

GPS 관측 자료를 이용한 대기 수증기 연직 분포 추정

하지현* · 박관동

인하대학교 지리정보공학과

(2009년 7월 14일 접수; 2009년 9월 7일 승인)

Estimation of Water Vapor Vertical Profiles in the Atmosphere Using GPS Measurements

Jihyun Ha* and Kwan-Dong Park

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

(Manuscript received 14 July 2009; in final form 7 September 2009)

Abstract

Measurements of the three-dimensional water vapor distribution in the atmosphere are important for forecast and analysis of meteorological phenomenon. In this study, two Global Positioning System (GPS) campaign networks were installed in Jeju Island and Kangwon-do to construct the vertical water vapor profile solely based on GPS measurements. We implemented a layer model to get the wet refractivity profile and compared the result with radiosonde measurements. The result showed that the vertical profiles from GPS and radiosonde agree well. The bias, root-mean-square error (RMSE) and standard deviation of GPS wet refractivities compared with radiosonde measurements were in the range of 6.6~11.1 mm km⁻¹, 11.9~13.9 mm km⁻¹, and 4.3~12.3 mm km⁻¹, respectively.

Key words: three-dimensional water vapor distribution, wet refractivity, GPS, radiosonde

1. 서 론

최근 전 세계적으로 이상기후변화로 인한 자연재해가 사회적 문제로 대두되고 있으며 국내에도 집중호우 등으로 인한 피해가 발생함에 따라, 이에 대한 국민적 관심이 증가하고 있다. 기상청에서는 이러한 실정에 맞추어 수치예보(NWP, Numerical Weather Prediction) 모델의 성능개선, COMS(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite) 활용 방안 모색 등 기상현상에 보다 효율적으로 대처하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다.

수치예보 모델을 활용한 일기예보, 특히 강수예보

의 성능 향상을 위해서는 정밀 대기 관측을 통한 대기 수증기의 시공간적 분포 파악이 중요하다. 현재 국내에서는 주로 라디오존데(radiosonde), MWR(Microwave Radiometer), 그리고 원격탐사(remote sensing) 위성을 활용하여 대기 수증기 관측을 실시하고 있다. 라디오존데는 기구(balloon)에 온도, 습도 등의 기상 관측 센서를 장착하여 대기 중으로 띄워 올려 대기 상태를 관측하는 장비로, 관측 방법의 특성상 1회 관측 후 수거가 힘들며 따라서 운영 비용이 비교적 높은 편이다. 또한 국내의 경우 전국 7개 관측소(광주, 백령도, 속초, 오산, 제주, 포항, 흑산도)에서 하루 2~4회 관측을 실시하고 있어 시간해상도 및 공간해상도가 비교적 낮은 편이다. MWR은 23.8 GHz와 31.4 GHz 주파수 대역을 이용하여 지상의 관측 지점으로부터의 시선 및 연직 방향으로의 대기 상태를 관측하는 장비이다. MWR은 라디오존데와 달리 반영구적인 관측 장비이지만 고가이며, 강수 발생 등 관측 시점에서의 기후조건에 영향을 받는 단점이 있다. 국내의 경우 2개 관측소(구름

*Corresponding Author: Jihyun Ha, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea
Phone: +82-32-873-4310, fax: +82-32-863-1506
E-mail: gnsskorea@gmail.com

물리선도관측센터((구)대관령기상대), 고산기상대)에서 상시 관측을 실시하고 있어 공간해상도가 매우 낮은 편이다. 따라서 한반도 전역에 대한 대기 수증기 관측을 위하여 라디오존데 혹은 MWR만을 사용하기에는 시-공간해상도가 낮으며 타 기상 관측 장비와의 상호 보완 및 기술 융합이 필요하다.

원격탐사 위성은 중적외선 및 마이크로파 센서를 탑재한 위성에서 관측된 밝기온도를 이용하는 것으로 광범위한 지역에 대한 관측이 가능하여 전지구적인 규모의 수증기량 복원에 적합한 장비이다. 그러나 구름 등의 대기 상태에 영향을 많이 받아, 중적외선 센서의 경우 구름 하층에 대한 복원이 거의 불가능하며, 마이크로파 센서의 경우 해양지역에서만 자료를 얻을 수 있다.

이에 비해 GPS(Global Positioning System)는 대기 상태에 상관없이 상시 관측이 가능하며 설치 및 유지 비용이 비교적 적게 들고, 정확도 및 정밀도 측면에서도 우수한 것으로 알려져 있다(기상청, 2000). GPS 기반 기상정보는 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)을 기준으로 MWR과 1~2 mm, 라디오존데와 3~4 mm 수준의 정확도를 달성하는 것으로 알려져 있다(조정호 등, 2001; Nam *et al.*, 1996). 이에 따라 미국, 일본 등 관련 기술 선진국에서는 1980년대부터 GPS의 기상 관측 활용성에 주목하였으며, 현재 장·단기 기상변화 연구 및 기상현업 적용 등에 활용하고 있다. 국내에서는 2012년을 목표로 GPS 기상응용 현업화를 추진하고 있으며, 이를 위하여 기반 기술 조사 및 기술 검증을 위한 노력을 기울이고 있다. GPS 기반 대기 관측 정보는 NWP에 예보인자(predictor) 혹은 기후인자(climate factor)로서 자료동화되어 수치예보의 성능 개선에 활용될 수 있으며, 장·단기 강수예보 능력향상에 기여할 수 있다(Gutman and Benjamin, 2001; Ha *et al.*, 2003).

GPS 기반 대기 관측 정보에는 대표적으로 PWV와 습윤굴절률(wet refractivity)이 있다. PWV는 대기 중 단위체적당 존재하는 수증기량을 강우로 환산한 양으로 2차원적인 대기 수증기 분포를 알 수 있는 대표적인 물리량이다. 습윤굴절률은 대기 수증기에 의해 GPS 신호경로가 단위 km당 굴절되는 정도를 나타내는 수치로 3차원 수증기 분포를 나타내는 물리량이다.

GPS 기반의 3차원 수증기 분포 추정 연구는 Flores *et al.*(2000)에 의해 본격적으로 시도되었다. Flores *et al.*(2000)은 미국 하와이 40 km² 지역을 대상으로 관측소 상공을 가로 × 세로 × 높이 4 × 4 × 40개의 voxel

(volume pixel)로 나누어 습윤굴절률을 산출하였으며, 이를 ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecasts) 수치예보 분석결과와 비교함으로써 GPS 기반 수증기 분포 모니터링에 대한 가능성을 확인하였다. 이후 Gandinarsky and Jalemark(2002)은 GPS 기반 습윤굴절률 정확도 향상을 위하여 칼만 필터 개선 연구를 진행하였으며, Skone and Shrestha(2003)은 관측소 상공을 여러 개의 층(layer)으로 나눈 후 칼만 필터를 적용하여 각 층에 대한 습윤굴절률을 추정하는 기법을 제안하였다. 반면 국내에서는 관련 연구가 2차원 GPS 기반 수증기 분포 추정 및 정확도 검증, 수치예보 자료동화 연구에 집중되어 있으며(조정호 등, 2001; 하지현 등, 2006; Ha *et al.*, 2003), 3차원 수증기 분포 복원의 전단계인 시선 방향 습윤지연량(SWD, Slant Wet Delay) 산출 및 정확도 향상을 위한 연구(하지현 등, 2005)가 유일한 실정이다. 이 논문에서는 국내에서 수집된 GPS 관측 자료를 이용하여 대기 수증기의 연직 분포도를 복원하고 라디오존데 관측 자료와 비교하였다. 먼저 GPS와 라디오존데 관측 자료를 이용한 습윤굴절률 산출 방법을 설명한 후, GPS 기반 수증기 연직 분포 복원 결과와 라디오존데 관측 자료와의 비교 결과를 기술한다.

2. 습윤굴절률 산출 방법

2.1 GPS 습윤굴절률

GPS 기반 3차원 수증기 분포를 산출하기 위해서는 GPS 위성으로부터 지상의 GPS 수신기까지의 신호 경로 상에 존재하는 수증기로 인한 GPS 신호지연량, 즉 SWD를 기반으로 고도 별 습윤굴절률을 추정해야 한다. SWD와 습윤굴절률의 관계는 식 (1)과 같으며, 이와 같이 GPS 신호지연량을 이용하여 3차원 수증기 분포를 추정하는 방법을 GPS 토모그래피(tomography)라 한다.

$$SWD = 10^{-6} \int N_w ds \quad (1)$$

식 (1)의 N_w 는 습윤굴절률, s 는 신호전달 경로를 의미한다. GPS 토모그래피는 대표적으로 voxel 기법과 layer 기법으로 구분된다. Voxel 기법은 관측소 상공 대기를 수 백에서 수 천 개의 voxel로 나눈 후 각 voxel에서의 습윤굴절률을 추정하는 방법이다. 그러므로 수직 및 수평 방향의 수증기 분포 변화를 조밀하게 모니터

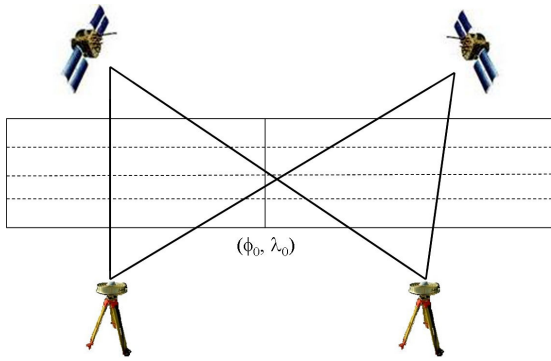


Fig. 1. Conceptual diagram of layer-based GPS tomography.

링 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 신호가 통과하지 않는 voxel이 존재할 경우 수증기량 추정에 어려움이 있으며 voxel의 수가 증가할수록 연산량이 증가하는 단점이 있다. Layer 기법은 Fig. 1과 같이 관측소 상공의 대기를 여러 개의 층으로 나누어 각 층에 대한 습윤 굴절률을 추정하는 방법이다.

Layer 기법은 관측소 상공을 voxel이 아닌 layer로 나눈다는 점을 제외하면 voxel 기법과 유사한 개념이지만, 비교적 단순한 형태인 layer를 사용함으로써 연산량이 줄어들어 신속한 자료 처리가 가능하다는 장점이 있다. 또한 관측소 상공을 고도 별로 나누어 해당 고도에 따른 확장계수(expansion coefficients)를 결정하고 이를 기반으로 위·경도 변화에 따른 굴절률을 추정함으로써, voxel 기법에 비해 적은 수의 관측 자료를 이용하여도 관측망 상공에 관한 습윤굴절률을 추정할 수 있다. Skone and Shrestha(2003)은 SWD를 식 (2)와 같이 관측소의 위·경도에 대한 함수로 표현하였다. Fig. 1의 (ϕ_0, λ_0) 는 GPS 관측망의 중심 위·경도를 의미한다.

$$SWD = \sum_{j=1}^n (a_{0,j} + a_{1,j}\Delta\phi_j + a_{2,j}\Delta\lambda_j + a_{3,j}\Delta\phi_j^2 + a_{4,j}\Delta\lambda_j^2 + a_{5,j}\Delta\phi_j\Delta\lambda_j) ds_j \quad (2)$$

식 (2)의 n 은 layer 개수이며, $a_{0-5,j}$ 는 j 층에서의 확장계수, $\Delta\phi_j$ 와 $\Delta\lambda_j$ 는 각각 $\Delta\phi_j = \phi_j - \phi_0$, $\Delta\lambda_j = \lambda_j - \lambda_0$ 이다.

한국의 경우 GPS는 1회 관측 시 보통 6~12개의 위성 신호를 동시에 수신한다. 따라서 1회 관측 자료만으로는 3차원 수증기 분포를 추정하기에 관측 자료의 양이 부족하여 정확한 결과를 산출하는데 어려움이 있

다. 따라서 1~2시간 단위로 관측 자료를 모아 평균습윤굴절률을 추정한다(Hirahara, 2000). 1~2시간 단위로 모아진 p 개의 SWD는 식 (3)과 같이 위·경도에 대한 설계행렬(design matrix) \mathbf{H}_k ($k = 1, 2, \dots, p$)와 확장계수에 대한 상벡터(state vector) \mathbf{x}_k 로 변환할 수 있다.

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k \quad (3)$$

식 (3)에서 상벡터 $\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}$ 이며, 여기서 $\Phi_{k,k-1}$ 는 상변환행렬(state transition matrix), \mathbf{w} 는 평균 0 mm km^{-1} , 분산 $1 \text{ mm}^2 \text{ km}^{-2}$ 을 따르는 백색잡음(white noise)을 의미한다. $\Phi_{k,k-1}$ 는 상변환에 있어 시간에 대한 상관관계가 있을 경우 1차 Gauss-Markov 과정을 따르며, 시간과 무관한 경우 단위행렬(identity matrix)로 가정한다. 이 논문에서는 상변환행렬을 단위행렬로 가정하고 수증기의 변화량을 시간의 흐름과 무관하도록 추정하였다. 따라서 식 (3)의 역행렬 연산에 의해 상벡터를 결정할 수 있으며, 칼만 필터를 적용하여 갱신하였다(하지현, 2009).

2.2 라디오존데 습윤굴절률

습윤굴절률은 식 (4)와 같이 수증기압과 온도의 함수로 나타낼 수 있다(Flores *et al.*, 2001).

$$N_w = (3.776 \times 10^5 e) / T \quad (4)$$

식 (4)의 e 는 수증기압이며, T 는 온도이다. 라디오존데 관측 자료는 고도에 따른 압력, 기온, 상대습도, 이슬점 온도 등의 관측 자료를 포함하고 있으므로 이를 이용하여 수증기압을 산출할 수 있다(하지현 등, 2006). 따라서 산출된 수증기압과 기온 관측 자료를 이용하면 라디오존데의 습윤굴절률을 추정할 수 있다.

3. GPS 습윤굴절률 산출 및 정확도 검증

3.1 GPS 관측 자료 수집

GPS 토모그래피를 위해서는 관측소의 고도가 고르게 분포된 관측망을 구성해야 하며, 각 관측소들은 GPS 수신 장비와 기상 관측 장비가 구비되어 있어야 한다. 또한 관측망은 연구 결과의 정확도 검증이 가능

하도록 연직 대기 관측 장비가 운영되는 지역을 포함하고 있어야 한다. 이 논문에서는 이러한 조건을 만족하는 제주도와 강원도 동해안 지역에 임시 운영(campaign) 형태의 GPS 임시관측망을 구성하였다(Fig. 2). 제주도와 강원도 동해안 지역은 해안 지역과 한라산, 대관령이라는 높은 산악지대를 포함하고 있어 비교적 좁은 공간에서 고도 별로 고른 관측 자료를 수집할 수 있다. 또한 라디오존데 관측소인 고산기상대와 속초기상대가 위치하고 있어 GPS 습윤굴절률에 대한 검증이 가능하다.

제주 임시관측망은 국토지리정보원 CHJU 관측소와 한국천문연구원 JEJU 관측소를 포함하여 영실과 고산기상대에 추가로 임시관측소를 설치함으로써 4개 관측소로 이루어진 관측망으로 구축하였다. CHJU 관측소는 제주지방기상청에 위치하고 있어 AWS(Automatic Weather Station) 기상 관측 자료를 이용할 수 있으며, JEJU 관측소는 GPS 장비와 함께 기상 센서인 MET3A가 동시 운영되고 있다. 영실 임시관측소에는 기상 센서와 GPS 장비를 모두 설치하였으며, 고산기상대는

GPS 장비만 추가로 설치하였다. 각 관측소의 좌표를 Table 1에 나타내었다. 이 논문에서는 영실 임시관측소를 YNSL, 고산기상대 임시관측소를 GOSN으로 명명한다. 제주 임시관측망은 2006년 10월 16일에서 18일까지 3일간 임시 운영하였다. 관측소 사이의 거리는 CHJU~GOSN 41.9 km, CHJU~YNSL 19.8 km, GOSN~YNSL 30.0 km, GOSN~JEJU 27.9 km, JEJU~YNSL은 6.0 km, 그리고 관측망 중심에서 라디오존데 관측소인 GOSN까지의 거리는 24 km이다. 제주 임시관측망의 면적은 355.7 km²이다.

강원 임시관측망은 속초기상대에 위치한 한국천문연구원의 SKCH 관측소를 포함하여 강원지방기상청과 구름물리선도관측센터에 추가로 GPS 장비를 설치함으로써 3개 관측소로 이루어진 관측망으로 구축하였다. 이 논문에서는 강원지방기상청 관측소를 KNRN, 구름물리선도관측센터 관측소를 TKRG로 명명하였다. 세 관측소의 좌표는 Table 1과 같다. 관측소 사이의 거리는 SKCH~TKRG 64.9 km, SKCH~KNRN 62.4 km, TKRG~KNRN 13.7 km이며, 관측망 중심에서 라

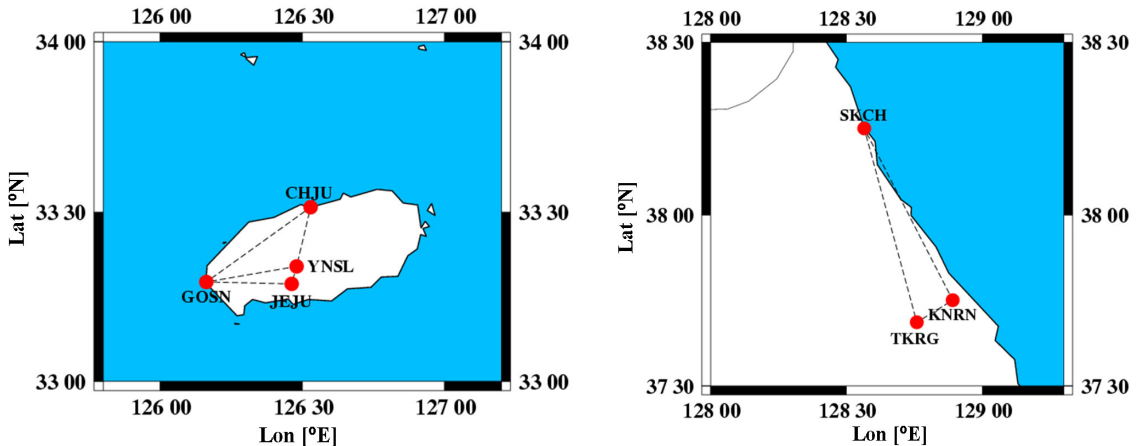


Fig. 2. Two GPS campaign networks in Jeju Island (left side) and Kangwon-do (right side).

Table 1. Positions of GPS sites of the two campaign networks in Jeju Island and Kangwon-do.

Network	Station	Lat [°N]	Lon [°E]	Ht [m]
Jeju Island	CHJU	33.514	126.529	48.140
	GOSN	33.294	126.163	110.431
	JEJU	33.288	126.462	431.226
	YNSL	33.340	126.481	1064.600
Kangwon-do	KNRN	37.751	128.891	55.418
	SKCH	38.251	128.565	47.062
	TKRG	37.687	128.759	874.056

디오존데 관측소인 SKCH까지 거리는 42.2 km이다. 강원 임시관측망의 면적은 425.8 km²이다. 강원 임시관측망은 2007년 7월 25일(DOY; Day of year 206)부터 9월 3일(DOY 246)까지 40일간 상시 관측을 실시하였다.

3.2 습윤굴절률 산출

일반적으로 GPS 기반 기상 정보는 30초 간격의 24시간 관측 자료와 정밀궤도력(precise orbits)를 이용한다. GPS 궤도력에는 정밀궤도력, 신속궤도력(rapid orbits), 초신속궤도력(ultra-rapid orbits), 그리고 방송궤도력(broadcast ephemerides)이 있으며, 이 논문에서는 정밀도 및 정확도 측면에서 가장 우수한 정밀궤도력을 사용하였다. 정밀궤도력은 관측일을 기준으로 2주 후 제공되며, 이를 이용할 경우 mm 수준의 정확한 자료 처리가 가능하다. 이 논문에서는 GPS 자료 처리를 위하여 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 고정밀 GPS 자료 처리 프로그램 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II, 이하 GIPSY라 칭함)를 이용하였으며, GIPSY에 최적화되어 있는 JPL 정밀궤도력을 사용하였다.

GPS 자료 처리시 SWD의 주요 오차요인인 안테나 위상중심 변동량(PCV, Phase Center Variations), 해양 조석하중에 의한 지각변동량(OTL, Ocean Tidal Loading displacements)을 보정하였다. PCV를 보정하기 위하여 상대보정(relative calibration) 기법(Mader, 1999)을 적용하였으며, OTL을 보정하기 위하여 GOT00 조석모델(박관동 등, 2007)을 적용하였다. 임계고도각은 10°로 처리하였으며, 방위각 방향으로의 수증기 분포 변동량(Azimuthal Gradients)을 보정하였다. 고정밀 GPS 자료 처리 결과로부터 SWD를 산출하기 위하여 선형적(a priori) 방법(하지현 등, 2005)을 적용하였다. 산출된 SWD는 1시간 간격으로 모아 습윤굴절률을 추정하였다. 습윤굴절률 산출을 위하여 비교적 적은 양의 관측 자료를 이용하여도 관측망 상공의 3차원 습윤굴절률 산출이 가능한 layer 기법을 적용하였으며, 고도 10 km 상공까지 500 m 간격으로 층을 나누어 습윤굴절률을 추정하였다.

Fig. 3(a)는 제주 임시관측망의 GOSN 관측소, Fig. 3(b)는 강원 임시관측망의 SKCH 관측소의 습윤굴절률 연직 분포 산출 결과로서, UTC(Universal Time Coordinated) 기준 2006년 10월 17일 00시와 2007년

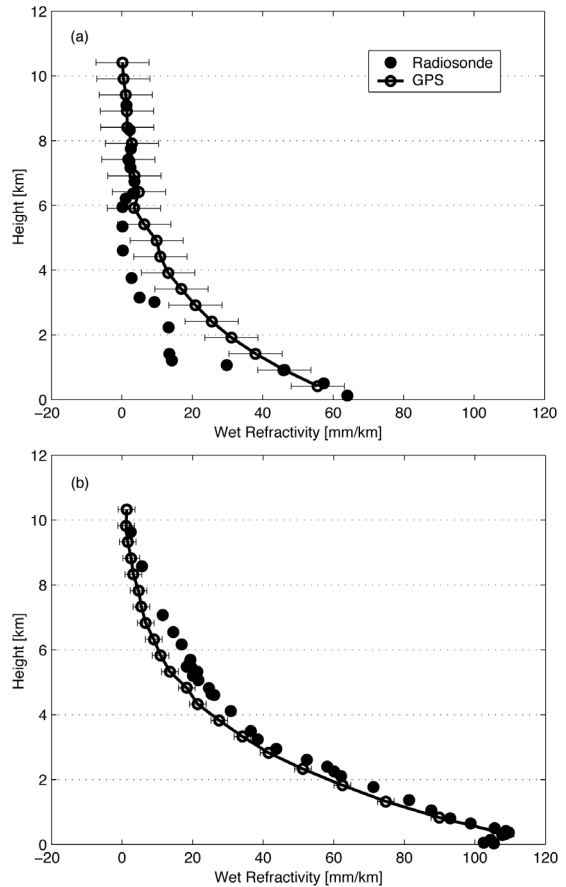


Fig. 3. GPS and radiosonde wet refractivities over (a) the GOSN GPS station on 17 October 2006 at 00h UTC and (b) the SKCH GPS permanent station on 10 August 2007 at 00h UTC.

8월 10일의 00시의 습윤굴절률이다. 가로축은 습윤굴절률로 mm km⁻¹ 단위로 나타내었으며, 세로축은 관측소 상공 고도로 km 단위로 나타내었다. Fig. 3의 빈 원(empty circle)과 채워진 원(solid circle)은 각각 GPS와 라디오존데를 이용한 습윤굴절률이다. GPS 습윤굴절률에 함께 나타낸 가로 직선은 GPS의 습윤굴절률의 1σ를 의미한다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)를 보면 GPS 습윤굴절률과 라디오존데 습윤굴절률은 고도가 상승할수록 감소하였으며, 이는 고도가 상승할수록 대기 중 수증기량이 감소함을 나타낸다. Fig. 3(a)의 경우 고도 6 km 이하에서는 두 장비의 습윤굴절률에 다소 차이가 있지만, 6 km 이상의 고도에서는 두 습윤굴절률이 거의 일치한다. 관측소 별로 변화 경향을 살펴보면, GOSN은 GPS

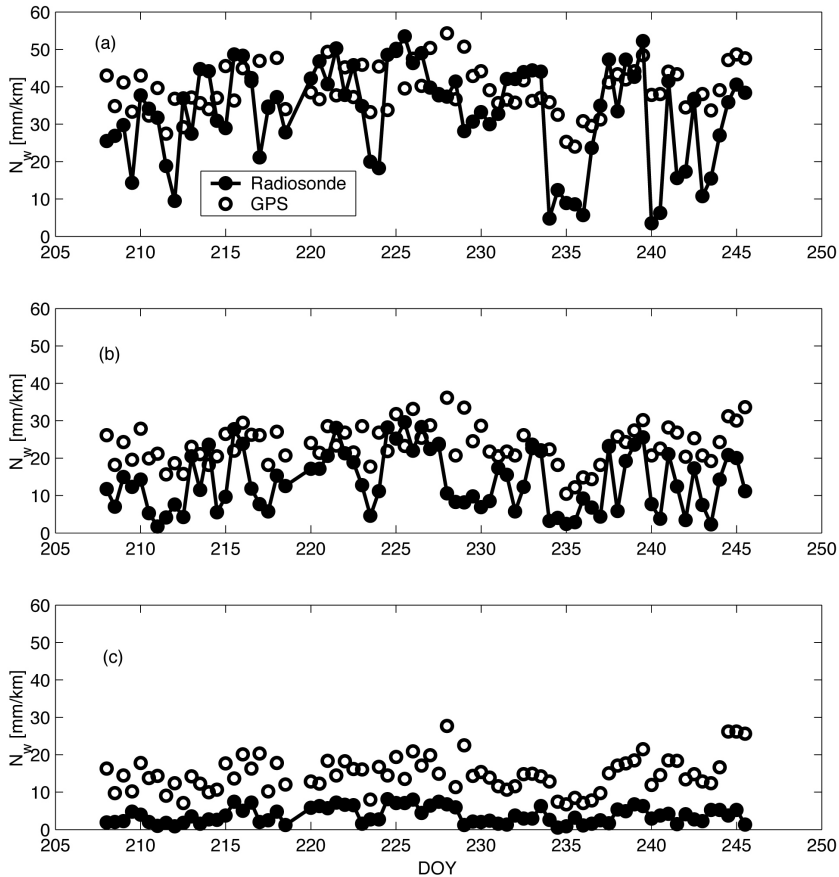


Fig. 4. Wet refractivity values at altitudes of (a) 3 km, (b) 5 km, and (c) 8 km over the SKCH GPS station from 26 July 2007 to 2 September 2007.

의 습윤굴절률이 라디오존데에 비해 큰 값으로 나타났으며, SKCH는 GPS의 습윤굴절률이 라디오존데에 비해 비교적 작은 값으로 나타났다. GPS 습윤굴절률의 편의(bias)는 GOSN의 경우 6.6 mm km^{-1} , SKCH의 경우 -5.2 mm km^{-1} 이다. 라디오존데 습윤굴절률을 참값으로 가정하고 GPS 습윤굴절률의 RMSE(root-mean-square error)와 표준편차(STD, standard deviation)를 산출한 결과 GOSN은 9.8 mm km^{-1} 와 7.3 mm km^{-1} 로 각각 나타났으며, SKCH는 5.7 mm km^{-1} 와 2.3 mm km^{-1} 로 각각 나타났다.

앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 GPS와 라디오존데는 PWV를 기준으로 3~4 mm의 오차가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 Fig. 3의 습윤굴절률에 대한 정확도 판단을 위하여 고도 별 습윤굴절률을 PWV로 복원하여 서로 비교하였다. PWV 산출 방법은 지면상 참고문헌으로 대체한다(하지현, 2009). 그 결과 GPS

PWV는 라디오존데 PWV를 기준으로 GOSN 5.3 mm, SKCH 3.0 mm의 오차가 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 3~4 mm의 오차와 유사한 수준으로, 이 논문에서 산출한 습윤굴절률의 정확도 역시 일반적으로 달성할 수 있는 정확도 수준인 것으로 미루어 판단할 수 있다.

다음으로 관측 기간이 한달 이상인 강원 임시관측소 관측 자료를 이용하여 GPS 습윤굴절률을 장기간 분석하였다(Fig. 4). 강원 임시관측망의 운영 기간인 40일 중 관측 장비를 설치한 날과 철수한 날, 즉 관측 첫째 날과 마지막 날을 제외한 38일간의 관측 자료를 이용하였다. Fig. 4의 가로축은 날짜(DOY), 세로축은 습윤굴절률이다. Fig. 4의 빈 원은 GPS 습윤굴절률, 채워진 원은 라디오존데 습윤굴절률을 의미하며, 라디오존데 관측 시간에 맞추어 UTC 기준 00시와 12시의 습윤굴절률을 나타내었다. Fig. 4(a)는 3 km 상공(layer #6), Fig. 4(b)는 5 km 상공(layer #10), 그리고 Fig. 4(c)

는 8 km 상공(layer #16)의 습윤굴절률이다.

Fig. 4를 보면 각 층에서의 습윤굴절률은 Fig. 3에서와 같이 고도가 상승함에 따라 크기가 감소하였다. GPS와 라디오존데의 습윤굴절률을 비교해 보면 고도가 상승함에 따라 라디오존데 습윤굴절률이 GPS 습윤굴절률에 비해 큰 값으로 나타난다. 이는 라디오존데의 경우 온도 및 습도 센서가 외부로 노출되어 있어 상층으로 이동할수록 태양 빛에 의한 건조 편의(dry bias)가 발생하여(Kwon *et al.*, 2007), 이로 인한 영향이 반영된 것이다.

GPS와 라디오존데 습윤굴절률의 변동 경향을 살펴보면, GPS 습윤굴절률은 라디오존데에 비해 서서히 감소하거나 증가하는 것으로 나타난다. Fig. 4(a)의 233일 12시와 234일 00시 사이를 보면, 라디오존데 습윤굴절률은 12시간 동안 39.3 mm km^{-1} 의 비교적 급격한 변화가 나타났으며, 이후 이를 동안 20 mm km^{-1} 이하의 습윤굴절률을 유지하다 다시 서서히 증가하는 경향을 보인다. 그러나 GPS 습윤굴절률의 경우 이러한 급격한 변화 경향을 민감하게 반영하지 못하고 있으며, 비교적 작은 폭으로 감소한 후 증가한 것을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b), 그리고 Fig. 4(c)의 습윤굴절률을 비교해 보면, 고도가 상승함에 따라 변동폭이 달라짐을 알 수 있다. GPS 습윤굴절률의 경우 3 km, 5 km, 8 km 상공에서 각각 $39 \pm 6.3 \text{ mm km}^{-1}$, $23.5 \pm 5.1 \text{ mm km}^{-1}$, $14.8 \pm 4.6 \text{ mm km}^{-1}$ 의 범위에서 변동하였으며, 라디오존데의 경우 $32.7 \pm 13.3 \text{ mm km}^{-1}$, 13.7 ± 8.0 , $3.8 \pm 2.2 \text{ mm km}^{-1}$ 의 범위에서 변동하였다. 즉, 3 km 상공에서는 GPS 습윤굴절률의 변동폭이 라디오존데 습윤굴절률에 비해 2배 가량 작으며, 5 km 상공에서는 비슷한 수준의 변동폭을, 그리고 8 km 상공에서는 GPS 습윤굴절률이 라디오존데 습윤굴절률에 비해 2배 가량 큰 변동폭을 나타내는 것이다. 이는 라디오존데의 경우 관측 방법의 특성상 기상 현상이 주로 일어나는 저고도에서 많은 영향을 받으며, 고도가 낮을수록 수증기량이 많아 이로 인한 시·공간적인 급격한 변화가 반영된 것으로 판단된다. Fig. 4의 GPS 습윤굴절률의 편의와 RMSE, 그리고 표준편차를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 편의와 RMSE, 그리고 표준편차는 라디오존데 습윤굴절률을 기준으로 산출한 것이다.

Table 2를 보면 GPS 습윤굴절률은 고도가 상승할수록 편의는 증가하는데 반해 RMSE와 STD는 감소하

Table 2. Statistics of GPS wet refractivity at altitudes of 3 km, 5 km, and 8 km in Fig. 4.

	3 km	5 km	8 km
Bias [mm km^{-1}]	6.6	9.8	11.1
RMSE [mm km^{-1}]	13.9	12.2	11.9
STD [mm km^{-1}]	12.3	7.3	4.3

는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 고도가 상승할수록 참값으로 가정한 라디오존데와 GPS 습윤굴절률 간 차이가 상대적으로 증가하고 변동폭은 감소하기 때문이다. Table 2에 나타낸 편의와 RMSE, 표준편차의 평균은 편의 9.2 mm km^{-1} , RMSE 12.7 mm km^{-1} , 그리고 표준편차는 8.0 mm km^{-1} 이다. 이는 GPS 습윤굴절률을 라디오존데 관측 자료와 비교한 선행 연구(Troller *et al.*, 2002)에서 나타난 편의 $-8.0 \sim 3.6 \text{ mm km}^{-1}$, RMSE $6 \sim 14 \text{ mm km}^{-1}$ 와 비슷한 크기의 편의와 RMSE를 달성한 것이다. 또한 앞서 살펴본 Fig. 3의 표준편차와 유사한 수준의 표준편차가 나타났다. 이러한 결과로 미루어 보아, Fig. 4에 나타낸 GPS 습윤굴절률은 가강수량으로 환산할 경우 일반적으로 나타나는 오차 수준($3 \sim 4 \text{ mm}$)을 달성함을 알 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 GPS를 활용하여 대기 중에 분포한 수증기의 연직 분포를 산출하였다. 이를 위하여 제주도과 강원도에 임시관측망을 구축하였으며, layer 기법을 적용하여 고도 500 m 간격으로 10 km 상공까지 습윤굴절률을 산출하였다. GPS 습윤굴절률의 정확도 검증을 위하여 고산기상대와 속초기상대의 라디오존데 관측 자료와 비교하였다. 그 결과 GPS와 라디오존데 습윤굴절률은 고도에 따라 유사한 경향을 보였다. 한달 이상 관측이 이루어진 강원 임시관측망 관측 자료를 이용하여 고도에 따른 습윤굴절률을 분석하였다. 그 결과 고도가 상승함에 따라 GPS 습윤굴절률이 라디오존데에 비해 크게 나타났으며, 평균 9.2 mm km^{-1} 의 편의가 나타났다. 이는 라디오존데의 경우 고도가 상승함에 따라 건조편의가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 GPS 습윤굴절률의 경우 라디오존데에 비해 서서히 증가하거나 감소하는 경향을 보임으로써 급격하게 변동하는 수증기 분포를 민감하게 반영하는데 다소 어려움이 있음을 알 수 있었다. 라디오존데 습윤굴절률에 대한 GPS 습윤굴절률의 RMSE는 평균

12.7 mm km⁻¹, 표준편차는 평균 8.0 mm km⁻¹로 나타났다. 이는 가강수량으로 환산할 경우 일반적으로 달성할 수 있는 3~4 mm 수준의 오차범위와 유사한 수준으로, 이 논문에서 달성한 결과의 정확도가 우수함을 알 수 있다. 이러한 결과는 라디오존데 관측 자료에 존재하는 건조편의를 고려하지 않은 것으로 이를 보정할 경우 더욱 높은 정확도를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2000: *GPS를 이용한 가강수량 측정기술 개발*. 한국 천문연구원·기상연구소 위탁연구보고서, 69 pp.
- 박관동, 원지혜, 김호균, 임관창, 2007: 해양조석하중에 의한 지각변위 분석, *한국우주과학회지*, **24**, 249-260.
- 조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙, 2001: GPS를 이용한 가강수량 측정 정밀도 검증. *한국기상학회지*, **37**, 557-565.
- 하지현, 박관동, 박필호, 박종욱, 2005: GPS를 이용한 대류층의 시선방향 습윤지연 계산관련 오차요인 분석. *한국기상학회지*, **41**, 337-346.
- 하지현, 박관동, 허복행, 2006: GPS 가강수량 결정을 위한 한국형 평균온도식 개발, *한국우주과학회지*, **23**, 373-384.
- 하지현, 2009: *준실시간3차원 수증기 분포도 결정을 위한 고정밀GPS 자료처리 전략*. 박사학위논문, 인하대학교, 162 pp.
- Flores, A., G. Ruffini, and A. Rius, 2000: 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays, *Ann. Geophys.*, **18**, 223-234.
- Flores, A., J. V. G. Arellano, L. Gardinarsky, and A. Rius, 2001: Tomography of the lower troposphere using a small dense network of GPS receivers, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 439-445.
- Gardinarsky, L., and P. Jarlemark, 2002: GPS Tomography using the permanent network in Göteborg: Simulations, *Proc. IEEE Positioning, Location and Navigation Symp.*, 128-133.
- Gutman, S. I., and S. G. Benjamin, 2001: The role of ground-based GPS meteorological observations in numerical weather prediction, *GPS Solutions*, **4**, 14-24.
- Ha, S.-Y., Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo, and G.-H. Lim, 2003: Variational assimilation of slant-path wet delay measurements from a hypothetical ground-based GPS network. Part I: Comparison with precipitable water assimilation, *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2635-2655.
- Hirahara, K., 2000: Local GPS tropospheric tomography, *Earth Planet Space*, **52**, 935-939.
- Kwon, H.-T., T. Iwabuchi, and G.-H. Lim, 2007: Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observation over the Korean peninsula, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 733-746.
- Mader, G. L., 1999: GPS antenna calibration at the national geodetic survey, *GPS Solutions*, **3**, 50-58.
- Nam, Y. S., D. Kuang, and B. E. Schutz, 1996: Comparison of GPS estimates of wet tropospheric delays with WVR measurements, *Proc. 9th Int. Tech. Meeting of the ION*, 827-834.
- Skone, S., and S. M. Shrestha, 2003: Strategies for 4-D regional modeling of water vapor using GPS, *Proc. ION National Tech. Meeting 2003*.
- Troller, M., B. Burki, M. Cocard, A. Geiger, and H.-G. Kahle, 2002: 3-D refractivity field from GPS double difference tomography, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2149-2152.