤도 전이에 의한 오차, 다중경로 오차등의 모델링과 함께 기상 관측장비들의 교정(calibration)등의 개선이 이루어진다면 더욱 정확한 가강수량을 산출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: R01-2001-000-00481-0)의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구로써 한국과학재단에 깊은 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

1. Awele Ndili, P. Enge, GPS Receiver Autonomous Interference Detection, Presented at the 1998 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS '98, Palm Springs, California, April 1998.
2. Benge D. Scott, Development of a Low-Cost GPS-Based Time-Space-Positioning Information(TSPI) System, Naval Air Warfare Center Weapons Division(NAWCWPNS).
3. Boccolari M., S. Fazlagi C, L. Lombroso, P. Frontero, S. Pugnaghi, Precipitable water estimation in comparison between zenith total delays(ZTD) by radiosounding data and by gps data, 2001.
4. Fritz K. Brunner and Paul Tregoning, TROPOSPHERIC PROPAGATION EFFECTS IN GPS HEIGHT RESULTS.
5. Günter Seeber, Satellite Geodesy, Foundations, Methods, and Appications, Walter de Gruyter, Berlin・NewYork, 1993.
6. Hernández-Pajares M., J. M. Juan, J. Sanz, group of Astronomy and Geomatics, Universitat Polit cnica de Catalunya ; Real-time integrated water vapor determination using OTF, 2001.
7. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS Theory and Practice, Fourth edition, Springer-Verlag Wien NewYork, 1997.
8. Jayanta Kumar Ray, Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System, University of Calgary, Alberta, Cannada, 2000.
9. Kouba, J. and J. Popelar, MODERN GEODETIC REFERENCE FRAMES FOR PRECISE SATELLITE POSITIONING AND NAVIGATION, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Natural Resources Canada (NRCan), 1994.
10. Stephen M. I. ichten, Yoaz 13ar-Sever, Winy L. Bertiger, Michael Heflin, Kenneth Hurst, Ronald J. Muellerschosen, Sien-Chong Wu, Thomas, Yunck, and James Zumberge, GIPSY-OASIS: A HIGH PRECISION GPS DATA PROCESSING SYSTEM AND GENERAL SATELLITE ORBIT ANALYSIS TOOL, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109.
11. Torben Schüler, On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation, Ph.D dissertation, University of Bundeswehr Muchen, 2001.
12. URL, GPS Data Processing Issues, http://kreiz.unice.fr/magic/THEORY/data_processing.html.
13. URL, GPS Meteorology, The Use of Ground-Based GPS for Monitoring Tropospheric Wate Vapour, http://www.nottingham.ac.uk/iessg/isgres22.htm.
14. URL, MIT GPS and Geodynamics Group, http://www-gpsg.mit.edu/~katyq/plots_gpsdelay/.

15. URL, NOAA/FSL Ground-Based GPS Integrated Precipitable Water Vapor Demonstration Network(GPS-IPW), http://www-dd.fsi.noaa.gov/gps.html.
16. URL, Real Time Atmospheric Water Vapor from GPS using CORS and FSL sites, http://www.ae.utexas.edu/courses/ase389p_gps/projects99/whitlock/
17. URL, Remote Sensing of Water Vapor From GPS Receivers, http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gabor.html.
18. URL, WATER VAPOR in the CLIMATE SYSTEM Special Report. December 1995, http://www.agu.org/sci_soc/mockler.html.
19. URL, 기상청, http://www.kma.go.kr/kma15/2001.7/open1.htm.

(2002년 2월 5일 원고접수)