

GNSS 정지측량을 통한 표고 산출 정확도 분석

Accuracy Analysis of Orthometric Heights Based on GNSS Static Surveying

신광수¹⁾ · 한중희²⁾ · 권재현³⁾

Shin, Gwang-soo · Han, Joong-hee · Kwon, Jay Hyoun

Abstract

In 2013, NGII(National Geographic Information Institute) has developed and provided the KNGeoid13(Korean National Geoid Model 2013) to support the fundamental computation of GNSS-derived orthometric height. In this study, the adjusted ellipsoidal height, the sum of geoidal height and height by the leveling, is applied to calculate the GNSS-derived orthometric height without the local bias, based on GNSS static surveying and KNGeoid13. The mean of errors in GNSS-derived orthometric heights could be verified with the leveling data, which was actually less than 0.5 cm with using the adjusted ellipsoidal heights, but 3 cm by calculating differences between ellipsoidal heights and geoidal heights. By analyze the accuracy of GNSS-derived orthometric height depending on the duration of observation, we could realized 95% of data shows less than 4 cm accuracy, when the GNSS survey conducting for 4 hours spread over two days, but while the case of GNSS survey conducting for 4 hours and 2 hours respectively, resulted in 95% of data less than 5cm level of accuracy. Also, if the ambiguity is fixed, less than 10cm of accuracy could be obtained at 95% of data for only 30 minutes GNSS survey over a day. Following the study, we expected that the height determination by GNSS and geoid models can be used in the public benchmark surveying.

Keywords : GNSS-Derived Orthometric Height, KNGeoid13, GNSS Static Surveying, Adjusted Ellipsoidal Height

초 록

2013년 국토지리정보원에서는 합성 지오이드 모델 KNGeoid13(Korean National Geoid Model 2013)을 개발하여 제공함으로써 우리나라에서도 GNSS 측위 기술을 이용하여 높이측량을 적용하기 위한 기반이 마련되었다. 본 연구에서는 GNSS 정지측량 및 KNGeoid13을 이용하여 지역적인 수직기준과 부합하는 GNSS 기반 표고를 결정하기 위해 기지점의 타원체고 성과를 직접수준측량 성과와 모델 지오이드고를 더하여 계산된 보정타원체고로 사용하는 방법을 적용하고, 그 영향을 분석하였다. 보정타원체고를 이용하지 않은 경우에는 약 3cm 수준의 편이가 나타나는 반면 보정타원체고를 이용하면, 오차의 평균이 0.5cm 이하로 지역적인 편이가 제거되었다. GNSS 기반 표고의 정밀도를 관측시간에 따라 분석한 결과, 1일 4시간씩 2일간 관측할 경우에는 전체 데이터의 95%가 4cm 미만의 오차를 가진 것으로 나타났으며, 1일 4시간 및 2시간 관측을 수행하는 경우에는 5cm 이하의 오차를 보였다. 30분 관측하여 모호수가 고정될 경우, 전체 데이터의 95%가 10cm 이하의 정확도를 갖는 표고를 결정할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 결과는 향후 공공측량에 GNSS 높이측량 도입을 위한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심어 : GNSS 기반 표고, KNGeoid13, GNSS 정지측량, 보정타원체고

Received 2014. 10. 13, Revised 2014. 10. 13, Accepted 2014. 10. 29

1) Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail: sgs@uos.ac.kr)

2) Member, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul (E-mail: hjh0016@uos.ac.kr)

3) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics University of Seoul (E-mail: jkwon@uos.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

평균해수면으로부터의 높이를 의미하는 표고는 국토개발 및 관리를 위한 기반자료인 만큼 각 국가에서는 일정 간격으로 수준점을 설치하여 표고 성과를 제공하고 있다. 한 지점의 표고를 산출하기 위해서 대표적으로 이용되는 높이측량에는 직접수준측량이 있으며, 수준점에서부터 레벨기를 통해 표척의 눈금을 읽고, 고저차를 계산하여 측정점의 표고를 결정한다. 그러나 직접수준측량의 경우 기준점으로부터 거리가 멀어지고, 고도가 높아질수록 누적된 측정 오차로 인하여 결정된 표고의 정확도는 저하되며, 동시에 측량에 소요되는 비용 및 시간이 증가하는 단점이 있다. 최근 GPS(Global Positioning System), GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System), BeiDou 등 다양한 GNSS(Global Navigation Satellite System) 위성의 개발 및 운영, 측위 기술의 발달로 타원체고를 정밀하고 신속하게 결정할 수 있게 되면서 GNSS 측량과 합성 지오이드 모델을 이용하여 표고를 결정하는 GNSS 높이측량에 대한 관심이 증가되고 있다. GNSS 높이측량은 기지점과 미지점에 대해서만 GNSS 측량을 실시하기 때문에 측정 간에 거리가 멀수록 직접수준측량에 비해 시간적·비용적으로 더 효율적이다. 일례로 미국 국가측지국(National Geodetic Survey, NGS)에서는 노스캐롤라이나(North Carolina)와 캘리포니아(California) 지역을 대상으로 직접수준측량과 GNSS 높이측량을 통해 표고를 결정하였을 때 기선거리에 따른 소요 시간 및 비용을 비교·분석하였다(NGS, 1998). 기선거리가 4km 일 때, GNSS 높이측량을 실시하는 경우에는 직접수준측량보다 35% 시간적 측면에서 절감 효과가 나타났으나, 비용적인 측면에서는 19% 높게 나타났다. 그러나 기선거리가 8~40km로 길어질수록 GNSS 높이측량을 통해 표고를 결정하는 경우 시간적인 절감율은 68~94%로 더 증가되었으며, 비용 절감율도 40~88%로 향상되었다. 따라서 기존 직접수준측량의 비효율성을 보완하기 위하여 미국, 일본 등 선진국에서는 GNSS 높이측량을 도입하여 이용하고 있다. 미국의 경우에는 1990년대부터 GNSS 측량을 통해 안정적인 타원체고를 계산하고, 지오이드 모델과 수준점의 표고 성과를 이용하여 지역적인 수직기준에 부합하는 GNSS 기반 표고를 결정하기 위한 연구를 진행하였다(Zilkoski, 1993; Zilkoski and D'Onofrio, 1996; Henning *et al.*, 1998). 현재 이러한 선행 연구들을 바탕으로 미국 국가측지국에서는 GNSS 정지측량을 통해 2cm(local), 5cm(network) 정확도의 타원체고를 결정하기 위한 가이드라인 NGS-58(NOAA, 1997)과 GNSS 기반 표고 결정 방법에 대한 가이드라인 NGS-59(NOAA, 2008)를 제공하고 있다. 일

본의 경우에는 GNSS 정지측량을 통해 4cm 수준의 정확도를 갖는 GNSS 기반 표고 결정을 위한 GNSS 높이측량 작업규정이 2013년 처음으로 제정되었으며, 현재 GNSS 기반의 높이측량 기술이 3급 수준점 측량에 대해 적용되고 있다(GSI, 2014).

우리나라에서도 GNSS 높이측량을 도입하기 위한 연구들이 진행되었다. Kwon *et al.*(2008)은 간접수준측량에 의해 상대적으로 낮은 정확도를 갖는 표고를 결정할 수 밖에 없는 도서지역에서 GNSS 높이측량을 통해 표고 결정 가능성과 해당 기술을 공공측량에 적용할 수 있는지를 검증하기 위해 육지와 연결된 도서지역을 대상으로 GNSS 정지측량을 수행한 후 NORI05(National Oceanographic Research Institute 2005) 지오이드 모델을 이용하여 표고를 산출하고, 이를 직접수준측량 성과와 비교함으로써 정밀도를 검증하였다. 경상남도 통영시와 거제시를 대상으로 정밀도를 분석한 결과, GNSS 기반 표고 절대 오차의 평균은 5.1cm로 산출되었으며, 이러한 결과를 토대로 GNSS 기반 표고 결정 방법을 상대적으로 낮은 정밀도를 요구하는 등급의 공공수준측량에는 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 그러나 2008년 이후 새롭게 획득된 통합기준점 GPS/Leveling 성과를 기준으로 NORI05 지오이드 모델의 정밀도를 평가한 결과, 내륙에서의 오차가 큰 것으로 알려져 있으며(NGII, 2011), 상기 연구에서 도서지역만을 대상으로 GNSS 기반 표고 정확도를 분석하였기 때문에 육상 지역에서 GNSS 높이측량의 적용 가능성 여부를 도출하기에는 한계가 있다. 국토지리정보원에서는 2009년에 개발된 9cm 정밀도의 합성 지오이드 모델인 GMK09(Geoid Model Korea 2009)를 대체하기 위한 신규 지오이드 모델로 육지를 대상으로 4cm 정밀도를 갖는 KNGeoid13(Korean National Geoid Model 2013)을 구축하여 2013년 12월부터 제공하고 있다. 이에 따라 KNGeoid13을 이용하여 기존 모델을 적용한 경우에 비해 정확도가 향상된 GNSS 기반 표고를 결정할 수 있는지를 분석한 연구들이 진행되었다. Park and Jung(2014)은 충청지역의 통합기준점과 수준점 총 22점에서 VRS 측량을 실시하여 GNSS 기반 표고를 결정하고, 고시된 표고와 비교한 결과, 평균 2.8cm 수준의 편의를 갖는 정표고가 결정되었다고 발표하였으며, 이를 기반으로 GNSS 수준측량을 검사측량, 현황측량 등 다양한 분야에의 활용 가능성을 제시하였다. Lee *et al.*(2014)은 우리나라 전국에 걸쳐 통합기준점과 수준점 총 49점을 선정하고, VRS 측량을 통해 결정된 GNSS 기반 표고의 정밀도를 지역적인 절대 오차의 평균으로 평가하였으며, 강원지역과 전라북도 해안지역에서의 절대 오차의 평균이 각각 3.5cm 이상으로 상대적으로 크게 발생한다고 명시하였다. 이상의 연구에서 GNSS 기반 표고를 계산하였을 때 약

3cm 수준의 편차가 있다고 평가된 이유는 현재까지 우리나라에서 수행된 연구 모두 단순히 타원체고와 지오이드고를 감하여 GNSS 기반 표고를 계산하였기 때문이다. 즉, 지오이드 모델의 기준면과 지역적인 수직기준면 간에 편차가 보정되지 않아 GNSS 기반 표고에 반영되기 때문에 편차가 있는 표고가 결정되는 것이므로 실제 우리나라 수직기준체계와 부합되는 표고를 결정하기 위해서는 상대적인 보정을 수행하는 부분이 추가되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 KNGeoId13과 GNSS 정지측량을 통해 신뢰성 있는 GNSS 기반 표고를 산출하기 위해 타원체고 정확도에 영향을 미치는 요소를 분석하여 안정적인 타원체고를 산출하기 위한 방법과 지오이드 모델의 기준면과 지역적인 수직기준면 간에 편차를 제거하기 위해 보정타원체고를 이용하는 한 방법을 소개하였으며, 이러한 방법을 적용하였을 때의 성과 차이를 직접수준측량 성과와 비교함으로써 GNSS 기반 표고의 정확도를 분석하였다.

2. GNSS 기반 표고 결정 방법

높이는 어떤 기준면(reference surface)을 사용하느냐에 따라 다르게 정의되며, 측량에서 사용하는 대표적인 높이로는 표고, 타원체고, 지오이드고를 들 수 있다(Fig. 1). 표고(orthometric height, H)는 평균해수면에 가장 가까운 가상의 기준면인 지오이드로부터의 중력방향을 따라 측정한 연직거리(plumb line)로 정의되며, GNSS 측량을 통해 산출되는 타원체고(ellipsoidal height, h)는 기준 타원체(reference ellipsoid)로부터 기하학적으로 수직 방향(normal line)을 따라 측정된 거리를 의미한다. 지오이드고(geoidal Height, N)는 기준 타원체로부터 지오이드까지의 수직거리로 정의된다. 실제 타원체의 수직인 방향과 지오이드의 연직인 방향은 지오이드의 불규칙성으로 인해 일치하지 않으나 그 차이가 미소하므로 이를 고려하지 않는다면 Eq. (1)과 같이 GNSS 측량을 통해 계산된 타원체고와 합성 지오이드 모델로부터 계산한 지오이드고를 이용하여 GNSS 기반 표고를 결정할 수 있다.

$$H \approx h - N \tag{1}$$

그러나 측량에 이용하는 합성 지오이드 모델은 중력자료를 토대로 물리적인 성질을 나타내는 중력 지오이드 모델을 구현한 후 우리나라 수직기준면에 부합되도록 타원체고와 표고 성과를 가지고 있는 기준점을 이용하여 조정한 것이기 때문에 실제 지역적인 표고 기준면과 합성 지오이드 모델에서 나타

내는 지오이드 사이에는 편차(ΔN_p)가 발생할 수 있다(Fig. 2). 이로 인해 GNSS 측량을 통해 계산된 타원체고(h_p)에서 합성 지오이드 모델로부터 계산된 지오이드고($N_{p, Model}$)를 감하여 GNSS 기반 표고를 계산하게 되면 직접수준측량을 통해 산출된 표고와 편차가 발생하게 된다. 따라서 지오이드 간에 편차를 보정하고 지역적인 수직기준체계와 부합하는 표고를 결정하기 위해서는 합성 지오이드 모델로부터 계산된 모델 지오이드고 즉, $N_{p, Model}$ 와 지역적인 지오이드고(N_p)가 같다는 가정 하에 지오이드고와 표고를 더하여 지역적인 편차가 보정된 보정타원체고를 계산한 후 적용하여야 한다.

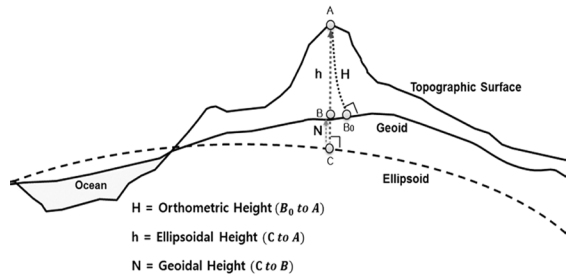


Fig. 1. Relationship between orthometric, ellipsoidal and geoidal height

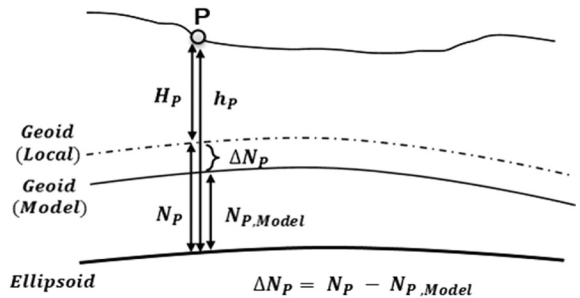


Fig. 2. Difference between local geoid and hybrid geoid model

GNSS 정지측량과 합성 지오이드 모델을 이용하여 지역적인 수직기준에 부합하는 GNSS 기반 표고 결정 방법은 Fig. 3과 같이 3단계로 이루어진다. 1단계는 앞서 언급한 바와 같이 모델 지오이드고와 지역적인 지오이드고가 같다는 가정하에 기지점의 위도, 경도를 기준으로 합성 지오이드 모델로부터 계산된 모델 지오이드고($N_{p, Model}$)를 표고(H_p)에 더하여 기지점의 보정타원체고($h_{p, Adjusted}$)를 계산하는 것이다. 2단계는 기지점의 위도, 경도와 보정타원체고를 이용하여 정적 상대측위 방법을 통해 미지점의 위도, 경도, 보정타원체고($h_{A, Adjusted}$)를 계산한다. 이상의 과정을 통해 동일한 기준면 상에서의 보정타원체고가 계산되었기 때문에 3단계에서

는 미지점의 위도, 경도를 이용하여 합성 지오이드 모델로부터 모델 지오이드고($N_{A, Model}$)를 계산하고, 미지점의 보정 타원체고와 모델 지오이드고를 감하여 GNSS 기반 표고(H_A)를 결정한다.

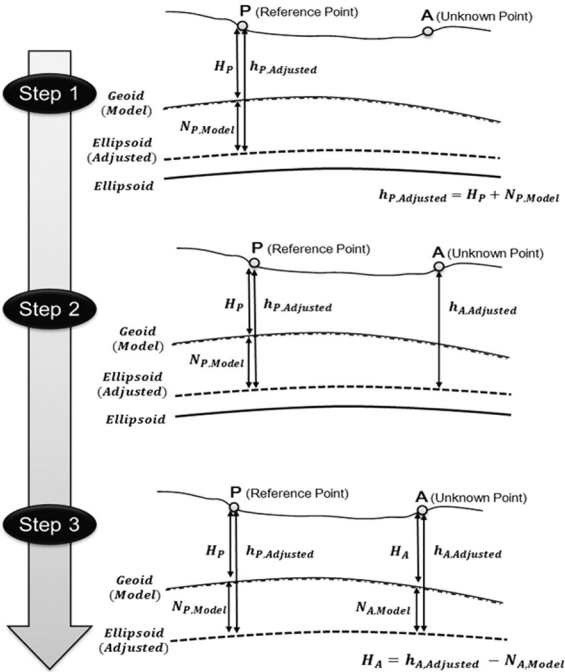


Fig. 3. Determination method of the GNSS-derived orthometric height

3. 타원체고 산출 정확도 분석

GNSS 측량과 지오이드 모델을 이용하여 산출되는 GNSS 기반 표고의 정확도는 타원체고 오차와 지오이드 모델로부터 계산되는 지오이드고의 오차에 영향을 받게 된다. 만약 지오이드 모델의 정확도에 지역적인 편이가 없다고 가정하면, 한 측점에서 지오이드고는 항상 일정한 정밀도를 갖기 때문에 GNSS 측량으로부터 산출되는 타원체고의 오차에 따라 GNSS 기반 표고의 정확도가 달라진다. 본 장에서는 안정적인 GNSS 기반 표고를 산출하기 위한 방법을 도출하기 위해 타원체고 정확도에 영향을 미치는 인자요소인 관측시간, 위성궤도력, 단일기선 및 다중기선 처리에 따른 영향을 분석하였다.

3.1. 관측시간 및 관측시점에 따른 타원체고 정확도 분석 결과

2014년 2월 2일부터 3일까지 30초 간격으로 2일간 관측된

청주(CNJU), 세종(SEJN) 상시관측소 데이터와 방송궤도력을 이용하여 관측시간 및 관측시점에 따른 타원체고 정확도를 분석하였다. GNSS 데이터 처리는 Leica 사의 LGO(Leica Geo Office)를 이용하였으며, 청주 상시관측소를 기지점으로 하여 단일기선(기선거리 약 20km) 처리하여 세종 상시관측소의 타원체고를 계산한 후, 고시좌표를 기준으로 타원체고 오차를 계산하였다. 관측시간 및 관측시점에 따른 타원체고 정확도를 비교하기 위하여 관측시간을 8시간, 6시간, 4시간, 2시간, 1시간, 30분 총 6개로 구분하고, 1시간 이상의 관측시간에 대해서는 2일간 취득된 상시관측소 데이터를 1시간 간격으로 관측시작 시간을 변경하여 관측시점을 정하였으며, 30분을 관측시간으로 하는 경우에는 30분 간격으로 관측시작 시간을 변경하여 데이터를 처리하고 타원체고 오차를 계산하였다. Fig. 4는 8시간 및 30분 관측데이터를 이용하였을 때, 세종 상시관측소에서의 타원체고의 오차를 나타낸 것이다. 관측시간을 8시간으로 하여 관측시작 시간에 대한 오차의 분포를 살펴보면 위성의 기하학적 배치, 전리층의 자유전자 양과 대류권의 수증기량에 의한 영향 등 다양한 환경적인 영향으로 인해 타원체고 오차가 증가 또는 감소한다. 30분 데이터를 이용할 경우에도 8시간 관측한 결과와 유사한 경향을 나타내지만 관측시간이 짧기 때문에 8시간보다는 오차의 변화가 더 큰 범위를 나타내며 랜덤한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. Table 1은 관측시간에 따른 타원체고 오차 범위를 정리한 것으로 8시간의 경우에는 타원체고 오차의 차이가 최대 1.8cm까지 나타날 수 있으며, 관측시간이 짧아질수록 오차의 차이가 커지면서 관측시간이 30분인 경우에는 최대 4.5cm까지 나타날 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 안정적인 타원체고를 산출하기 위해서는 환경적인 변화에 따른 영향을 최소화하는 것이 필요하며, 위성의 기하배치가 다른 시간대에 2회 이상 관측하는 것이 필요하다고 사료된다.

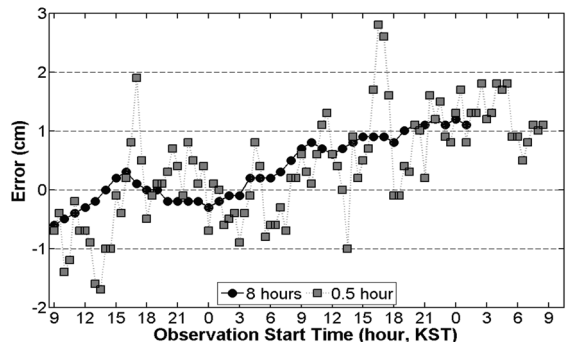


Fig. 4. Error in the ellipsoidal height changed by the observation time (duration of observation : 8 hours, 0.5 hour)

Table 1. Error in the ellipsoidal height changed by the duration of observation

(unit : cm)

Duration of Observation	Range	Maximum Difference
8 hours	-0.6 ~ 1.2	1.8
6 hours	-0.8 ~ 1.3	2.1
4 hours	-0.9 ~ 1.4	2.3
2 hours	-1.2 ~ 2.0	3.2
1 hour	-1.6 ~ 2.0	3.6
0.5 hour	-1.7 ~ 2.8	4.5

3.2. 위성궤도력 사용에 따른 타원체고 정확도 분석

GNSS 측량은 위성을 기준으로 미지점까지의 거리를 관측한 후 미지점의 위치를 결정하기 때문에 위성의 정확한 위치 정보가 필수적이다. 즉, 위성의 위치 오차가 미지점의 위치 오차에 영향을 미치므로 미지점의 위치를 정밀하게 결정하기 위해서는 먼저 신뢰할 수 있는 위성의 위치를 결정하여야 한다. 위성의 위치는 위성궤도력을 이용하여 계산하는데, GNSS 데이터 처리 시에 사용하는 위성궤도력은 방송궤도력과 정밀궤도력으로 나눌 수 있다. 방송궤도력은 최신의 궤도 관측 자료를 이용하여 예측된 위성의 궤도로 GNSS 측량 시에 관측 데이터와 함께 전송되며, 위성의 위치 정확도는 약 1m 수준으로 알려져 있다(IGS, 2009). 정밀궤도력은 110여개의 GNSS 상시 관측소 데이터를 이용하여 정밀하게 위성의 위치를 계산한 것으로 가장 정확한 정밀궤도력은 관측시간을 기준으로 12~18일 후에 제공되며, 위성의 위치 정확도는 약 2.5cm 수준이다(IGS, 2009). GNSS 데이터 처리 시에 어떤 위성궤도력을 이용하는지에 따라 계산되는 위성의 위치 오차가 달라지기 때문에 본 연구에서는 위성궤도력 종류에 따른 타원체고 정확도 평가를 수행하였다. 위성궤도력에 따른 타원체고 정확도 분석은 “3.1. 관측시간 및 관측시점에 따른 타원체고 분석 결과”에서와 동일하게 청주와 세종 상시관측소 자료를 이용하였으며, 자료처리 방법도 동일하게 적용하였다. Table 2는 위성궤도력의 종류에 따른 타원체고 정확도를 정리한 것이다. 방송궤도력을 이용하여 산출된 타원체고와 정밀궤도력을 기반으로 산출된 타원체고를 비교한 결과, 위성궤도력이 타원체고 결정에 미치는 영향은 최대 4mm 이하로 미소하지만 관측시간이 짧을수록 차이가 큰 것으로 나타났다. 상대적으로 그 차이가 작은 이유는 본 연구에서 선정한 측점 간에 기선의 거리가 20km로 길지 않으며, 상대측위 기법을 적용하였기 때문에 관측치 차분 시 위성의 위치 오차가 거의 제거되었기 때문으로 판단된다. 그러나 미소한 수준의 차이 일지라도 타원체고

의 정확도를 저하시킬 우려가 있고, 관측시간에 따른 영향이 다르게 나타나는 만큼 높은 정확도를 확보하기 위해서는 정밀 궤도력을 사용하여야 할 것으로 사료된다.

Table 2. Difference of ellipsoidal heights in case of using broadcast and precise ephemeride

(unit : cm)

Duration of Observation	Broadcast - Precise ephemeride		
	Range	Mean	STD
8 hours	-0.2 ~ 0.1	0.0	0.1
6 hours	-0.1 ~ 0.1	0.0	0.1
4 hours	-0.2 ~ 0.1	0.0	0.1
2 hours	-0.3 ~ 0.2	0.0	0.1
1 hour	-0.3 ~ 0.3	0.0	0.1
0.5 hour	-0.4 ~ 0.3	-0.1	0.2

3.3. 단일 및 다중기선에 따른 타원체고 정확도 분석

GNSS 정지측량을 통해 미지점의 위치를 결정하기 위해서는 “3.1. 관측시간 및 관측시점에 따른 타원체고 분석 결과”에서와 같이 하나의 기지점 성과를 고정하고 단일기선으로 처리할 수도 있지만 여러 개의 기지점에서 동시에 GNSS 관측을 실시한 후 각 기지점에서 미지점을 연결하여 다중기선으로 처리할 수도 있다. 따라서 상시관측소 서울(SOUL), 수원(SUWN), 인천(INCH)과 통합기준점(U0148)에서 1일 4시간씩 2일간 취득한 GNSS 관측 데이터를 이용하여 기선처리 방법에 따른 타원체고 정확도를 비교하였다. 이 때 관측시점에 따른 영향을 함께 분석하기 위해 4시간 관측된 데이터를 1시간 간격으로 이동하면서 2시간 단위로 나누어 1일 3세션으로 분리하였으며, 2일간 관측한 자료이므로 총 6세션의 데이터를 생성 및 이용하였다. Fig. 5는 6세션 데이터에 대해 상시관측소 한 점만을 고정한 경우와 세 점을 모두 고정하였을 때 산출된 통합기준점에 타원체고 오차를 나타내었다. “3.1. 관측시간에 및 관측시점에 따른 타원체고 정확도 분석 결과”와 유사하게 같은 관측시작 시간에 따라 타원체고 오차가 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 타원체고 오차에 수 cm 수준의 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 앞서 상시관측소를 이용하여 분석한 결과와 비교해보면 통합기준점을 미지점으로 선정할 경우에 타원체고 오차가 상대적으로 크게 나타난다. 이는 통합기준점의 관측환경이 상시관측소보다 좋지 않은 만큼 일부 위성 신호에 대해 멀티패스(multipath)나 사이클 슬립(cycle Slip)이 자주 발생되어 부정확하게 처리되었기 때문이다.

특히, 단일기선 처리할 경우의 타원체고 오차는 어떤 기지점을 사용하는지에 따라 타원체고 오차는 최대 10cm 이상까지 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기지점과 미지점의 관측환경 및 동시에 수신되는 위성의 기하배치의 안정성에 따른 영향으로 인해 발생된 것으로 사료된다. 반면 여러 개의 기지점을 동시에 이용하여 다중기선으로 처리하는 경우에는 미지점의 타원체고가 각 기지점을 이용한 단일기선 처리 결과의 평균값으로 결정되는 만큼 단일기선 처리 결과보다 안정적인 것으로 나타났다. Fig. 5를 살펴보면, 서울 상시관측소를 기지점으로 U0148을 단일기선 처리한 타원체고 최대 오차는 약 8cm로 나타났으나, 서울, 수원, 인천 상시관측소를 모두 이용하여 산출된 타원체고의 최대 오차는 약 2cm로 더 안정적이다. 그러나 다중기선으로 처리하여 타원체고를 결정하더라도 1일차에 결정한 타원체고와 2일차에 결정한 타원체고 사이에는 수 cm 정도의 차이가 발생되었다. 따라서 안정적인 타원체고를 산출하기 위해서는 다수의 기지점을 이용하여 성과를 산출하되 위성의 기하배치가 다른 시점에 2일 이상 동시 관측하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

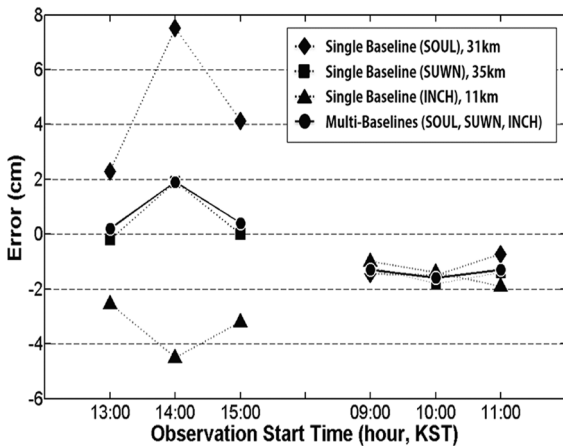


Fig. 5. Error in the ellipsoidal height (single baseline versus multi-baselines)

4. GNSS 기반 표고 산출 정확도 분석

2008년 이후 국토지리정보원에서는 통합기준점, 수준점, 삼각점 등 국가기준점에서 고해상도, 고정밀도를 갖는 신규 육상 중력자료를 획득하면서 보다 높은 정밀도를 갖는 지오이드 모델을 개발하기 위한 노력이 꾸준히 진행되어 왔다(Lee et al., 2011; Lee et al., 2012). 국토지리정보원에서는 삼각점에서 새롭게 확보한 육상중력자료를 포함하여 항공중력자

료, DTU10 위성고도계 자료를 비롯하여 범지구중력장 모델인 EGM08, 지형자료를 기반으로 중력지오이드 모델을 구축하고 이를 통합기준점의 GNSS/Leveling 자료와 융합하여 우리나라 수직 기준에 부합하도록 조정된 최신의 합성 지오이드 모델인 KNGeoid13을 개발 및 발표하였다(NGII, 2013). 그러나 통합기준점의 GNSS/Leveling 자료에 오차가 있기 때문에 합성 지오이드 모델과 통합기준점 GNSS/Leveling 자료를 비교해보면 우리나라 전역에 대해 균일한 정밀도를 나타내지는 않는다. 따라서 기준에 국내에서 수행된 연구와 같이 타원체고와 지오이드 모델로부터 계산된 지오이드고 간에 차이로 결정된 GNSS 기반 표고는 지역적으로 편의를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 지역적인 편이가 제거된 GNSS 기반 표고를 결정하기 위해 “2. GNSS 기반 표고 결정 방법”에서 소개된 보정타원체고를 이용한 방법을 적용하고 GNSS 기반 표고의 정확도를 평가하였다. 특히, 보정타원체고를 이용하여 산출된 표고를 기존 연구와 동일하게 별도의 보정 단계없이 타원체고를 적용하여 결정한 표고와 비교함으로써 지역적인 편의를 제거하였을 때 GNSS 기반 표고 정확도에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1. 대상자료

국토지리정보원에서는 GNSS 기반 표고 결정 기술의 도입을 위한 기반 마련을 목적으로 GNSS 높이측량 시범사업을 수행 중에 있다. 본 연구에서는 GNSS 높이측량 시범사업에 의해 우리나라 8개 지역(강원, 경기, 경남, 경북, 전남, 전북, 충청, 제주)에서 획득한 GNSS 정지측량 및 직접수준측량 데이터를 기반으로 보정타원체고를 적용하여 GNSS 기반 표고를 산출하고, 정확도를 분석하였다. Fig. 6은 GNSS 높이측량 시범사업에서 획득한 검증점 86개소에 대한 분포를 도시한 것으로, 이 중 42점은 1~2등 수준점이며 44점은 42점의 수준점으로부터 직접수준측량을 통해 표고를 계산한 임시 신설점이다.

직접수준측량을 통해 표고가 결정된 검증점에서 GNSS 기반 표고 결정을 위해 검증점 주변에 3개 이상의 통합기준점을 기지점으로 배치하고 GNSS 측량을 실시하였다. 이 때, 통합기준점 간에 거리는 최대 20km 이하이며, 이를 표현한 것은 Fig. 7과 같다. GNSS 측량은 기지점과 검증점에서 2주파 측지/측량용 수신기를 사용하여 30초 간격으로 동시 관측을 수행하였으며, 고도각 15도를 이상으로 1일 4시간씩 2일 관측하였다. 관측시간은 위성의 기하학적 배치에 따른 영향을 분석하기 위해 한국 시간을 기준으로 첫째 날은 13:00~17:00, 둘째 날은 09:00~13:00로 하였다.

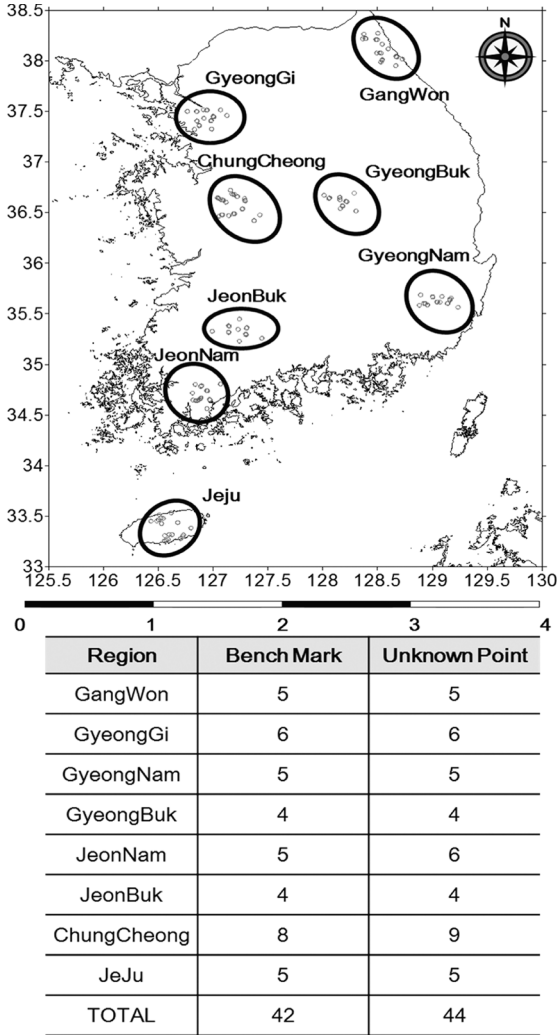


Fig. 6. The number of check points and their location

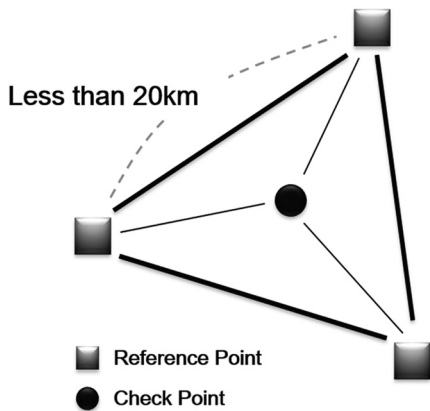


Fig. 7. Network configuration of reference and check points

4.2 GNSS 기반 표고 정확도 분석

산출된 GNSS 기반 표고의 정확도는 GNSS 관측시간과 GNSS 기반 표고 계산 방법을 고려하여 분석하였다. GNSS 관측시간에 따른 GNSS 기반 표고 정확도를 산정하기 위하여 앞서 타원체고 정확도 분석과 유사하게 GNSS 관측시간을 1일 4시간씩 2일간 관측, 1일 4시간 관측, 1일 2시간 관측, 1일 30분 관측으로 구분하였다. 1일 4시간씩 2일간 관측 데이터는 검증점의 개수와 같은 총 86개이며, 1일 4시간 관측데이터는 1일 4시간씩 2일간 관측 데이터를 하루 단위로 구분하여 이용하였기 때문에 총 172개이다. 또한 1일 2시간 관측데이터는 1일 4시간 관측데이터를 이용하여 관측시작 시간을 1시간 간격으로 변경하여 총 516개의 샘플 데이터를 생성하였다. 1일 30분 관측데이터는 위성의 배치가 다른 시간대인 첫째 날 16:00~16:30과 둘째 날 11:00~11:30으로 두 세션에 대해서만 샘플 데이터를 생성하였으며, 데이터의 개수는 총 172개이다.

GNSS 기반 표고 계산은 앞서 타원체고 정확도 분석에서와 동일하게 LGO 소프트웨어를 사용하였으며, 위성궤도력으로는 방송궤도력을 사용하였다. 기선처리 시에 데이터 취득간격, 데이터 관측시간은 관측 시의 설정된 값으로 하였으며, 기상요소 보정 및 모호수 고정 방법은 소프트웨어에서 설정된 기본값을 이용하였다. 또한 GNSS 안테나의 위상중심변동을 보정하기 위하여 IGS의 안테나 위상중심변동 절대 보정 정보를 이용하였다.

GNSS 기반 표고의 정확도는 기존에 타원체고에서 모델 지오이드고를 감하여 계산하는 방법(이하 방법론 1), 보정타원체고를 계산하여 모델 지오이드고를 감하여 계산하는 방법(이하 방법론 2)으로 구분하여 각각의 방법을 적용하여 계산된 GNSS 기반 표고를 직접수준측량을 통해 계산된 표고와 비교함으로써 정확도를 평가하였다. GNSS 기반 표고를 계산하기 위하여 GNSS 관측 자료에 대한 기선 처리 결과, 1일 4시간씩 2일간 관측한 경우와 1일 4시간씩 관측한 두 가지 경우는 모두 모호수가 정수로 고정되었다. 그러나 2시간 및 30분으로 관측 시간을 짧게 구분한 후 데이터를 처리한 경우에는 모호수가 고정되지 않는 경우가 각각 7개, 8개로 나타났다. 따라서 2시간 및 30분 데이터의 통계량은 모호수가 정수로 고정되지 않은 데이터를 제외하고 고정된 509개와 164개 만을 대상으로 산출하였다. Table 3은 GNSS 기반 표고 계산 방법 및 관측시간에 따라 모호수가 정수로 고정된 경우에 계산한 GNSS 기반 표고 오차의 통계량 및 히스토그램이다. 먼저, 방법론 1을 적용하여 계산된 GNSS 기반 표고 오차의 평균은 1일 4시간씩 2일간 관측한 데이터를 모두 이용한 경우에는 -2.93cm, 1일 4시간씩 관측한 데이터를 이용하였을 때는 -2.93cm, 1

Table 3. Relative frequency distribution histogram and statistics of error in the GNSS-derived orthometric height

(unit : cm)

Duration of Observation (the number of dataset)	Method 1 (using ellipsoidal height)			Method 2 (using adjusted ellipsoidal height)		
	Range	Mean	STD	Range	Mean	STD
4 hours per 2 days (86)						
	-17.24 ~ 4.66	-2.93	5.31	-4.35 ~ 5.07	-0.37	1.85
4 hours per day (172)						
	-17.28 ~ 5.64	-2.93	5.31	-7.84 ~ 4.76	-0.31	2.08
2 hours per day (509)						
	-17.89 ~ 33.50	-2.70	6.04	-6.93 ~ 7.77	-0.27	2.24
0.5 hour per day (164)						
	-20.70 ~ 7.07	-2.82	5.84	-8.11 ~ 5.32	-0.32	2.34

일 2시간은 -2.70cm, 1일 30분은 -2.82cm로 약 3cm 수준의 편이가 나타난 것을 확인할 수 있다. 그러나 방법론 2를 적용하게 되면 지역적인 편이를 보정하는 과정이 포함되므로 GNSS 기반 표고 오차의 평균이 관측시간에 따라 -0.37cm, -0.31cm, -0.27cm, -0.32cm로 보정타원체고를 사용함에 따라 편이가 0.4cm 이하로 현저하게 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 방법론1과 방법론2에 따른 GNSS 기반 표고 오차의 표준편차를 살펴보면, 1일 4시간씩 2일간 관측할 경우는 방법론 1과 2가 각각 5.31cm, 1.85cm, 1일 4시간은 5.31cm, 2.08cm, 1일 2시간은 6.04cm, 2.24cm, 1일 30분은 5.84cm, 2.34cm로 계산되었으며, 방법론 2를 적용하였을 때 약 2배 이상 정밀한 것을 알 수 있다. 이는 보정타원체고를 이용하는 방법론 2를 적용하였을 때 지역적인 수직기준에 부합되는 정확한 GNSS 기반 표고를 결정할 수 있다는 의미로 해석될 수 있다. 그러나 통합기준점의 표고 성과는 인근의 수준점 1점으로부터 개방형 왕복측량을 수행하여 결정된 값이므로 인접 수준점 간에 일관성이 없는 경우는 어떤 수준점을 기지점으로 하였는지에 따라 통합기준점들 사이의 수준 성과도 일관성이 결여될 수 있다. 이러한 경우에는 보정타원체고를 이용한 방법을 적용하더라도 수준 성과의 차이가 GNSS 기반 표고 오차로 반영되어 일부 지역에서는 다른 지역에 비해 상대적으로 GNSS 기반 표고오차가 크게 발생될 수 있을 것으로 판단된다.

통계적으로 GNSS 기반의 표고 정확도가 몇 cm 수준의 오차를 갖는지 확인하기 위해 GNSS 기반 표고 오차를 1cm 간격으로 구분하여 관측시간별 누적상대도수표를 작성하였다 (Table 4). 1일 4시간씩 2일간 관측을 수행할 경우는 전체 데이터 중 95% 이상이 4cm 이하의 오차를 갖는 것으로 나타났으며, 1일 4시간, 2시간씩 관측한 경우에는 5cm 이하의 오차를 갖는 GNSS 기반 표고가 계산되는 것으로 확인되었다. 관측 시간이 짧아질수록 타원체고의 오차가 커지기 때문에 30분으로 짧게 관측을 할 경우에는 동일하게 95%를 기준으로 정밀도를 평가하여도 오차가 커지게 된다. 그러나 30분 관측 데이터를 기준으로 하는 경우에도 관측 데이터 중 95%에서 10cm 이하의 오차를 갖는 표고를 결정할 수 있는 것으로 나타났다. 단, 30분 관측 데이터의 경우 전체 관측시간을 모두 포함하는 처리 결과가 아니라 2세션만 추출하여 처리하였기 때문에 전체 관측시간을 포함하여 처리할 경우에는 통계량이 다르게 나타날 수 있을 것으로 사료된다. 이상의 결과에서 나타내는 바와 같이 모호수가 정수로 고정될 수 있는 상황이라면 30분 관측을 수행하더라도 약 10cm 수준의 표고를 결정할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 일반측량 및 현황측량 분야에서 10cm 정도의 낮은 정확도를 요구하는 경우에는 30분 관

측을 하더라도 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

Table 4. Cumulative relative frequency distribution of error in the GNSS-derived orthometric height, which uses adjusted ellipsoidal height

Duration of Observation	(unit : %)						
	Less than 1cm	Less than 2cm	Less than 3cm	Less than 4cm	Less than 5cm	Less than 6cm	Less than 10cm
4 hours per 2 days	33.7	74.4	90.7	96.5	98.8	100	100
4 hours per day	36.6	70.4	83.7	93.0	99.4	99.4	100
2 hours per day	31.2	63.2	80.2	91.7	95.7	97.3	98.6
0.5 hour per day	18.6	54.7	77.9	87.2	93.6	94.8	95.4

5. 결론

본 연구에서는 신뢰할 수 있는 GNSS 기반 표고를 결정하기 위해 관측시간, 위성궤도력과 같은 다양한 요소들이 타원체고 정확도에 미치는 영향을 분석하여 안정적인 타원체고를 결정하기 위해 요구되는 사항을 검토하였다. 또한, 우리나라 전역에 걸쳐 취득한 GNSS 정지측량 데이터와 국토지리정보원의 최신 합성 지오이드 모델인 KNGeoid13을 이용하였을 때 관측시간에 따라 산출 가능한 GNSS 기반 표고 정확도를 분석하였다.

GNSS 정지측량 기반의 안정적인 타원체고를 산출하기 위해서는 다음의 사항을 준수하여야 할 것으로 판단된다. 타원체고는 위성의 기하배치 및 대기 환경에 의해 달라지기 때문에 이러한 영향을 감소시키기 위해서는 장시간 관측이 필수적이며, 동시에 하루 동안 장시간 관측하는 것 보다는 위성의 기하배치가 다른 시간대를 선정하여 2일 이상의 관측하는 것이 필요하다. 또한 단일기선으로 타원체고를 산출할 경우에는 고정된 기지점에 따라 타원체고 산출 정확도가 달라지기 때문에 다수의 기지점을 사용한 다중기선 처리를 수행하여 안정성을 확보할 필요가 있다고 사료된다. 위성궤도력의 종류가 타원체고 정확도에 미치는 영향은 수 mm 수준으로 미소하나 높은 정확도를 요구하는 GNSS 높이측량의 경우에는 정밀궤도력을 사용하여 신뢰도를 높여야 할 것으로 사료된다.

GNSS 정지측량 및 KNGeoid13을 이용한 GNSS 기반 표고 산출 정확도 분석 결과는 다음과 같다. 기존의 타원체고와 지오이드 모델을 직접 적용하여 표고를 결정하는 방법은 평균적으로 수 cm 수준의 오차를 갖는 것으로 나타났으나, 보정타원

체고를 이용한 방법을 적용할 경우에는 오차의 평균이 0.4cm 이하로 나타났다. 따라서 GNSS 정적상대측위 방법으로 데이터 처리하는 경우에 보정타원체고를 사용하면 지역적인 수직 기준과 지오이드 모델 간에 편차가 제거되어 정확한 GNSS 기반 표고를 계산할 수 있다. 또한 보정타원체고를 이용할 경우에는 1일 4시간씩 2일간 관측할 경우에는 전체 데이터의 95%가 4cm 이하의 오차를 보이며, 1일 4시간 및 2시간씩 관측할 경우에는 5cm 이하의 오차를 갖는 표고를 결정할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 30분으로 상대적으로 관측 시간이 짧은 경우에도 모호수가 고정되면 10cm 이하의 오차를 갖는 표고를 결정할 수 있을 것으로 판단되었다. 이와 같이 관측 시간과 GNSS 기반 표고 결정 방법 등을 고려하여 정확도 분석을 수행한 바 본 연구를 통해 산출된 결과는 향후 공공수준점측량에 GNSS 높이측량을 적용하기 위한 기반자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 단, 보정타원체고 방법을 적용하더라도 기지점들 간에 표고 성과가 일관성이 결여된 지역에서는 다른 지역에 비해 상대적으로 낮은 정확도를 나타낼 수 있기 때문에 보다 정밀한 GNSS 기반 표고를 결정하기 위해서는 통합기준점의 표고 성과에 대한 검증이 반드시 수반되어야 할 것으로 판단되며, 나아가 신뢰할 수 있는 자료를 구축함으로써 합성 지오이드 모델을 정밀도를 향상시키는 것이 필요하다고 사료된다.

References

- GSI (2014), *Guidelines for Establishing GNSS-Derived Orthometric Heights*, GSI Publication A1-No.368, Geospatial Information Authority of Japan, Tsukuba, Japan, pp. 5-22. (in Japanese)
- Henning, W.E., Carlson, E.E., and Zilkoski, D.B. (1998), Baltimore County, Maryland, NAVD 88 GPS-derived orthometric height project, *Surveying and Land Information Systems*, Vol. 58, No. 2, pp. 97-113.
- IGS (2009), GPS satellite ephemerides / satellite & station clocks, *IGS Central Bureau*, Pasadena, USA, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (last date accessed: 11 October 2014).
- Kwon, C.O., Jeong, W.S., and Lee, Y.J. (2008), Accuracy of orthometric heights of public BM by using GPS/levelling, *Journal of the Korean Cadastre Information Association*, Vol. 6, No. 1, pp. 257-265. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S., Kwon, J.H., Baek, K.M., and Moon, J.Y. (2012), Development of Korean geoid model and verification of its precision, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 30, No. 5, pp. 493-500. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.S., Kwon, J.H., Keum, Y.M., and Moon, J.Y. (2011), The update of Korean geoid model based on newly obtained gravity data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 29, No. 1, pp. 81-89. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.B. (2013), Accuracy evaluation of the height determined by Network-RTK VRS positioning, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 21, No. 4, pp. 55-63. (in Korean with English abstract)
- NGS (1998), *National Height Modernization Study*, Report to Congress, U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Rockville, MD, USA, pp. 123-140.
- NGII (2011), *A Study on the Development Plan of Precision Geoid Model in Korea*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, Korea, pp. 30-32. (in Korean)
- NGII (2013), *Construction of Precision Geoid Model in Korea*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, Korea, pp. 20-28. (in Korean)
- Park, J.K. and Jung, K.Y. (2014), Accuracy evaluation of orthometric heights from GNSS measured heights Using KNGeo13 model, *2014 Conference of The Korean Society for GeoSpatial Information System*, KOGSIS, 15-16 May, Jeju, Korea, pp. 87-88. (in Korean)
- Zilkoski, D.B. (1993), *NGS/Caltrans San Diego GPS-Derived Orthometric Heights Cooperative Project*, NGS Project Report, Silver Spring, MD, USA, pp. 80-116.
- Zilkoski, D.B., Carlson, E.E., and Smith, C.L. (2008), *Guidelines for Establishing GPS-Derived Orthometric Heights*, NOAA Technical Memorandum NOS NGS-59 Version 1.5, National Geodetic Survey, Silver Spring, MD, USA, pp. 1-19.
- Zilkoski, D.B. and D'Onofrio, J.D. (1996), Geodetic phase of NOS' San Francisco Bay demonstration project, *GIS/Lis '96 Annual Conference and Exposition Proceedings*, ASPRS, 19-21 November, Denver, CO, USA, pp. 116-127.

Zilkoski, D.B., D'Onofrio, J.D., and Frakes, S.J. (1997), *Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoidal Heights (Standards: 2 and 5cm)*, NOAA Technical Memorandum NOS NGS-58 Version 4.3, National Geodetic Survey, Silver Spring, MD, USA, pp. 1-20.