

# GPS 기선해석에 의한 타원체고 추정에서 대류권 오차 보정기법이 정확도에 미치는 영향에 관한 실험적 분석

## Impact of Tropospheric Modeling Schemes into Accuracy of Estimated Ellipsoidal Heights by GPS Baseline Processing: Experimental Analysis and Results

이흥규<sup>1)</sup>  
Lee, Hungkyu

### Abstract

Impact of tropospheric correction techniques on accuracy of the GPS (Global Positioning System) derived ellipsoidal heights has been experimentally assessed in this paper. To this end, 247 baselines were constructed from a total of 88 CORS (Continuously Operating Reference Stations) in Korea. The GPS measurements for seven days, acquired from the so-called integrated GNSS (Global Navigation Satellite Systems) data center via internet connection, have been processed by two baseline processing software packages with an application of the empirical models, such as Hopfield, modified Hopfield and Saastamoinen, and the estimation techniques based on the DD (Double-Differenced) measurements and the PPP (Precise Point Positioning) technique; hence a total number of the baseline processed and tested was 8,645. Accuracy and precision of the estimated heights from the various correction schemes were analyzed about baseline lengths and height differences of the testing baselines. Details of these results are summarized with a view to hopefully providing an overall guideline of a suitable selection of the modeling scheme with respect to processing conditions, such as the baseline length and the height differences.

Keywords : GPS-leveling, Tropospheric Error, Ellipsoidal Height, Baseline Processing, Accuracy

### 초 록

본 논문에서는 GPS 높이측량의 정확도 제고 측면에서 대류권오차 보정방법이 기선해석을 통한 타원체고 추정 정확도와 정밀도에 미치는 영향을 실험적 방법에 의해 연구하였다. 이를 위해 국내 상시관측소 88점을 이용해 기선장과 표고차에 따라 247개 기선을 구성하고, GNSS 통합 데이터센터로부터 7일 분량의 관측 데이터를 취득한 후 2가지 기선해석 소프트웨어에 의해 Hopfield, 수정 Hopfield 그리고 Saastamoinen와 같은 경험식과 이중차분 및 정밀절대측위 대류권 오차 추정기법을 적용해 총 8,645개 실험기선을 처리하였다. 산정한 각 관측점 타원체고의 정확도와 정밀도를 오차 보정기법 따라 계산하고 기선장과 표고차와 같은 기선 구성 조건에 대해 분석하였다. 이를 통해 대류권오차 보정방식의 특징을 정확도와 정밀도 측면에서 고찰하고 GPS 높이측량의 기선해석에서 기선장과 표고차에 대해 적합한 대류권오차 모형화 기법선정을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

핵심어 : GPS 높이측량, 대류권오차, 타원체고, 기선해석, 정확도

Received 2018. 07. 11, Revised 2018. 08. 08, Accepted 2018. 08. 16

1) Member, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University (E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

GPS (Global Positioning System) 높이측량은 기선해석에 의해 추정된 관측 지점의 타원체고에 지오이드고를 차감하여 표고를 결정하는 간접수준측량이다. 레벨에 의한 직접수준측량과 비교할 때 GPS 높이측량의 특징은 관측점 시동이 불필요하기 때문에 신속한 관측이 가능함은 물론 거리에 따른 오차 증가율이 상대적으로 낮아 특히 장거리 관측에 유리하다는 것이다(Shin *et al.*, 2014). 따라서 이 방식은 수준노선 단절지역 연결 혹은 측량대상 지역 인근에 수준점이 위치하지 않는 경우 효과적으로 적용할 수 있으며, GPS 높이측량 실용화를 위해 국토지리정보원은 정밀도  $\pm 3.5\text{cm}$  수준의 국가지오이드모델(KNGeoid14)을 구축한 바 있다(Lee and Kwon, 2015).

GPS 높이측량에서 표고의 정확도는 타원체고와 지오이드고 정확도에 의존하기 때문에 적합한 GPS 관측방법의 적용 및 데이터 처리를 통한 타원체고 추정은 물론 최신 지오이드 모델의 적용이 필요하다. 가장 높은 정확도와 신뢰도를 갖는 GPS 높이측량에는 정지관측을 통해 위성 데이터를 취득한 후 기선해석과 망조정을 절차를 통해 타원체고를 결정한다(Shin *et al.*, 2014; Lee and Auh, 2016). 그러나 GPS 타원체고 추정 정확도는 수평성분에 비해 2~3배 낮은 것으로 알려져 있다(Seeber 2003; Leick *et al.*, 2015). 이것은 위성배치의 기하구조 특성으로 높이성분 기하강도가 상대적으로 낮으며, 관측오차 중 수신기 시계오차와 대류권 오차가 타원체고와 상관성이 높기 때문이다(Rothacher, 2002). 전자는 의사위성 설치에 의해 높이성분 기하강도 개선을 통해 일부 해결 가능하나, 이 기술은 상대적으로 낮은 측위 정확도를 필요로 하는 항법 및 이동측위 응용분야에 적합한 것으로 기준점측량에 적용하는 것은 현실성이 낮다(Lee *et al.*, 2005). 이에 반해 후자들 중 대류권 오차는 GPS 기선해석 단계에서 기선장 혹은 표고차와 같은 관측조건을 고려해 적절한 보정을 통해 개선할 수 있으며, 이를 지원하기 위해 기선해석 소프트웨어들은 다양한 오차보정 방식을 제공하고 있다. 그러나 기선해석에서 관측조건에 부합하지 않는 보정 기법이 적용되는 경우 특히 추정 타원체고에 편의(bias)가 발생할 우려가 있다(Hong, 2013).

앞서 언급한 GPS 높이측량의 특징을 고려하여 이 기술의 실용화를 위한 다양한 연구가 수행된 바 있다. Shin *et al.* (2014)은 기지점 표고에 KNGeoid13 모델의 지오이드고를 더해 얻어진 보정 타원체고에 대한 GPS 높이망 조정 성과의 정확도가 신뢰수준 95%에 대해 최대  $\pm 4\text{cm}$  수준이라 분석하였다. Lee *et al.* (2015)는 실시간 GNSS (Global Navigation Satellite Systems) 높이측량에서 통합기준점 표고성과를 이용한 지오이드의 지역

적 편의보정 방안을 제안하고 그 정확도를 고찰하였다. Lee and Auh (2016)는 기선장과 관측시간을 고려해 관측망을 구성·관측하고 기선해석과 망조정 절차에 의해 산출한 타원체고 정확도 분석하여 목표 정확도  $\pm 3\text{cm}$  확보 방안을 제시하였다. Jung *et al.* (2018)은 수준노선 단절구간에서 수행한 GNSS 수준측량 정확도를 기지점 배치, 관측기간, 지오이드모델 선택에 따라 분석한 후 2개 기지점을 포함해 1일 4시간씩 2일 관측 데이터에 의해  $\pm 3\text{cm}$  정확도 확보가 가능함을 확인하였다. 그러나 이들 사례들은 표고 정확도 최대화를 위한 관측기간과 관측망 구성 및 조정 방법을 연구한 것으로 GPS 대류권 오차 보정방식과 관련한 문제를 상세히 다루지 못하였다. Hong (2013)은 대류권 오차가 이중차분법을 이용한 GPS 측위에 미치는 영향을 분석하여 단기선일 지라도 상대적 표고차가 있는 경우는 오차를 무시할 수 없음을 강조 하였으나 관측조건에 적합한 방법을 제시하지 않았다.

본 논문은 GPS 높이측량의 기선해석에서 대류권 오차 보정 기법이 타원체고 정확도와 정밀도에 미치는 영향을 분석하여 관측 조건에 부합하는 보정방식 선정에 필요한 기초자료 제공하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 효율적으로 달성하기 위해 GPS 기선해석에서 대류권 오차와 정확도의 관계 그리고 보정방식을 이론적으로 고찰하고 실제 관측 데이터를 처리·분석하였다. 본 연구의 실험에서는 국내에 위치한 88개 GPS 상시 관측소 위치에 기초해 구성한 247개 기선을 대상으로 7일 관측 데이터를 3가지 대류권 오차 경험식과 2가지 추정기법을 적용해 기선해석을 수행하고 그 결과를 정확도와 정밀도 측면에서 분석 하였다.

## 2. GPS 기선해석에서 대류권 오차 영향과 보정기법

### 2.1 대류권 오차의 영향

GPS 대류권 오차는 위성신호가 지상에서 가까운 비산란성(non-dispersive) 매질인 중립 대기층을 통과할 때 발생하는 굴절로 인해 기하거리가 실제에 비해 길게 관측되는 현상이다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). GPS 상대측량에서 이 오차는 민감한 공간적 상관성으로 인해 기선장과 표고차가 증가할 때 기선해석 정확도에 미치는 영향이 커진다(Seeber, 2003). GPS 이중차분 관측 데이터를 이용해 미지점 좌표를 추정하는 기선해석에서 대류권 굴절에 의한 영향을 절대오차와 상대오차로 구분할 수 있다(Beutler *et al.*, 1988; Rothacher, 2002). 전자는 전리층 오차와 유사하게 2대 수신기가 취득한 위성신호의 전파경로가 상이하여 관측 데이터에 대한 차분에 의해 제거하

지 못해 잔존하는 오차이며, 이에 반해 후자는 관측점에서 서로 다른 대류권 매질 분포가 야기하는 신호전파 속도 차이에 따라 차분에 의해 축소하지 못하는 오차 성분이다.

Beutler *et al.* (1988)은 GPS 상대측위에서 대류권 오차를 절대와 상대적 편으로 구분하여 기선장과 타원체고 추정 오차 사이의 근사적 관계식을 유도하였다. 여기에 따르면 천정방향에 발생한 2.5m 절대오차가 기선장 추정에 미치는 영향은 1PPM (Part Per Million) 수준으로 제한적이나, 동일한 방향의 1cm 상대오차가 높이추정에 약 3cm 오차를 유발할 수 있다. 따라서 단 기선 GPS 관측 데이터 처리에서 이중차분 기법의 적용으로 절대오차 충분히 제거할 수 있지만, 관측점 사이 표고차가 상대적으로 크거나 상이한 기상요소로 인해 대류권 분포상태 차이가 큰 경우는 이중차분에 의한 상대오차 축소 한계로 타원체고 추정 정확도가 낮아질 우려가 있다.

## 2.2 대류권 오차의 보정

### 2.2.1 개요

대류권은 비산란성 매질로 전자파 굴절 특성이 주파수와 무관하기 때문에 GPS 다중주파수 관측 데이터 획득을 통해 해결이 불가능하다. 궁극적으로는 관측지점에서 기상요소 및 라디오미터에 의한 수증기량 관측에 의해 위성신호 전파경로에 따라 대류권 오차를 모형화해야 하나 이는 경제성 등을 고려할 때 현실적이지 못하다(Seeber, 2003). 이를 대신해 GPS 측량에서는 기선해석에서 표준 기상요소에 대해 경험식(empirical model)을 적용하거나 대류권 오차를 미수도로 추정하는 방식을 사용하는 것이 일반적이다.

### 2.2.2 경험식에 의한 보정

GPS 대류권 오차는 기상요소와 함수관계를 갖는 전자파 굴절지수(refractivity)로 이론적 모형화가 가능하나 신호전파 경로에 따른 측정의 어려움으로 기상 관측결과 등에 기초한 다양한 경험적 모형식들이 개발되었다. 이들 중 가장 대표적인 것들이 대부분의 기선해석 소프트웨어가 구현하고 있는 Hopfield와 Saastamoinen 계열의 경험식이다.

Hopfield (1969)는 전지구적 기상 관측자료를 기반으로 정수 평형조건을 적용해 천정방향 대류권 오차 보정식을 사상함수와 함께 제안하였다. 이를 위해 천정방향 굴절지수를 건조(dry)와 습윤(wet) 부분으로 구분해 표고( $h$ )를 변수로 하여 Eqs. (1) and (2)와 같이 나타내었다. 그러나 시간과 공간에 따른 수증기 분포에 주된 영향을 받는 습윤부분에 대한 모형화의 어려움으로 Eq. (2)에서와 같이 건조부분과 동일한 함수를 사용하기 때문에 정확도는 제한적일 수밖에 없다. Hopfield (1969)는 전자

파 굴절지수를 적분하여 사항함수와 함께 대류권 오차 보정식을 유도하였다.

$$N_d(h) = N_{d,0} \left\{ \frac{h_d - h}{h_d} \right\}^4 \quad (1)$$

$$N_w(h) = N_{w,0} \left\{ \frac{h_w - h}{h_w} \right\}^4 \quad (2)$$

where the subscript  $d$  and  $w$  represent the dry and the wet component, and  $N_{i,0}$  is the refractivity at the surface of the earth as a function of the partial pressure of water vapor, the temperature and the atmospheric pressure.

수정 Hopfield 모형식은 굴절지수와 표고 사이 함수인 Eqs. (1) and (2)를 Eq. (3)과 같이 기준타원체 중심에서부터 거리에 관한 함수로 나타낸 후 Eq. (4)를 적분하여 얻었다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). 이로 인해 적분방법에 따라 다양한 형태를 갖는 수식들이 존재한다. 습윤지연 오차는 건조부분과 동일한 방법으로 유도했으며, 여기서 Eqs. (3) and (4)의 지표상 굴절계수와 대류권 최상단까지 거리는 습윤부에 대해  $N_{w,0}$ 와  $r_w$ 를 사용하였다.

$$N_d(r) = N_{d,0} \left\{ \frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right\}^4 \quad (3)$$

where  $r_d$  and  $r$  is the length of position vector of the polytropic thickness for the dry component and an observation site respectively.

$$\delta T_d(z) = \frac{10^{-6} N_{d,0}}{(r_d - R_E)^4} \int_{R_E}^{r_d} \frac{r(r_d - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_E^2 \sin^2 z_0}} dr \quad (4)$$

Saastamoinen (1973)은 이상기체법칙 이론과 중력가속도를 높이에 대한 함수로 가정하여 대류권 오차 모형을 표준식과 정밀식으로 각각 유도하여 천정각 80°에 대한 최소 정확도 약 3.4cm와 함께 제시하였다. Hopfield와 Saastamoinen 모형을 비교할 때 그 차이는 전자는 기상 관측자료에 근거한 반면 후자는 이론적으로 유도했다는 것이다.

### 2.2.3 추정기법

GPS 정지측량의 기선장 혹은 표고차가 상대적으로 클 때 경

협식을 적용하더라도 모형의 습윤부분 불확실성으로 인해 충분한 정확도를 확보하는데 한계가 있다. 이중주파수 GPS 수신기에 의한 관측의 경우는 광·협폭 선형결합에 의해 미지정수를 결정된 후 무전리층 선형결합을 통해 미지점 3차원 좌표와 함께 대류권 오차를 추정할 수 있다. 이에 반해 단기선 관측에서는 선형결합 없이 이중차분 관측 데이터만으로 이 오차를 추정할 수 있으나, 차분을 통해 대류권 오차가 충분히 제거된 경우 추정기법을 적용하면 오히려 추정 좌표에 편이가 발생할 수 있다.

최근 기선해석 소프트웨어는 상대측위와 함께 PPP (Precise Point Positioning) 기능을 제공하고 있다. PPP는 별도의 기준국 설치가 필요 없으며, IGS (International GNSS Services) 제공 정밀궤도력과 위성 시계오차 모형 그리고 위성 및 지구 물리 현상을 보정한 후 무전리층 선형결합을 통해 3차원 좌표, 미지정수, 대류권 및 수신기 시계 오차를 동시에 추정하는 기술이다. 캐나다 NovAtel은 자사의 GNSS 고정밀 후처리 소프트웨어 GrafNet/Nav의 기선해석에 PPP 방식의 대류권 오차의 추정 기능을 통합 구현하였다(Waypoint, 2017). 이 기술은 PPP 엔진에 의해 기준국 대류권 오차를 추정된 후 미지점 관측 데이터에 적용해 기선을 처리한다.

### 3. GPS 타원체고 추정 실험 및 결과

#### 3.1 관측 데이터 및 방법

GPS 기선해석의 타원체고 추정 정확도와 정밀도에 대류권

오차 보정기법의 영향에 대한 실험적 고찰을 위해 GNSS 통합데이터센터(<http://gnssdata.or.kr>)로 부터 상시관측소 88점의 2018년 1월 15일부터 21일 까지 총 7일 동안의 관측 데이터를 확보하였다. Table 1과 같이 관측소 사이 거리에 대해 10km 이내, 약 15km, 약 20km, 약 30km 등을 기준으로 13 가지 실험의 경우(case)로 구분하여 기준에 부합하는 모든 기선을 구성하고자 했으며, 그 결과 총 247개가 되었다. 엄밀한 분석을 위해 각 실험 경우에 대해 동일 개수 기선을 포함하도록 하는 것이 바람직했으나, 위성기준점 분포 특성으로 인해 충분한 수의 단기선 구성에 어려움이 있었다.

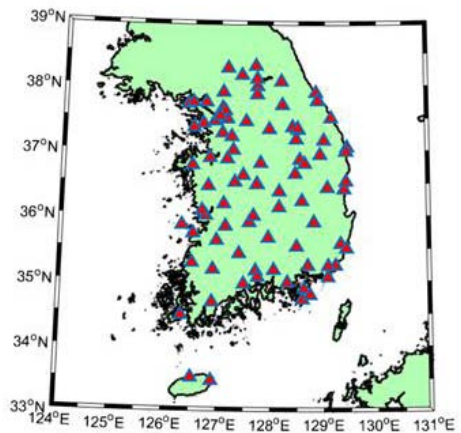


Fig. 1. Distribution of GPS stations used for the testing

Table 1. Testing cases and geometrical characteristics of their baselines

CASE	No. of Baselines	Baseline Lengths (km)			Ellipsoidal Height Differences (m)		
		Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum
1	13	7.8	12.4	0.8	59.5	468.6	0.7
2	11	13.7	15.3	12.5	69.8	217.1	9.4
3	14	19.5	23.9	16.5	106.3	545.5	1.9
4	16	31.2	34.8	26.6	67.5	251.6	0.4
5	35	39.8	44.7	35.5	67.4	274.3	1.1
6	31	49.4	54.6	45.1	108.2	420.2	1.0
7	31	59.7	64.8	55.1	85.4	388.0	1.3
8	19	69.8	74.6	65.2	107.6	298.6	10.4
9	13	78.9	84.1	75.2	50.7	137.5	5.2
10	18	89.8	94.6	85.0	114.3	403.2	3.4
11	14	101.4	106.7	95.3	99.3	485.3	5.2
12	18	119.7	125.6	115.5	117.2	506.0	2.8
13	14	151.7	161.2	145.3	139.4	493.8	6.9
Total	247	62.6	161.2	0.8	91.9	545.5	0.7



Fig. 2는 본 연구에서 사용한 GPS 기선해석과 결과 분석의 절차 및 방법을 나타낸 것이다. GNSS 통합데이터 센터는 관측 데이터와 함께 상대측위를 위해 관측점 측지좌표를 제공해야 한다. 그러나 일부 관측소의 좌표 혹은 안테나 설치 오프셋이 웹페이지에 누락되어 있으며, 고시좌표 또한 운영기관이 독립적으로 산정함으로써 정확도 평가를 위한 기준으로 사용하는데 무리가 있는 것으로 판단하였다. 이로 인해 본 연구에서는 Javad社의 고정밀 GNSS 데이터 처리 소프트웨어 GIODIS 버전 2.2에 의해 7일 관측 데이터의 처리와 망조정을 통해 실험 대상관측소 88점의 측지좌표를 재산정하였다. GIODIS는 약 2,000km 기선장에 대해서도 센티미터 수준 정확도로 기선해석이 가능한 측지측량용 초고정밀 소프트웨어임에 주목할 필요가 있다(Javad, 2011). 일간해 타원체고 정밀도는 ±1cm 내외 이었으며, 7일 결과에 대한 통합 조정으로 최종 기준좌표를 산정하여 정밀도는 그 이상일 것으로 기대된다. 특히 일간해 잔차가 3 이상이 되는 기선은 과대오차로 통합 망조정에 제외했으며, 2003년 세계측지계 도입에 사용된 국토지리정보원 위성기준점 중 이설점을 제외한 13점을 가중제약 하였다.

기선해석은 타원체고 정확도 평가 자체보다 본 연구의 목적인 대류권 오차 보정방법이 정확도에 미치는 영향 분석 측면에서 GNSS 통합데이터센터의 1일(24시간) 단위 데이터를 편집 없이 사용하였다. Leica LGO (Leica Geo Office) 버전 8.4와 Novatel GrafNet/Nav 버전 7.8을 실험 기선해석에 사용했으며, 전자는 Hopfiled(이하 HOP), 수정 Hopfield(이하 mHOP), Saastamoinen(이하 SAAS)을 포함하여 3가지 경험식과 이중차분 추정(이하 COMP) 방식을 그리고 후자는 정밀절대측위 기

법에 의한 추정·보정(이하 PPP) 기법을 적용하였다. 여기서 경험식에 의한 대류권 오차 보정량 계산에는 소프트웨어 고유의 표준 기상요소가 적용되었음에 주목할 필요가 있다. 결과적으로 실험에서는 5가지 보정기법을 적용해 247개 실험기선의 7일 관측 데이터를 사용해 총 8,645회 기선해석을 수행하였다. 이후 일별 추정한 7개 타원체고의 기준좌표에 대한 RMSE (Root Mean Square Error) 그리고 표준편차를 계산해 오차보정 방식에 따른 각 기선의 정확도와 정밀도를 결정하여 분석하였다.

### 3.2 결과분석

#### 3.2.1 보정기법 영향

GPS 대류권 오차 보정방식에 따른 타원체고 추정 정밀도의 특성을 살펴보기 위해 미지점 자체에 대한 것과 실험 경우들에 대한 통계를 Fig. 3에 도시하였다. 왼쪽 그래프는 각 기선에 대한 타원체고 추정 정밀도를 그리고 오른쪽 그래프는 각 실험 경우에 대해 계산한 정밀도 평균과 표준편차를 오차막대로 나타낸 것이다. 경험식을 적용한 결과는 경우 8의 mHOP를 제외하고는 매우 유사한 정밀도를 나타내며, PPP와 유사하게 기선장 증가에 따라 정밀도가 낮아지는 경향을 보인다. 그러나 PPP 정밀도 평균은 기선장 100km 이상에서는 오히려 감소하였다. 그림의 모든 결과를 고려할 때 정밀도 측면에서는 COMP를 적용한 결과가 가장 우수할 뿐만 아니라 기선장에 민감하지 않음을 알 수 있다.

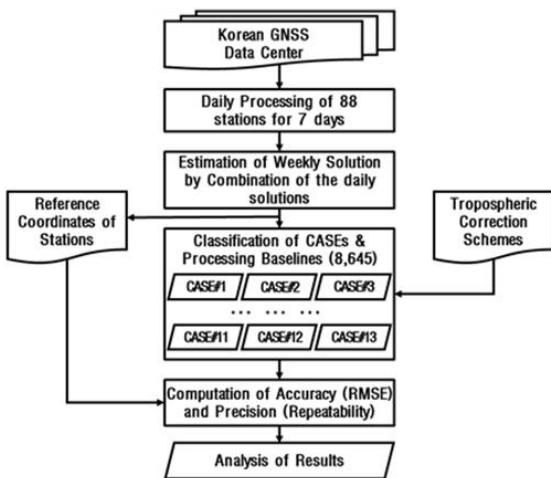


Fig. 2. A procedure of testing and analysis

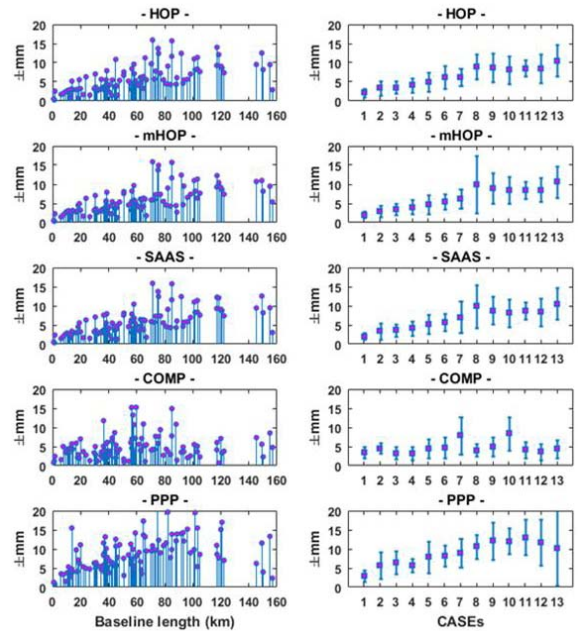


Fig. 3. Estimated height precision of all the baselines

Fig. 3과 동일한 방법으로 대류권 오차 보정방식에 따른 정확도를 Fig. 4에 나타 내었다. HOP와 SAAS의 타원체고 추정 정확도의 경향이 매우 유사 하다는 것에 주목할 필요가 있으며, 이는 표준 기상요소에 대한 대류권 오차 보정 효과는 두 식이 동일하다고 분석한 Wang and Li (2016)의 결과와 일치한다. mHOP의 정확도는 나머지 두 가지 모형식의 그것에 비해 상대적으로 낮아 국내에서도 경험식에 의한 대류권 오차 보정은 HOP 혹은 SAAS를 사용하는 것이 효과적임을 확인할 수 있다. HOP와 SAAS와 비교해 살펴보면 COMP에 의한 정확도는 단기선에서의 약 6~10cm 편의를 제외하면 평균적으로 높은 정확도로 타원체고를 결정할 수 있다는 것이 특징이다. 이와 같은 타원체고 편이는 표고차가 상대적으로 작은 기선에 대한 것으로 이후에 보다 자세히 논의할 것이다. 그림의 결과는 5가지 보정기법 중 COMP가 기선장 80km 이상일 때는 표고차와 무관하게 가장 정확히 타원체고를 산정했음을 보여준다. 한편 PPP는 기선장과 표고차 조건에 관계없이 약 2.5cm 수준의 일정한 정확도로 타원체고가 추정되었으며, 이는 기지점에서 독립적으로 오차를 추정해 보정한 PPP 보정기법의 원리를 통해 이해할 수 있다.

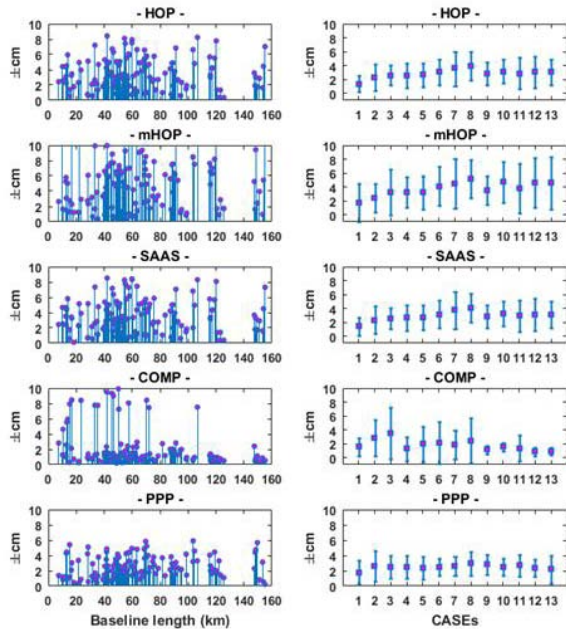


Fig. 4. Estimated height accuracy of all the baselines

### 3.2.2 기선장 영향

기선장에 따른 GPS 대류권 오차 보정방법이 정확도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 4의 결과들 중 표고차가 50m 이

하인 결과만을 Fig. 5에 나타내었다. 경험식을 적용한 타원체고 정확도가 동등해 졌다는 것과 PPP 결과는 Fig. 4와 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 기선해석의 모든 결과(Fig. 4)와 표고차 50m 이하의 그것들(Fig. 5)을 보다 상세하게 비교하기 위해 각 실험 경우에서의 RMSE 평균과 표준편차를 오차막대에 의해 Fig. 6로 표현하였다. 상대적 대류권 오차가 클 것으로 의심되는 기선의 제외로 전체적으로 정확도가 개선되었으며, 특히 경험식을 적용한 경우들에서 높은 정확도 증가율을 보였다. 이와 같은 결과는 관측점 사이 표고차가 GPS 기선해석의 잔존 대류권 오차(상대오차)와 매우 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다.

Table 2는 기선장을 기준으로 구분한 13가지 실험 경우들에서 표고차 50m 이하를 제외하여 재계산한 RMSE 평균과 표준편차를 정리한 것이다. 이 표를 Figs. 5 and 6과 함께 살펴보면 경우 3에 해당하는 기선장 약 20km 이하는 경험식에 의한 정확도가 나머지 추정기법을 적용한 것에 비해 우수한 것을 알 수 있다. 이는 표고차가 크지 않은 단기선에서는 이중차분을 통해 대류권 오차를 소거하였음에도 불구하고 COMP는 이 오차를 미지수로 별도 추정했기 때문이며, PPP는 기준국 대류권 오차 추정의 불확실성에 기인한 것으로 이해할 수 있다. 이러한 사실들을 종합할 때 GPS 높이측량의 기선해석에서 표고차가 약 50m 내외인 기선장 약 20km 이하인 경우 대류권 오차 추정기법에 의한 보정은 지양해야 할 것으로 판단된다.

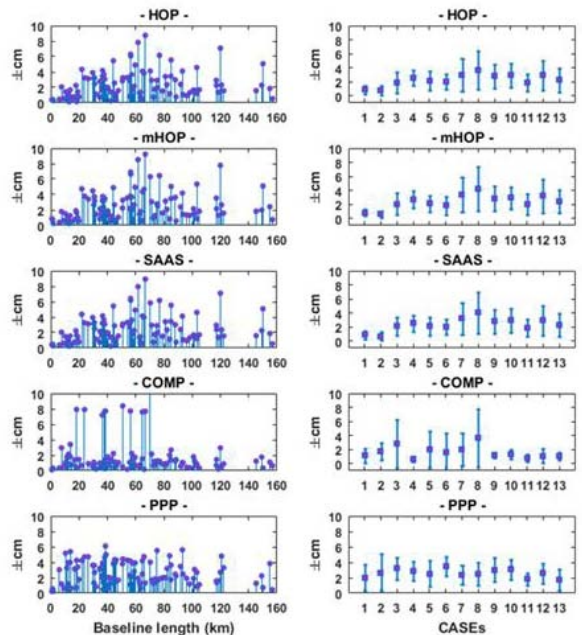


Fig. 5. Estimated height accuracy of the baselines of which height differences are less than 50 m

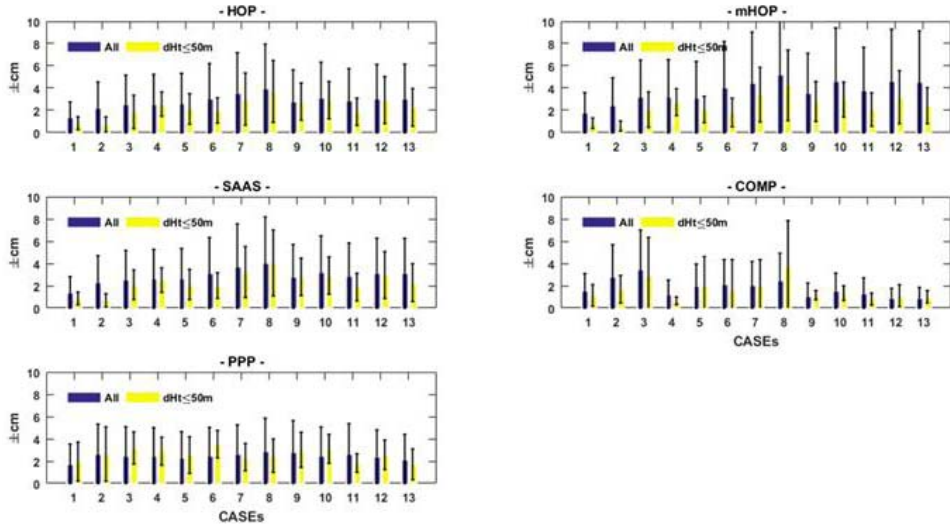


Fig. 6. Comparison of the estimated height accuracy between all the baselines and those height differences less than 50m

Table 2. Statistical summary of the estimated heights in which height differences are lower than 50m (unit: cm)

CASEs	Average of RMSE					Standard Deviation of RMSE					Remarks
	HOP	mHOP	SASS	COMP	PPP	HOP	mHOP	SASS	COMP	PPP	
1	0.9	0.8	0.9	1.1	2.0	0.6	0.5	0.6	1.0	1.8	Group A
2	0.7	0.6	0.7	1.7	2.6	0.7	0.5	0.6	1.2	2.4	
3	1.9	2.1	2.1	2.9	3.2	1.5	1.6	1.3	3.5	1.5	
4	2.6	2.7	2.5	0.6	2.9	1.1	1.2	1.1	0.3	1.3	Group B
5	2.1	2.1	2.1	2.0	2.5	1.4	1.2	1.4	2.6	1.6	
6	2.0	1.8	2.0	1.6	3.5	1.1	1.3	1.2	2.8	1.2	
7	3.0	3.4	3.2	2.0	2.3	2.3	2.5	2.3	2.4	1.2	
8	3.7	4.3	4.0	3.7	2.5	2.8	3.2	3.0	4.2	1.5	Group C
9	2.8	2.8	2.8	1.2	3.0	1.7	1.8	1.7	0.4	1.6	
10	2.9	3.0	2.9	1.3	3.1	1.7	1.6	1.7	0.7	1.3	
11	1.9	2.1	1.9	0.8	1.8	1.2	1.5	1.2	0.5	0.8	
12	2.9	3.2	3.0	1.1	2.6	2.1	2.4	2.1	1.0	1.3	
13	2.3	2.4	2.3	1.0	1.7	1.7	1.6	1.7	0.6	1.4	

Figs. 5 and 6 그리고 Table 2에서 기선장 약 30~70km 구간은 단기선에 비해 다소 복잡한 양상을 보인다. 표에서 RMSE 평균은 COMP가 가장 작은 값을 보이나, Fig. 5의 왼쪽 그래프에 존재하는 편의로 인해 표준편차는 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 또한 경험식과 PPP를 비교할 때 평균은 전자가 다소 작은 값을 보이나 표준편차는 기선장에 따라 증가하여 후자와 다른 경향이 있다. 따라서 기선장이 이 구간에 해당할 때 대류권 오차 추정기법을 적용하는 것이 타당한 것

로 사료된다. 그러나 COMP 추정의 경우 약 8~10cm 수준에 달하는 편이가 발생할 수 있어 망조정 단계에서 추가적인 점검이 필요한 것에 유의할 필요가 있다. 기선장 약 80km 이상 (경우 9)일 때는 COMP가 다른 방법에 비해 표고차 추정 정확도가 월등함을 보여주고 있다. 이와 같이 대류권 오차 보정 방식이 기선장에 따른 타원체고 정확도에 미치는 특징을 반영하여 13가지 실험의 경우를 Table 2와 같이 3가지로 그룹으로 구분 하였다.



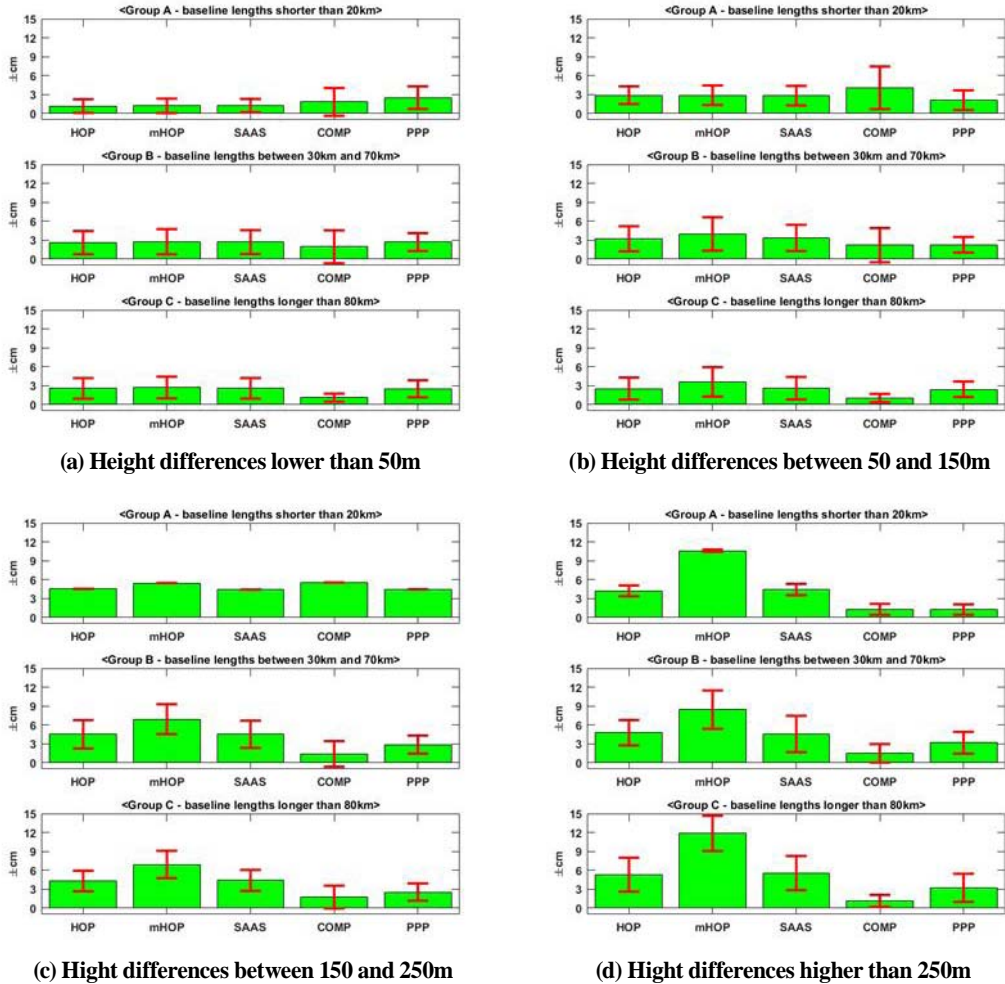


Fig. 7. Accuracy statistics with respect to baseline lengths and height differences

### 3.2.3 표고차 영향

Table 2의 3가지 그룹에 대해 표고차 구간 별로 계산한 RMSE 평균과 표준편차를 Fig. 7과 같이 오차막대 그래프로 도시하였다. 이는 관측점 사이 표고차가 기선해석의 대류권 오차 보정방식에 따라 잔존하는 타원체고 추정 오차에 미치는 영향을 고찰하고자 함이었다. 전체적인 정확도는 표고차 증가에 따라 경험식을 적용한 결과가 대류권 오차를 추정한 것에 비해 낮아지는 경향을 보인다. 이것은 표고차에 따라 상대 대류권 오차가 커짐에도 불구하고 경험식 자체의 불확실성으로 적절하게 보정하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 앞서 논의한 바와 같이 mHOP에 의한 타원체고 추정 정확도는 기선장과 표고차에 매우 민감하다는 사실은 다시 확인할 수 있다.

Fig. 7의 A 그룹 결과는 기선장과 표고차가 약 20km와 250m

이하일 때 HOP 혹은 SAAS 경험식을 사용하는 것이 타원체고 추정에 보다 유리하다는 것을 보여준다. 한편 기선장이 그룹 A에 해당하나 표고차가 상대적으로 큰 경우의 대류권 오차의 보정은 Fig. 7(d)에 250m 이상으로 구분하였으나 실제 표본의 표고차가 모두 400m 이상인 점을 고려할 때 이때는 추정기법을 적용해야 할 것으로 사료된다. 본 연구의 실험기선 표본은 표고차 약 300m 내외에 해당하는 것을 포함하고 있지 못해 향후 이 구간에 대한 추가 분석이 필요할 것이다.

Fig. 7의 B 그룹에서 정확도 평균적으로 COMP가 다른 경우에 비해 높은 것으로 나타난 반면 표준편차는 표고차 250m 이하인 경우에 다소 크게 나타났으며, 이는 Fig. 4에서와 같이 대류권 오차의 추정에 발생한 편의에 따른 것으로 보인다. 따라서 기선장 약 30~70km 구간에서 표고차가 약 250km 이하인



경우 대류권 오차를 추정을 통해 보정할 때 편차의 발생에 유의해야 하며, 이는 최소제약 망조정 단계에서 과대오차로 규명·소거함으로써 해결할 수 있을 것이다. 만약 GrafNet/Nav에서와 같이 PPP 엔진에 의해 대류권 오차를 추정·보정할 수 있다고 한다면 이 기법을 적용하는 것이 균질한 정확도의 타원체고 추정 방안이 될 수 있을 것이다. Fig. 7(d)에서와 같이 표고차 약 250m 이상인 기선에 대해서는 COMP를 사용하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 7에서 기선장 80km 이상 기선에 해당하는 C 그룹의 결과는 표고차와 무관하게 COMP가 GPS 높이측량에서 가장 정확한 타원체고 추정을 위한 방법임을 보여준다. 그러나 COMP 결과 중 Fig. 7(c)에서 다소 큰 표준편차는 추정 편차에 따른 것으로 앞서 언급한 바와 같이 이 방법을 적용할 때 상대적으로 큰 오차 발생에 주의해야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 GPS 높이측량의 기선해석에서 대류권 오차 보정방식이 타원체고 추정 정확도에 미치는 영향을 고찰하였다. 88개 상시관측소를 이용해 247개 실험기선을 구성한 후 GNSS 통합 데이터센터로부터 7일 동안 관측 데이터를 확보하여 총 8,645회 기선해석 및 정확도 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 타원체고 추정 정밀도는 정확도에 비해 높았으며, 이는 동일한 방법을 적용해 대류권 오차를 보정하는 경우 잔존 오차가 편차 형태로 나타나기 때문이다. 특히 이중차분으로부터 대류권 오차를 추정할 때 기선장이 상대적으로 짧고 표고차가 작은 경우 약 8cm 내외의 편차가 빈번하게 발생하였다.

둘째, 3가지 경험식에 의한 타원체고 추정 정확도와 정밀도를 비교한 결과 HOP와 SAAS는 동등한 수준이었으나, mHOP는 표고차와 기선장의 증가에 매우 민감하였다. 따라서 표준 기상요소를 적용한 경험식에 의한 대류권 오차의 보정은 HOP 혹은 SAAS를 적용하는 것이 타당함을 확인하였다.

셋째, 기선장과 표고차가 상대적으로 작은 경우에 대한 COMP의 적용은 빈번한 편차의 발생으로 전체적으로 정확도가 저하되는 결과를 보였다. 한편 PPP 대류권 오차 추정·보정할 경우의 정밀도는 기선장과 표고차에 종속하는 경향을 보였으나, 그 정확도는 이들에 대한 종속성이 개선되어 가장 균질하였다.

넷째, 기선장과 표고차가 각각 약 20km와 250m 이내인 경우는 HOP와 SAAS 경험식 그러나 동일한 기선장에 대해 표고차가 약 400m 이상일 때는 COMP를 적용에 의해 가장 우수한 타

원체고 정확도를 확보할 수 있었다.

다섯째, 기선장 약 30~70km에 해당하는 타원체고 추정에서는 COMP가 평균적으로 가장 높은 정확도를 보였으나, 상대적으로 표고차가 낮을 때 편차가 발생하였다. 만약 사용 소프트웨어에 따라 PPP 방식에 의해 대류권 오차를 보정할 수 있다면 이 기법이 가장 균질한 정확도의 타원체고 추정 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

여섯째, 기선장이 약 80km 이상인 기선해석에서는 모든 경우에서 COMP 방식으로 가장 정확한 타원체고 산정할 수 있었다.

마지막으로 본 연구는 GPS 기선해석을 통한 타원체고 산정에서 대류권 오차 보정기법의 영향을 분석하기 위해 24시간 관측 데이터를 처리한 결과이기 때문에 실제 확보 가능한 정확도와 정밀도는 관측 기간 및 망 구성 방법과 조정 방식에 따라 차이가 있을 수 있음을 밝힌다. 또한 상시관측소를 사용한 실험으로 인해 단기선에 대한 표본의 수가 충분하지 못하여 향후 추가 분석이 필요할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2017-2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

#### References

- Beutler, G., Bauersima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., and Geiger A. (1987), Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations, In: Brunner, F.K. (ed.), *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements*, School of Surveying, University of New South Wales, Australia, pp. 15-43.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2001), *GPS Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien New York, Wien, Austria, 382p.
- Hong, C. (2013), Impact of tropospheric delays on the GPS positioning with double-difference observables, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 5, pp. 421-427. (in Korean with English abstract)
- Hopfield, H.S. (1969), Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, No. 18, pp. 4487-4499.

- Javad (2011), *GIODIS Software Manual Version 2.2*, Javad GNSS Inc., San Jose, California, USA, 99p.
- Jung, S., Kwon, J., and Lee, J. (2018), Accuracy analysis of GNSS-derived orthometric heights on leveling loop disconnected area, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-8.
- Lee, S. and Auh, S. (2016), Accuracy analysis of GPS ellipsoidal height determination in accordance with the surveying conditions, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 23, No. 4, pp. 67-74. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y., Han, J., and Kwon, J. (2015), Accuracy improvement of real-time GNSS based heghting using published orthometric height of unified control point, *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 23-24 April, Changwon, Korea, pp. 345-346. (in Korean with English abstract)
- Lee, J. and Kwon, J. (2015), Construction and precision verification of Korean national geoid model KNGeoid14, *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 23-24 April, Changwon, Korea, pp. 177-179. (in Korean with English abstract)
- Lee H., Wang, J., Rizos, C., and Tsujii, T. (2005), Augmenting GPS by ground-based pseudolite signals for airborne surveying applications, *Survey Review*, Vol. 38, No. 296, pp. 88-99.
- Leick, A., Rapoport, L., and Tatarnikov, D. (2015), *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 807p.
- Rothacher, M. (2002), Estimation of station heights with GPS, In: Drewes, H., Dodson, A., Fortes, L.P.S., Sánchez, L., Sandoval, P. (ed.), *Vertical Reference Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 81-89.
- Saastamoinen, J. (1973), Contribution to theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, Vol. 107, pp. 13-34.
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter GmbH & Co., Berlin, Germany, 589p.
- Shin, G., Han, J., and Kwon, J. (2014), Accuracy analysis of orthometric heights based on GNSS static surveying, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 5, pp. 527-537. (in Korean with English abstract)
- Wang, M. and Li, B. (2016), Evaluation of empirical tropospheric models using satellite-tracking tropospheric wet delays with water vapor radiometer at Tongji, China, *Sensors*, Vol. 16, No. 2, pp. 186-201.
- Waypoint (2017), *GrafNav/GrafNet User Manual*, NovAtel Inc., Calgary, Canada, 168p.