

GPS 신호의 대류권 지연정보 격자지도 생성과 상대측위 정확도 향상 평가

† 김두식 · 원지혜* · 손은성** · 박관동***

† ,*,** 인하대학교 대학원, *** 인하대학교 지리정보공학과 교수

Generation of Grid Maps of GPS Signal Delays in the Troposphere and Analysis of Relative Point Positioning Accuracy Enhancement

† *Dusik Kim · Jihye Won* · Eun-Seong Son** · Kwan-Dong Park****

† ,*,** *Graduate school of Inha University, Incheon 402-751, Korea*

*** *Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

요 약 : 대류권의 건조가스 및 수증기에 의한 GPS 신호의 지연은 GPS 측위 정확도를 저하시키는 주요 원인으로 정밀 측위를 위해서 반드시 소거해야할 대상이다. 이 논문에서는 실시간으로 대류권 지연정보를 생성하여 GPS 측위에 적용하기 앞서, 대류권 지연정보 생성 알고리즘의 가용성을 파악하기 위해 후처리 기반으로 전국의 GPS 상시관측망을 이용하여 한반도 상공의 대류권 지연량 격자 지도를 생성하는 과정을 구현하였다. GPS 자료처리 소프트웨어는 GIPSY 5.0을 사용하였고, 건조지연량과 습윤지연량을 구분하여 산출하기 위해 전국의 AWS 관측망의 관측자료를 이용하였다. 대류권 지연정보에 대한 격자 지도를 생성한 후 격자 지도의 정확도를 검증한 결과, 격자 지도와 GPS 관측소 위치에서 산출된 대류권 지연량의 RMSE는 ZHD 0.7mm, ZWD 7.5mm, ZTD 8.7mm로 나타났다. 산출된 대류권 지연정보를 단일주파수 기반 상대 측위 알고리즘에 적용하여 대류권 지연정보 보정시 측위정확도 향상 정도를 분석하였다. 결과로 측위정확도는 기선거리가 약 297km인 수원(SUWN)과 목포(MKPO)의 상대처리 결과에서 최대 36%가 향상됨을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : GPS, 대류권지연, 건조지연, 습윤지연, 격자지도

Abstract : GPS signal delay that caused by dry gases and water vapor in troposphere is a main error source of GPS point positioning and it must be eliminated for precise point positioning. In this paper, we implemented to generate tropospheric delay grid map over the Korean Peninsula based on post-processing method by using the GPS permanent station network in order to determine the availability of tropospheric delay generation algorithm. GIPSY 5.0 was used for GPS data process and nationwide AWS observation network was used to calculate the amount of dry delay and wet delay separately. As the result of grid map's accuracy analysis, the RMSE between grid map data and GPS site data was 0.7mm in ZHD, 7.6mm in ZWD and 8.5mm in ZTD. After grid map accuracy analysis, we applied the calculated tropospheric delay grid map to single frequency relative positioning algorithm and analyzed the positioning accuracy enhancement. As the result, positioning accuracy was improved up to 36% in case of relative positioning of Suwon(SUWN) and Mokpo(MKPO), that the baseline distance is about 297km.

Key words : GPS, ZTD, ZHD, ZWD, Grid Map

1. 서 론

오늘날 전지구측위시스템(Global Positioning System, GPS)은 항법, 측지, 측량, 계측, 기상 등 여러 분야에 걸쳐 활용되고 있다. 특히 항법분야에서 GPS는 기존의 항법장비에 비해 높은 정확도의 위치 파악이 가능하고, 이를 위한 인프라 구축비용 및 장비 단가가 상대적으로 저렴하기 때문에 육상 및 해양교통 부문에서의 차세대 항법 장비로 각광받고 있다. 이처럼 차량용 네비게이션과 스마트폰의 위치 측정 기능 등

로 널리 사용되고 있는 GPS의 측위정확도를 개선한다면 GPS의 활용분야에서 사용자에게 더욱 양질의 서비스를 제공할 수 있다. 특히 육상 및 해양교통 부문에서 GPS 측위정확도 향상은 향후 무인자동차 및 자동항법 등의 기술을 실생활에 적용하기 위해서 필수적인 요소가 될 것이다. 따라서 GPS를 이용한 측위에서 나타나는 주요 오차요인을 제거하여 측위정확도를 향상시키는 연구가 필요하다.

GPS를 이용한 측위에서는 위성으로부터 송출된 GPS 신호가 대기를 통과하면서 굴절되어 수신기에 도달하는 시간이 예

† 교신저자: 연희원, dskim@inha.edu 032)873-4310
* 연희원, jhwon1021@inha.edu 032)873-4310
** 연희원, h79s86@gmail.com 032)873-4310
*** 연희원, kdpark@inha.ac.kr 032)860-7604

정보보다 늦게 되는 대류권 지연 현상이 발생한다. 대류권 지연은 건조지연과 습윤지연으로 구분된다(Davis et al., 1985). 이 중 건조지연은 약 90%로 대류권 총 지연량의 대부분을 차지하지만 건조가스가 정역학적 평행상태에 있기 때문에 지상관측만으로도 정밀한 결정이 가능하다(Bevis et al., 1992). 반면, 습윤지연은 수증기의 시공간적 변화가 크기 때문에 지상관측만으로는 정확한 결정이 어렵다. 그러나 습윤지연량은 대류권 총 지연량의 약 10% 정도로 건조지연량에 비해 매우 작은 편이다. 대류권 지연에 의해 발생하는 측위 오차는 연직방향의 위성의 경우 약 2m, 저고도의 위성에서는 약 20m까지도 발생할 수 있다. 따라서 GPS 기반의 정밀측위를 위해서는 대류권 오차의 소거가 필요하다.

GPS의 대류권 지연량 추정에서는 보통 GPS 관측소로부터 각각의 GPS 위성까지의 시선방향의 대류권 지연을 연직방향으로 환산하여 연직방향 건조지연(Zenith Hydrostatic Delay, ZHD), 연직방향 습윤지연(Zenith Wet Delay, ZWD), 연직방향 총 지연(Zenith Total Delay, ZTD)으로 대류권 지연량을 표현한다. 이 중 ZHD는 Elgered et al.(1991)의 모델로 결정할 수 있고, ZWD는 선형적 방법을 이용하여 추정할 수 있다(Hopfield, 1969).

유럽의 SCUTUM(SeCUring the EU GNSS adopTion in the dangeroUs Material transport) 프로젝트에서는 위험화물의 운송에 GNSS를 활용하여 위치추적을 할 수 있게 하는 시스템을 구축하고 있다(Sciarretta et al., 2011). 이 시스템에서는 GPS 대류권 지연량 보정을 위해 유럽의 GPS 상시관측소들로부터 산출된 대류권 지연값들을 이용하여 대류권 지연정보 격자 지도를 생성하여 사용자에게 대류권 지연정보를 제공하며, 사용자는 기저함수를 통해 사용자 위치에서의 대류권 지연정보를 획득하여 GPS 측위에 적용할 수 있다.

SCUTUM 프로젝트의 격자형 대류권 지연정보 제공방법을 응용하여 우리나라에서도 적용할 수 있다. 우리나라에는 현재 100여개의 GPS 상시관측소가 있고, 이 관측자료들의 실시간 전송이 가능할 경우 준실시간 자료처리를 통해 사용자에게 대류권 지연정보를 산출하여 제공할 수 있다. 다만 GPS 자료처리를 이용하여 산출되는 대류권 지연정보 중 건조지연량과 습윤지연량의 정량적 구분을 위해서는 기압과 기온에 대한 기상관측 자료가 필요하다. 우리나라 100여개의 GPS 상시관측소 중 GPS 전용 기상센서를 보유한 상시관측소는 10여개 관측소에 불과하다. 따라서 기상센서가 없는 GPS 상시관측소에서 대류권 지연정보를 산출하기 위해서는 주변 기상관측값의 보간을 통해 기상센서 관측값을 대체할 수 있다. 선행연구에서는 전국 GPS 상시관측망을 이용하여 가강수량(Precipitable Water Vapor, PWV)을 산출하기 위해 기상센서가 없는 GPS 상시관측소에 대하여 주변 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)의 기상 관측값을 보간하여 GPS 상시관측소 위치의 기상자료를 생성하는 방법이 고안되었다(김, 2011). 여기서 사용된 기상 관측 자료 보간법은 건조지연과 습윤지연의 산출에서도 이용될 수 있다.

따라서 이 연구는 앞서 기술한 선행연구들을 기반으로 우리나라의 GPS 상시관측망을 이용하여 전국에 대한 대류권 지연정보를 격자형으로 제공하고자 수행되었다. 이 연구의 최종 지향점은 대류권 지연정보의 실시간 제공과 그를 이용한 측위이지만, 이 논문에서는 일련의 과정에 대한 실시간 적용에 앞서 대류권 지연정보 격자지도 생성 알고리즘의 정확도를 평가하기 위해 후처리 기반으로 우리나라의 GPS 상시관측소에 대한 대류권 지연량을 산출하고 이를 이용하여 대류권 지연정보 격자 지도를 생성한 후 대류권 지연정보의 정확도 평가와 측위 알고리즘 적용 시 정확도 향상 평가를 수행한 결과에 대하여 분석하였다.

2. 대류권 지연정보 격자지도 생성방법

이 연구에서는 GIPSY 5.0을 기반으로 우리나라 71개의 GPS 상시관측소와 인근 AWS 관측자료료를 이용하여 대류권 지연정보 격자지도 생성하였다. 대류권 지연정보 격자지도 생성은 Fig. 1과 같은 순서로 진행하였다.

2.1 대류권 지연량 산출 알고리즘

대류권 지연은 대기 중에 존재하는 가스들에 의해 발생하는 건조지연과, 대기 수증기에 의해 발생하는 습윤지연으로 나뉜다. GPS 안테나 연직방향에 대한 대류권 지연량 ZTD는 식 (1)과 같이 건조지연(ZHD)과 습윤지연(ZWD)의 합으로 나타낼 수 있다.

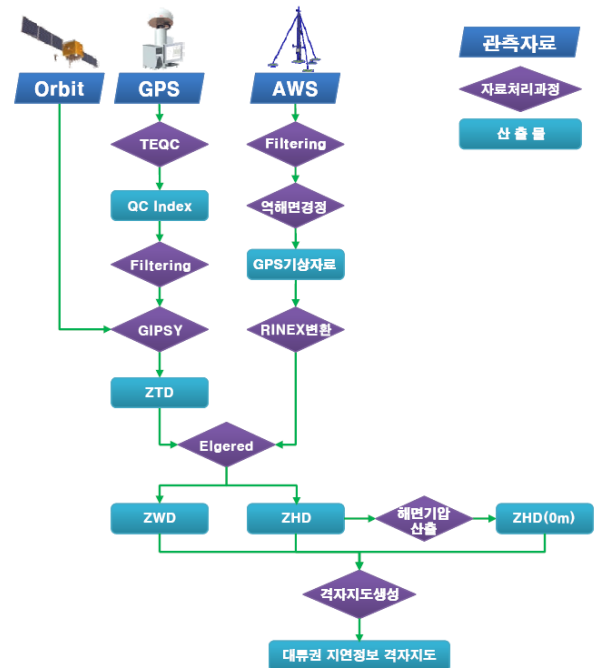


Fig. 1 Flowchart of GPS tropospheric delay grid map generation method

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

여기서 ZHD는 식 (2)를 이용하여 산출할 수 있다(Elgered et al., 1991).

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024) P_s}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028h} \quad (2)$$

여기서 P_s 는 관측소기압[hPa], ϕ 는 관측소 위도, h 는 관측소 타원체고[m]이다. 반면, 시공간적 변이가 심한 수증기의 경우 지상관측만으로 정확한 양을 추정하기 어렵기 때문에 선형적 방법을 사용해야 한다(Hopfield, 1969). 선형적 방법에 의한 ZTD는 선형적 건조지연량인 AHD(A priori Hydrostatic Delay)와 선형적 습윤지연량 AWD(A priori Wet Delay)의 합으로 식 (3)과 같다.

$$ZTD = AHD + AWD + ZDC \quad (3)$$

식 (3)에서 ZDC(Zenith Delay Correction)는 선형적 지연량에 대한 보정항으로 GPS 자료처리 과정에서 추정한다. 일반적으로 AWD는 0.1m를 사용하며, AHD는 식 (4)를 이용하여 산출한다(Webb and Zumberge, 1993).

$$AHD = 2.29951e^{-0.000116h} \quad (4)$$

여기서 h 는 관측소의 고도[km]를 의미한다. 식 (3)과 식(1)을 연립하면 식 (5)와 같이 연직방향 습윤지연량을 산출할 수 있다.

$$ZWD = [AHD + AWD + ZDC] - ZHD \quad (5)$$

2.2 GPS 관측소 기상정보 생성 방법

앞서 기술한 바와 같이 ZTD는 GPS 관측소의 기상자료가 없어도 GPS 자료처리를 통해 추정할 수 있다. 그러나 ZTD 중 ZHD와 ZWD의 정량적 구분을 위해서는 기상 관측 자료가 필요하다. GPS 전용 기상센서가 없는 관측소에서도 가강수량을 산출하기 위해서는 주변 기상관측 장비의 관측 자료를 보간하여 사용할 수 있다. 기상관측 자료의 보간법에는 역해면경정법(고도보간법)이 있다. 역해면경정법은 기상관측 장비에서 측정된 기압을 통해 해면기압을 산출한 뒤, 다시 GPS 관측소 고도의 기압으로 환산하는 방법으로 식 (6), (7)을 이용하여 GPS 관측소의 기압을 산출할 수 있다.

$$S_G = \exp \frac{g \cdot H_G}{287.04(273.15 + t_m) + \epsilon_m} - 1 \quad (6)$$

$$P_G = \frac{P_M}{1 + S_G} \quad (7)$$

식 (6)에서 S_G 는 GPS 관측소의 해면경정보정량[hPa], g 는 중력가속도[m/sec²], H_G 는 GPS 안테나까지의 해발고도[m], t_m 과 ϵ_m 은 각각 기온감률 보정값[°C]과 수증기영향 보정값[°C]을 나타낸다. 식 (7)은 GPS 관측소의 기압(P_G)을 산출하는 식으로, AWS의 해면기압(P_M)과 앞서 산출한 S_G 를 이용하여

결정할 수 있다(김, 2011).

이 연구에서는 GPS 관측소 기상정보를 생성하기 위해 Fig. 2와 같이 주변 AWS로부터 관측된 기압과 기온을 역해면경정법 및 고도보간법으로 GPS 상시관측소 고도의 기압과 기온으로 환산한 후 역거리가중법(Inverse Distance Weighting, IDW)을 사용하여 보간하였다(김, 2010).



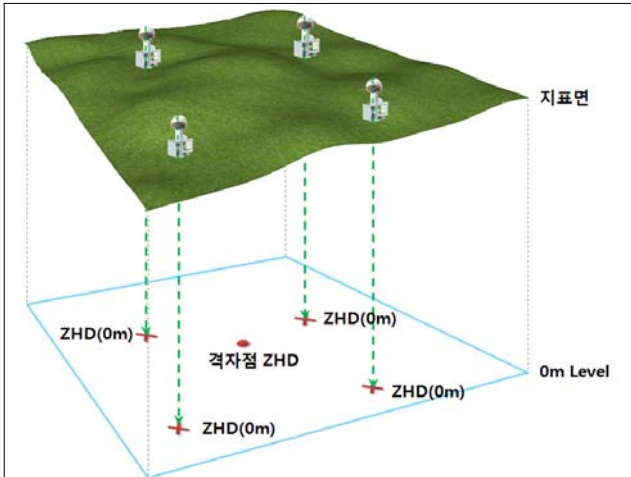
Fig. 2 Generation method of GPS meteorological data

2.3 GPS 대류권 지연량 산출과 격자지도 생성 방법

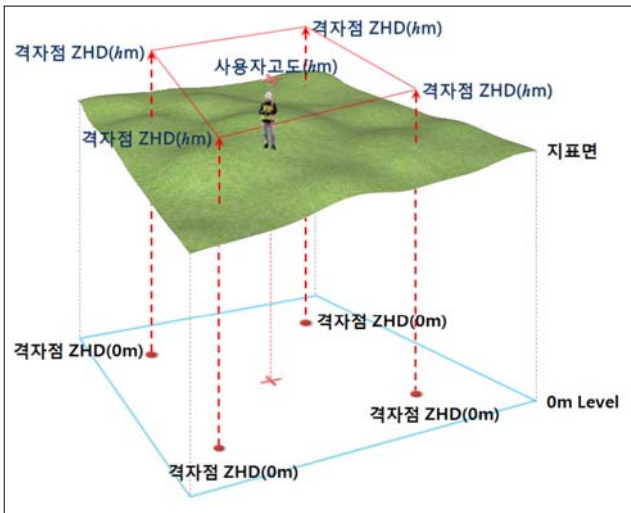
이 연구에서는 대류권 지연량을 지연 요소별로 구분하여 건조지연과 습윤지연에 대한 격자지도를 생성하였다. GPS 관측소들은 서로 동일한 고도에 위치하고 있지 않기 때문에 여러 개의 GPS 관측소에서 산출된 대류권 지연정보를 이용하여 격자지도를 만들 경우 격자지도의 산출 정확도가 저하될 수 있다. 따라서 서로 다른 관측소 고도에서 비롯되는 격자정보 산출 오차를 소거하기 위해서는 동일 고도에 대한 대류권 지연량 산출이 필요하다.

앞서 기술한 식 (2)의 ZHD 모델을 통해 GPS 관측소의 ZHD를 산출하기 위해서는 관측소의 위치정보(위도, 고도)와 기압이 필요하다. 따라서 ZHD의 경우 ZHD를 산출하려 하는 지점 인근의 기상관측 자료에 대한 역해면경정법을 통해 해당 지점 고도에서의 기압으로 환산하고, 환산된 기압과 위치정보를 입력하여 해당 지점의 ZHD를 산출할 수 있다. 그러므로 ZHD 격자지도를 생성할 때 사용되는 각 관측소 위치에서 수직적으로 동일한 고도를 가진 기준면에 대한 ZHD의 산출이 가능하다.

선행연구에서는 위험기상기간의 GPS 기반 가강수량을 결정하기 위해 전국의 GPS 관측소 위치에 대한 기상자료를 주변 AWS로부터 생성하였고, 산출된 기상자료를 이용하면 각 사이트마다 동일한 고도에서의 ZHD를 산출할 수 있다(김, 2011). 여기서 ZHD 격자를 산출하기 위한 기준면은 타원체고 0m로 선정하였다. 이 방법을 이용하여 ZHD 격자지도를 생성할 경우 Fig. 3과 같이 0m에서의 ZHD 값을 사용자에게 제공할 수 있고, 사용자의 입장에서는 GPS 측위시 주변 격자점에서 산출된 0m 고도의 ZHD로부터 사용자 위치 고도에서의 ZHD로 환산하여 이용할 수 있다. 여기서 사용자단 대류권 지연정보 획득 알고리즘은 기저함수를 사용한 방법을 적용하



(a) Calculation of ZHD at grid point 0m level



(b) Calculation of ZHD at user level

Fig. 3 Calculation of ZHD at grid point and user point

였다. 이 모델은 주변 4개의 격자점을 이용하여 원하는 지점으로 내삽하는 방법이다(Junkins et al., 2011).

GPS ZWD는 GPS 안테나 연직방향의 대기 수증기 양에 따라 달라진다. ZHD와 같이 ZWD에 대한 고도별 모델링이 이루어진다면 ZWD에 대한 좀 더 정확한 추정이 가능하겠지만 대기 수증기의 연직 분포는 균일한 경향을 나타내지 않고 시시각각 변화하며 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 모델링하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 ZHD의 경우 GPS 상시관측소에서 산출된 ZHD 값에 고도를 적용하여 격자지도 생성에 이용하였고, ZWD의 경우 관측소위치에서 산출된 값을 고도 보간 없이 격자지도 생성에 그대로 이용하였다. 일반적으로 습윤지연의 경우 전체 대류권 지연량의 약 10% 내외이기 때문에 대류권 총 지연량 산출의 오차에는 큰 영향이 미치지 않을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 대류권 지연량 산출 알고리즘의 검증을 위해서 후처리 기반의 관측소 대류권 지연량을 산출하였다.

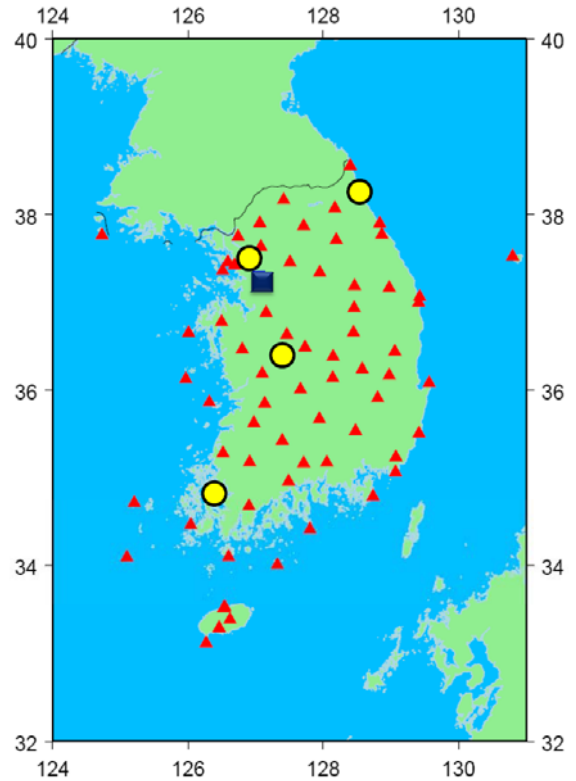


Fig. 4 Processed GPS permanent stations

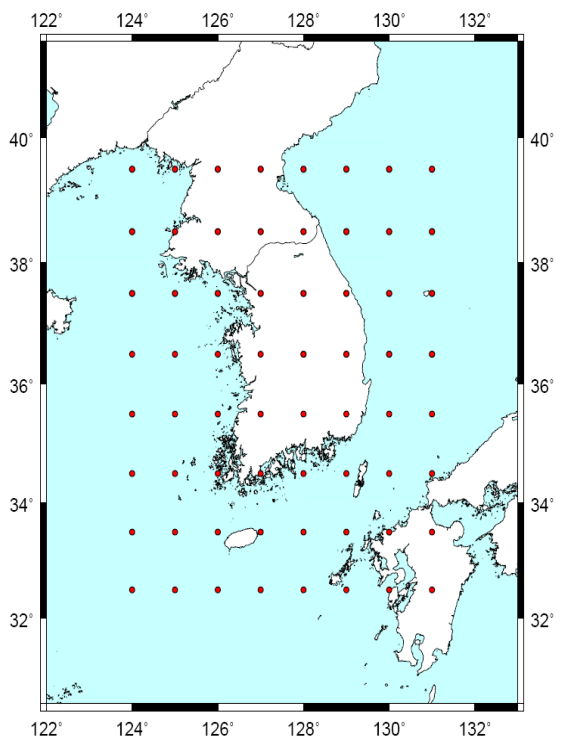


Fig. 5 Range of tropospheric delay grid map

GPS 자료처리 소프트웨어로는 GIPSY 5.0을 사용하였고, 사계절 중 대류권 지연량 변동이 상대적으로 심한 여름철의 자료처리를 수행하였다. 자료처리 날짜는 2007년 태풍 나리가

우리나라에 상륙한 후 소멸했던 9월 17일(DOY 260)이었고, Fig. 4와 같이 전국의 GPS 상시관측소 중 자료처리가 가능한 71개 관측소를 대상으로 수행하였다. GPS 전용 기상센서가 없는 GPS 상시관측소에서의 기상정보(기압, 기온)는 기상청에서 운영하고 있는 전국 AWS 관측망의 관측 자료를 보간하여 생성하였다. 이후 각각의 GPS 상시관측소의 ZHD, ZWD 그리고 0m에서의 ZHD를 산출하였다. Fig. 4에서 원은 대류권 지연정보 산출 정확도 검증 및 측위정확도 향상 정도 검증을 위해 선정된 지점으로 서울기상청(SKMA), 대전(DAEJ), 속초(SKCH), 목포(MKPO) 관측소를 나타낸다. 네모는 측위정확도 향상 정도 검증에서 사용된 기준국 수원(SUWN) 관측소를 나타낸다.

대류권 지연정보 격자지도는 위도 32.5~39.5°, 경도 124~131°까지의 범위로 1° 간격으로 8×8의 격자로 Fig. 5와 같이 구성하였다. 각각의 격자 값을 생성하기 위해서 IDW를 사용하여 근지점 3개에 대한 가중평균을 수행하였고 시간별로 모든 격자점에 대한 대류권 지연정보를 ZHD와 ZWD로 구분하여 산출하였다.

Fig. 6은 시간별로 산출한 ZHD, ZWD 격자정보 중 6시간 마다의 결과를 contour map으로 나타낸 결과이다. Fig. 6에서 위는 ZHD 격자정보를 이용하여 생성한 ZHD 지도를 나타내고 아래는 ZWD 격자정보를 이용하여 생성한 ZWD 지도를 나타낸다. Fig. 6의 대류권 지연 격자지도 산출 결과에서 건조지연의 경우, 대체적으로 한반도 북동쪽이 남서쪽에 비하여 건조지연량이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 동북지역의 기압이 남서쪽에 비해 상대적으로 컸었던 것으로 판단된다. 습윤지연의 경우, 서해상에서부터 시간이 지날수록 점점 동쪽으로 습윤지연량이 커지는 것을 확인할 수 있었고, 이는 태풍을 따라 서해상의 수증기가 내륙지방으로 유입된 것에서

비롯된 결과로 판단된다.

3. 대류권 지연정보 격자지도 정확도 검증

대류권 지연정보 격자지도에 대한 정확도를 확인하기 위해 정확도 검증대상 GPS 관측소에서의 GIPSY 자료처리 결과를 참값으로 보고(on-site), 격자지도로부터 검증대상 GPS 관측소 위치로 환산하여 보간한 결과(interpolated)를 비교하였다. 정확도 비교 결과로 RMSE(Root Mean Square Error)와 오차 평균을 Table 1과 같이 대류권 지연 요소별로 나타내었다. Table 1의 RMSE는 1시간 단위로 산출된 격자지도에서 GPS 관측소 위치로 환산한 각각의 대류권 지연정보와 GIPSY 자료처리결과를 비교하여 오차를 산출한 후 24시간에 대한 RMSE로 산출한 결과이다. 또한 Mean은 각각의 시간별 오차에 대한 평균을 나타낸다.

관측소별 RMSE는 ZHD의 경우 1mm내의 범위로 RMSE 평균이 0.7mm로 나타난 반면 ZWD의 경우 3.5~11.7mm의 범위로 RMSE 평균이 7.6mm로 건조지연에 비해 상대적으로 크게 나타났다. ZTD의 경우 4.6~10.8mm의 범위로 RMSE 평균이 8.5mm로 나타났다. RMSE를 전체 대류권 지연정보의 양과 비교하기 위해 전체 관측소의 평균값을 산출한 결과는 ZHD는 2299.7mm, ZWD는 258.4mm, ZTD는 2558.1mm로 나타났다. 산출된 전체 대류권 지연량에 비하여 격자지도의 오차는 ZHD 0.03%, ZWD 2.94%, ZTD 0.33%의 크기로 매우 미소한 양을 나타냈지만, 그 중에서도 습윤지연의 오차는 건조지연에 비해 상대적으로 다소 큰 오차를 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 습윤지연의 경우 건조지연과는 달리 고도에 따른 보간 과정이 생략되었기 때문이라고 판단되었다. 따라서 현재의 대류권 지연정보 격자지도 산출 방법으로 매우 정확한

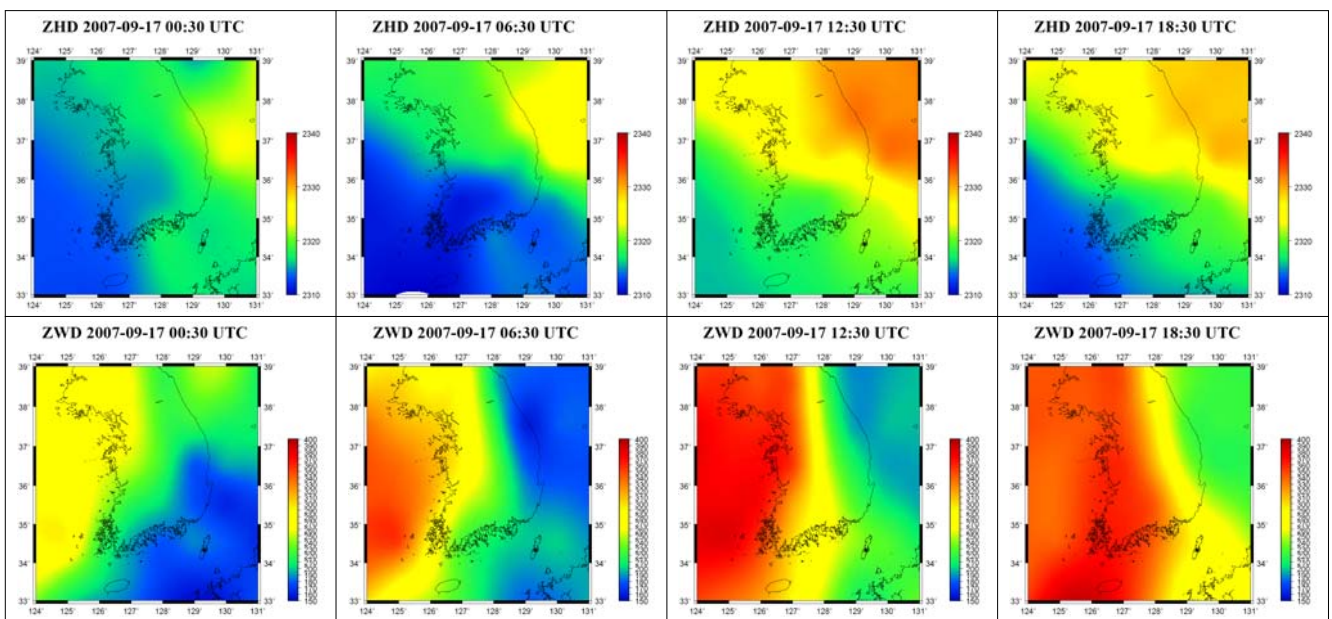


Fig. 6 Variation of tropospheric delay grid map (up: ZHD, down: ZWD)

대류권 지연량을 산출할 수 있지만 습윤지연에 의한 오차를 소거하기 위해서는 습윤지연에 대한 고도별 모델링이 필요한 것으로 판단된다.

Table 1 RMSE and mean error of tropospheric delay grid map(mm)

SITE	ZHD		ZWD		ZTD	
	RMSE	Mean	RMSE	Mean	RMSE	Mean
SKMA	1.0	0.5	3.5	1.2	4.6	1.7
DAEJ	1.0	0.9	11.7	-10.9	10.8	-10.0
SKCH	0.5	1.2	4.5	2.9	7.9	4.1
MKPO	0.4	-0.1	10.7	3.4	10.5	3.2
Mean	0.7	0.6	7.6	-0.9	8.5	-0.3

4. 대류권 지연량 적용과 측위정확도 변화 분석

마지막으로 앞서 산출된 대류권 지연정보 격자지도를 상대측위(relative positioning) 알고리즘에 적용하여 측위정확도가 얼마나 향상되는지를 분석하였다. 상대측위는 정확한 좌표를 알고 있는 기준국의 수신기 좌표를 기준으로 이동국의 수신기 좌표를 구하는 방법이다(Hofmann-Wellenhof et al., 2008). 상대측위 방법은 위성 및 수신기간의 차분을 통해 관측방정식 상의 공통된 GPS의 오차요소들을 소거할 수 있는 장점이 있다. 특히, 기준국과 이동국의 기선거리가 10km 이내일 경우 전리층 오차와 대류층 오차는 공통오차로 대부분 소거되는 특징이 있다(이, 2006).

GPS 측위에서 전리층, 대류권 오차에 대한 보정은 함께 적용될 경우 정확도가 높다. 일반적으로 대류권 오차는 전리층 오차에 비해 상대적으로 값이 작게 나타나기 때문에 전리층과 대류권 오차의 보정을 같이 수행할 경우 전리층 오차 보정의 효과로 인해 대류권 오차 보정의 효과를 확인하기 어렵다. 따라서 이 논문에서는 GPS 위성의 L1 신호만을 이용하여 구현한 상대측위 알고리즘(손은성, 2012)에 대류권 오차 보정만을 추가하여 측위정확도 분석을 수행하였다. 상대측위를 위해서 기준국으로 수원(SUWN) 관측소를 사용하였고 이동국으로 기상청(SKMA), 대전(DAEJ), 속초(SKCH), 목포(MKPO) 관측소를 사용하였다. 관측소별 위치는 Fig. 4에서의 네모(기준국)와 원(이동국)과 같고 수신기, 안테나에 대한 정보 및 좌표는 Table 2와 같이 기선거리가 짧은 순서로 나타내었다. 앞서 산출한 대류권 지연정보 격자지도는 1시간 단위로 산출하였으므로 스플라인(spline) 보간법으로 30초마다의 값을 산출하여 측위에 적용하였다.

대류권 지연정보에 의한 측위정확도 변화를 파악하기 위해 상대측위 후 대류권 오차를 보정하지 않은 결과와 보정한 결과를 비교하였고, 그 결과에 대한 3차원 RMSE와 표준편차 그리고 측위정확도 향상율을 Table 3과 같이 나타내었다. 또한 측위 결과에 대한 수평오차와 3차원 RMSE를 Fig. 7과 같

이 나타내었다. Table 3의 결과와 같이 대류권 지연정보를 보정하기 전에는 기선이 증가할수록 3차원 RMSE가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 GPS 상대측위에서 기선거리가 증가할수록 좌표 산출 정확도가 저하되는 것(김 등, 2011)에서 비롯된 결과로 판단된다. 대류권 지연정보 보정 후의 3차원 RMSE는 기선거리가 상대적으로 짧은 기상청, 대전 관측소에서는 향상되지 않았다. 그러나 기선거리가 상대적으로 긴 속초, 목포 관측소에서는 3차원 RMSE가 현저하게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 목포 관측소의 경우 3D RMSE 향상율이 36%에 달하는 것을 확인할 수 있었다. 기상청과 대전 관측소의 경우, 3D RMSE 향상율은 음수로 나타나 오히려 정확도가 저하된 것으로 보일 수도 있으나, Fig. 7의 수평오차 분석에서 대류권 오차를 보정하지 않은 결과에서 나타나는 오차들이 대류권 지연 보정 후에 참값에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Reference station and rovers of relative positioning

SITE	Receiver	Antenna	Latitude [°]	Longitude [°]	Height [m]	Baseline distance [km]
SUWN	Trimble NetRS	TRM 29659.00	37.28	127.05	83.85	-
SKMA	Trimble 4000SSI		37.49	126.92	61.70	27.04
DAEJ	Trimble NetRS		36.40	127.37	116.84	101.33
SKCH	Trimble		38.25	128.56	46.06	171.56
MKPO	4000SSI		34.82	126.38	64.38	297.45

Table 3 Result of relative positioning

SITE	Before Trop. delay correction(cm)		After Trop. delay correction(cm)		3D RMSE Imp.(%)
	3D RMSE	STD	3D RMSE	STD	
SKMA	39.34	22.52	42.29	23.50	-7.50
DAEJ	80.77	37.04	84.98	42.52	-5.21
SKCH	85.88	46.48	60.79	35.05	29.22
MKPO	141.76	64.14	89.94	47.26	36.55

따라서 기선거리가 상대적으로 짧은 기상청과 대전 관측소의 경우 대류권 보정에 의해 수평좌표 정확도를 일부 향상시킬 수는 있으나 전체 3차원 좌표 산출 결과에서의 정확도 향상은 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 짧은 기선에서 대류권 지연정보의 적용이 큰 효과를 나타내지 못하는 이유는 연구에 적용된 측위 알고리즘이 수원 관측소를 기준국으로 한 상대측위 방법이었기 때문에 기선 거리가 상대적으로 짧은 기상청과 대전의 경우 대류권 지연 오차가 공통오차로 소거되어 대류권 지연량 적용의 효과가 속초나 목포의 결과보다 저하되기 때문인 것으로 판단되었다. 기선거리가 상

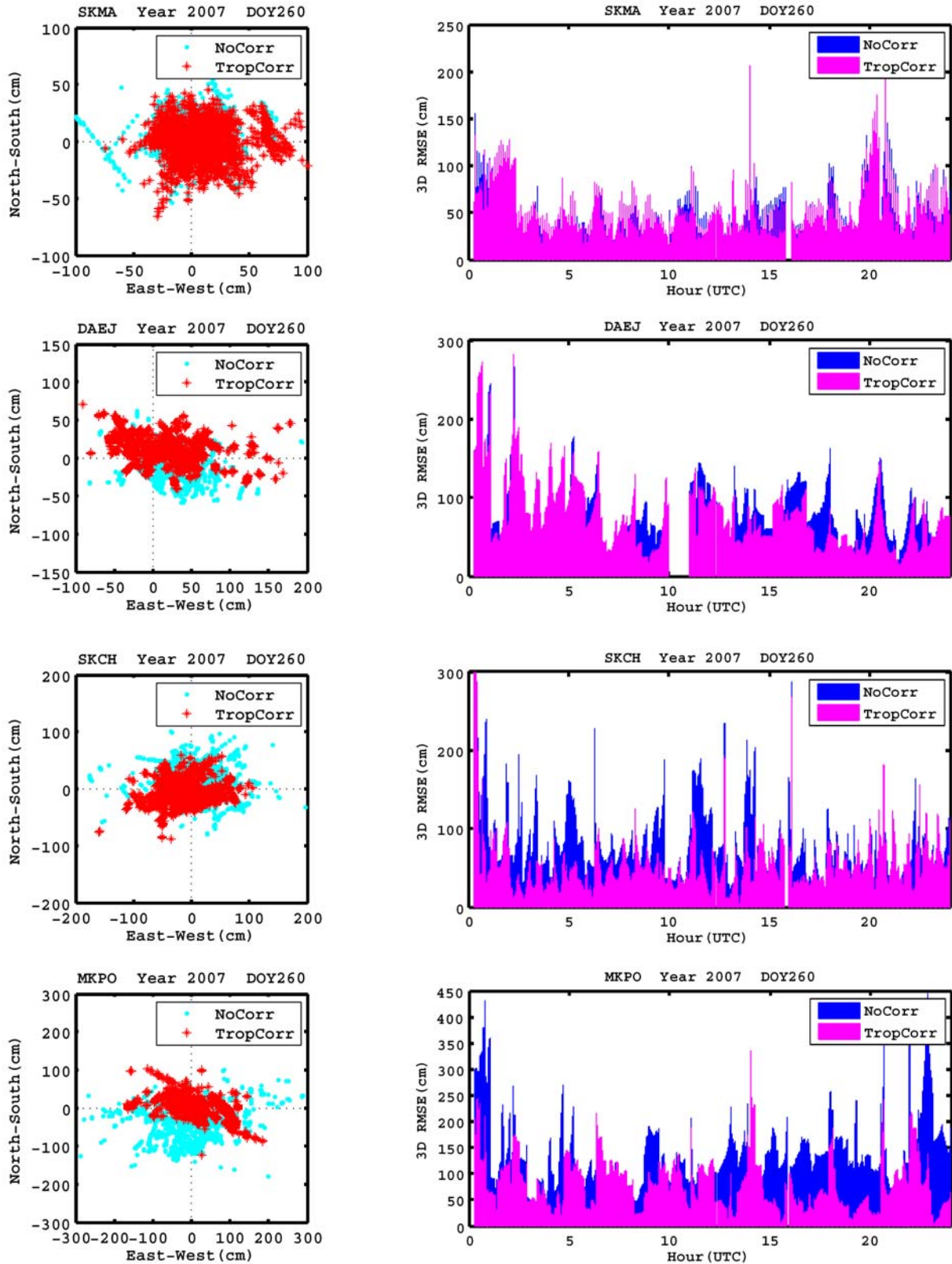


Fig. 7 Variation of relative positioning accuracy according to tropospheric delay application

대적으로 긴 속초와 목포의 3차원 RMSE 향상율에서 목포의 결과가 더 높은 향상율을 나타내는 것도 이와 같은 이유에서 비롯된 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 GPS 신호의 대류권 지연에 의한 오차를 제

거하여 측위정확도를 향상시키기 위해 실시간 격자형 대류권 지연정보를 산출하여 사용자에게 제공하는 체계를 후처리 기반으로 적용하였다. 전국의 GPS 상시관측소와 주변의 AWS를 이용하여 GPS 관측소 위치의 대류권 지연량을 건조지연부와 습윤지연부로 나누어 산출하였고, 건조지연의 경우 고도에 따른 보간을 통해 산출 정확도를 높이고자 하였다.

각각의 GPS 상시관측소에서 산출된 대류권 지연량을 역거리가중법으로 보간하여 격자 형태의 대류권 지연정보를 생성하였고, 대류권 지연정보의 사용자단 알고리즘을 통해 네 지점의 산출 정확도를 분석한 결과 ZTD RMSE 평균 8.5mm의 결과의 정확도를 나타냄을 확인하였다. 이 중 ZWD에 대한 오차는 ZHD에 비해 상대적으로 높게 나타났고, 습윤지연량의 산출 정확도를 향상시키기 위한 방안이 필요하다고 판단되었다.

측위정확도 향상 정도를 분석하기 위해 GPS L1 상대측위 알고리즘에 대류권 지연정보를 적용하여 대류권 오차를 보정한 결과, 기선거리 101km 이내의 관측소의 자료처리에서는 대류권 공통오차 소거로 효과가 크게 나타나지 않았으나 290km 이상 떨어진 목포 관측소의 자료처리의 경우 36%까지 측위정확도 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

따라서 이 논문에서 평가한 방법을 실시간으로 실제 GPS 측위에 적용할 경우 측위정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이 논문에서는 한반도 전체의 격자형 대류권 지연정보를 산출하기 위해 1° 간격의 격자를 적용하였지만 GPS 관측망을 조밀하게 구성하고 격자간격을 세분화 시킬 경우 더 높은 대류권 지연정보 산출 정확도를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 대류권 지연정보 격자지도의 산출 시간 간격을 세분화하고 습윤지연량에 대한 고도 보간 방안을 적용할 경우 더 높은 정확도의 대류권 지연정보를 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원(06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 김계현(2010), 공간분석, 문운당, pp. 187-202.
- [2] 김두식(2011), "AWS 기상자료 보간을 통한 GPS 가강수량 산출 및 정확도 검증", 석사학위논문, 인하대학교
- [3] 김두식, 이사형, 박관동, 이호석(2011), "GPS 상대측위에서의 관측시간과 기선거리에 따른 좌표정확도 분석", 지적, 제41권, 제1호, pp. 163-171.
- [4] 손은성, 원지혜, 박관동(2012), "중·장기선 GPS L1 상대측위에서 격자형 지역 전리층 모델 적용에 따른 측위 정확도 향상 평가", 한국측량학회지, 제30권, 제5호, pp. 459-466.
- [5] 이민석(2006), "무선인터넷과 RF모형을 혼합한 RTK-GPS측량 정확도 개선", 박사학위논문, 인하대학교
- [6] 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", Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. D14, pp. 15787-15801.
- [7] Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E. and Elgered, G.(1985), "Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length", Radio Science, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607.
- [8] Elgered, G., Davis J. L., Herring T. A. and Shapro, I. I.(1991), "Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay", Journal of Geophysical Research, Vol. 96, No. B4, pp. 6541-6555.
- [9] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E.(2008), GNSS:Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & More, Springer/WienNewYork, pp. 173-191.
- [10] Hopfield, H. S.(1969), "Two-quadratic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data", Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 18, pp. 4487-4499.
- [11] Junkins, J. L., Miller, G. W. and Jancaitis, J. R.(1973), "A Weighting Function Approach to Modelling of Irregular Surfaces", Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 11, pp. 1794-1803.
- [12] Sciarretta, C., Pacione, R., Pace, B., Iacovone, D.(2011), "GPS/EGNOS Tropospheric Corrections for Mobility Applications: The use of ZTD Maps within the SCUTUM Project", ENC-GNSS, London.
- [13] Webb, F. H. and Zumberge, J. F.(1993), An Introduction to the GIPSY/OASIS-II, JPL Publ., Pasadena, California, USA

원고접수일 : 2012년 08월 22일

심사완료일 : 2012년 12월 05일

원고채택일 : 2012년 12월 06일