

공공기준점을 이용한 GNSS 높이측량 정밀도 분석 연구*

원두건¹ · 최윤수^{2*} · 윤하수³ · 이원종⁴

A Study on the Accuracy of GNSS Height Measurement Using Public Control Points*

Doo-Kyeon WON¹ · Yun-Soo CHOI^{2*} · Ha-Su YOON³ · Won-Jong LEE⁴

요 약

정밀지오이드를 구축하기 위하여 육상, 해상, 항공, 위성 증력측정 방법으로 다양화되고 측정 기술이 발전되어 고해상도 고정밀도의 증력자료 확보가 가능해졌다. 정밀지오이드의 구축은 별도의 수준측량 없이 GNSS 측량을 통해 표고를 빠르고 편리하게 결정할 수 있으며 우리나라는 2014년부터 국토지리정보원에서 GNSS를 기반으로 한 높이측량 정확도를 향상시키기 위해 합성지오이드 모델을 개발하고 있다. 본 연구에서는 공공측량의 GNSS 높이측량을 검증하기 위하여 기존의 고시된 공공기준점을 선점하여 GNSS 높이측량 결과와 비교 분석하였다. 실험은 연구보고서 등에서 정밀도가 낮은 지역으로 제시되거나 정밀도가 낮을 것으로 예상되는 연안, 접경, 산악지형의 공공기준점에 대하여 GNSS 높이측량을 수행하고 정밀도를 분석하였다. GNSS 높이측량 검증을 위해 공공기준점 GNSS 높이측량 기지점으로 사용될 주변 통합기준점의 GNSS 타원체고를 점검하였다. 점검된 통합기준점을 기준으로 공공기준점의 GNSS 타원체고를 산출하고 KNGeoid18 모델을 이용하여 표고를 계산하여 직접수준측량 표고결과와 비교하였다. 분석 결과 연안, 접경, 산악 지역 공공기준점의 GNSS 높이측량 결과가 3·4급 공공수준측량 정확도에 만족하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 사용자가 요구하는 높이 정확도에 따라 기존의 직접수준측량보다 GNSS 높이측량이 효율적으로 이용될 수 있으며, KNGeoid18도 자율주행자동차, 무인항공기 등 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 합성지오이드모델, GNSS 높이측량, 공공기준점, 수준측량

2021년 06월 01일 접수 Received on June 01, 2021 / 2021년 06월 15일 수정 Revised on June 15, 2021 / 2021년 06월 15일 심사완료 Accepted on June 15, 2021

* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었으며(과제번호 21NSIP-B145070-04), 국토지리정보원에 위탁받은 공간정보품질관리원 성과심사의 재원으로 데이터를 지원받아 수행된 기초연구임

1 서울시립대학교 공간정보공학과 공학석사 M.D, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul

2 서울시립대학교 공간정보공학과 교수 Professor, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul

3 국토교통부 국토지리정보원 연구사 Researcher, National Geographic Information Institute

4 서울시립대학교 공간정보공학과 연구원 Research Engineer, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul

* Corresponding Author E-mail : choiys@uos.ac.kr

ABSTRACT

In order to construct a precision geoid, it has been diversified into land, sea, aviation, and satellite gravity measurement methods, and measurement technology has developed, making it possible to secure high-resolution, high-precision gravity data. The construction of precision geoids can be fast and conveniently decided through GNSS surveys without separate leveling, and since 2014, the National Geographic Information Institute has been developing a hybrid geoid model to improve the accuracy of height surveying based on GNSS. In this study, the results of the GNSS height measurement were compared and analyzed choosing existing public reference points to verify the GNSS height measurement of public surveys. Experiments are conducted with GNSS height measurements and analyzed precision for public reference points on coastal, border, and mountainous terrain presented as low-precision areas or expected-to-be low-precision in research reports. To verify the GNSS height measurement, the GNSS ellipsoid height of the surrounding integrated datum to be used as a base point for the GNSS height measurement at the public datum. Based on the checked integrated datum, the GNSS ellipsoid of the public datum was calculated, and the elevation was calculated using the KNGeoid18 model and compared with the results of the direct level measurement elevation. The analysis showed that the results of GNSS height measurement at public reference points in the coastal, border, and mountainous areas were satisfied with the accuracy of public level measurement in grades 3 and 4. Through this study, GNSS level measurement can be used more efficiently than existing direct level measurements depending on the height accuracy required by users, and KNGeoids 18 can also be used in various fields such as autonomous vehicles and unmanned aerial vehicles.

KEYWORDS : Hybrid Geoid Model, GNSS Height Survey, Public Control Point, Levelling

서론

GNSS를 이용한 높이측량은 기존의 수준원점을 기준으로 표고를 알고 있는 곳에서 관측한 GNSS자료와 국토지리정보원에서 제공하는 합성 지오이드 모델을 사용하여 표고를 결정하는 방법을 의미한다. 구체적으로 GNSS 측량을 통해 타원체 기반으로 한 타원체고를 계산하고, 정밀하게 구축된 지오이드 모델로부터 계산된 지오이드를 이용하여 표고를 결정하는 기술이다(NGII, 2019).

합성 지오이드 모델은 국가 수직기준을 정립하고 GNSS 높이측량의 효율성을 목적으로 개발되었으며, 현재는 2017년에 개발된 KNGeoid18

모델이 사용되고 있다. KNGeoid18 모델은 고정밀 합성 지오이드 모델로 2008년부터 2017년까지 통합기준점, 수준점, 삼각점 및 위성기준점의 육상중력자료와 2009년에서 2010년까지의 항공중력자료, 국립해양조사원의 선상중력자료와 DTU10 위성고도계자료, 범지구중력장 모델로는 XGM2016 모델이 적용되어 적합도는 약 $\pm 2.3\text{cm}$ 이다(NGII, 2018)

본 연구는 GNSS 높이측량 성과와 합성 지오이드 모델을 이용하여 공공기준점의 표고를 산출하고 고시성과 또는 직접 수준측량 결과와 비교하여 공공기준점의 GNSS 높이측량의 정밀도와 3·4급 공공수준점측량의 타당성을 분석하였다.

합성 지오이드 모델의 정밀도를 분석한 선행

연구로 Shin *et al.*(2014)은 GNSS 측량과 KNGeoid13을 이용하여 GNSS 기반의 표고 정밀도를 분석하고, 지역적 편의를 제거하는 방법으로 보정타원체고 결정방법을 제시하였다. 그리고 GNSS 관측 시간에 따라 산출 가능한 표고의 정확도를 분석하였다. Lee *et al.*(2017)은 산악지 표고 결정에 지오이드 기술의 활용성을 분석하기 위하여 지리산 일원에 GNSS 관측을 시행하고 KNGeoid14를 이용하여 정표고를 분석하였다. 분석 결과 $\pm 7.1\text{cm}$ 의 정표고 차이가 발생하였으며, 이러한 결과는 1/1,000이하 축척의 항공사진측량에 필요한 지상의 표고기준점으로 사용 가능성을 확인하였다. Jung *et al.*(2018)은 수준단절지역에서 GNSS 높이측량의 신뢰성 확보를 위하여 기지점 배치, 관측시간 등을 분석하였다. GNSS 높이측량 선행연구를 분석한 결과 대부분 국가기준점을 이용하여 합성지오이드모델과 GNSS 높이측량 정밀도를 분석하였으며, 분석에 사용된 합성지오이드 모델 중 KNGeoid18을 이용한 연구가 미미한 것으로 조사되었다. 이에 본 연구의 차별성으로 GNSS 높이측량 가이드라인의 대상인 공공기준점과 KNGeoid18를 이용하여 GNSS 높이측량을 정밀도를 분석하였으며, 선행연구를 통해 GNSS 높이측량 정밀도가 낮을 것으로 예상되는 내륙·산악·연안·접경 지역에 대하여 GNSS 높이측량 결과를 분석하였다.

본 론

1. GNSS 높이측량의 개념

국토지리정보원에서는 공공측량에 대하여 직접수준측량으로 실시하던 작업 방법을 GNSS 높이측량 방식으로도 할 수 있도록 공공측량 작

업규정을 개정하였다(NGII, 2019). 주요 개정 내용으로는 공공수준점측량과 지상현황측량 등의 높이 측량방식에 GNSS 높이측량을 적용할 수 있도록 개선하였으며, GNSS 높이측량과 관련된 편을 신설하였다. 2020년 1월 GNSS 높이측량 가이드라인에 따르면 GNSS 정지측량을 통해 3cm, 5cm 정확도의 표고를 결정하는 표준작업방법과 네트워크 RTK 측량을 통해 10cm 정확도의 표고를 결정하는 방법이 기술되어 있다.

GNSS 높이측량은 3단계로 나누어진다. 1단계는 기지점의 위도, 경도를 이용하여 합성 지오이드 모델로부터 지오이드고를 계산하고, 기지점의 고시된 표고에 더하여 기지점의 보정타원체고를 계산한다. 2단계에서는 기지점의 위도, 경도와 1단계에서 계산된 보정타원체고를 이용하여 상대측위 방법으로 미지점의 위도, 경도, 보정타원체고를 계산한다. 3단계에서는 미지점의 위도, 경도를 이용하여 합성 지오이드 모델로부터 지오이드고를 계산하고, 미지점의 보정타원체고와 지오이드고를 빼서 표고를 결정한다(NGII, 2019).

GNSS 높이측량의 적용범위는 국토지리정보원에서 제공하는 합성 지오이드 모델을 적용할 수 있는 지역에 한하며, 표고 정확도 3cm의 경우 3급 공공수준점 측량, 정확도 5cm의 경우 4급 공공수준점측량에 적용한다. KNGeoid18의 적용 범위는 위도 33도에서 39도와 경도 124도에서 132도에 적용이 가능하다. 표 1은 정확도에 따른 GNSS 관측방법을 나타낸 것이다. 본 연구의 정밀도 실험은 표고 정확도 5cm인 4급 공공수준점 측량의 기준을 적용하였으며, GNSS 측량은 2시간 이상 관측하여 GNSS 성과를 산출하였다.

TABLE 1. Classification of GNSS survey by accuracy

Accuracy	3cm	5cm
Observation Day	2 days	1 day
Observation time	More than 4 hours	More than 2 hours
Data interval	30 seconds or less	15 seconds or less
Remark	Two-day observation should take into account the satellite geometries.	

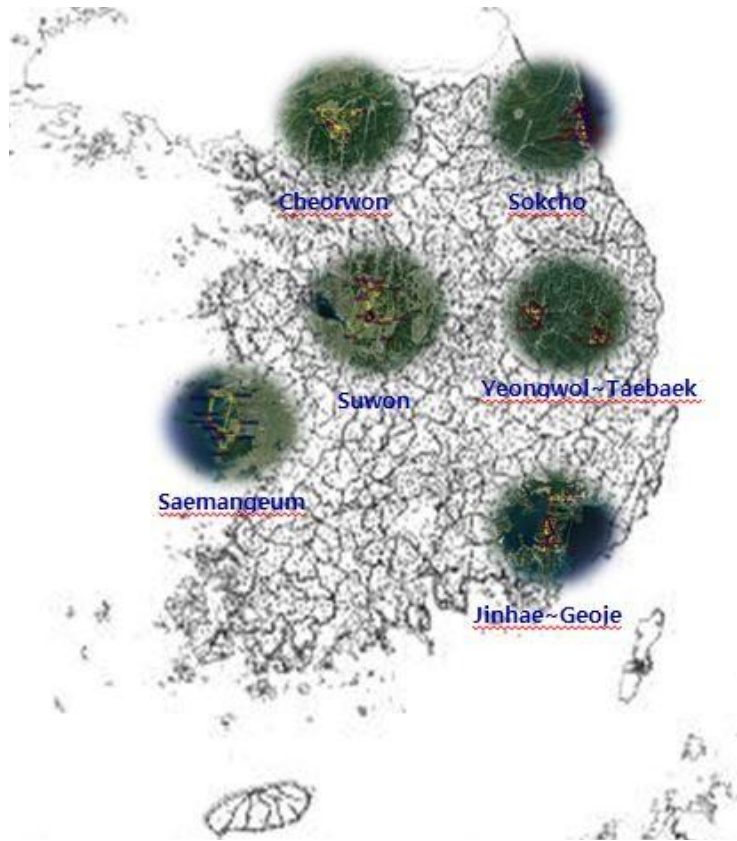


FIGURE 1. Study area

2. 연구대상지

본 연구의 대상지는 크게 내륙지역, 연안지역, 산악지역, 접경지역으로 구분하여 연구를 진행하였고 그림 1은 전체 연구지역을 나타낸 그림이다. 내륙지역은 GNSS 높이측량 실험 방법을 검토하기 위해 수행하였으며, 경사가 완만한 수

원의 공공기준점에 대하여 KNGeoid18 합성 지오이드모델의 정밀도를 분석하였다.

연안·산악·접경지역을 연구 대상지로 선정하 이유는 내륙의 평지, 도심지와 비교하여 위성기준점의 배치 및 중력자료와 GPS/Leveling 자료의 밀도가 낮으며, 기존 연구에서 지오이드 정밀

TABLE 2. Research area and number of public control point

Research area		No. of public control point
Inland area	Suwon	15
	Saemangeum	8
Coastal area	Sokcho	35
	Jinhae~Geoje	65
Mountainous area	Yeongwol~Taebaek	18
Border Line area	Cheorwon	30
Total		172

도가 낮은 지역으로 제시되어 연구대상지로 선정하였다. 연안지역의 경우 새만금, 속초, 진해-거제 3곳의 공공기준점을 대상으로 KNGeoid18의 정밀도 검증을 수행하였다. 산악지역은 영월과 태백지역의 공공기준점을 이용하여 KNGeoid18 정밀도를 분석하였으며, 영월과 태백의 경우 2014년 지오이드 연구개발 사업 이후 삼각점의 중력데이터가 추가되어 지오이드 정밀도가 개선된 지역으로 제시되어 연구대상지로 선정하였다(NGII, 2018a). 접경지역의 경우 철원의 공공기준점을 이용하였는데, 기존 연구에서 접경지역은 북한과 인접하여 중력측정이 어려워 지오이드 정밀도가 낮은 곳으로 분석되었다(NGII, 2014). 표 2는 연구대상지와 분석에 이용한 공공기준점의 개수를 정리한 것이다.

3. 연구 방법

공공기준점 GNSS 높이측량 정밀도 비교분석의 기지점 선점을 위해 분석 대상 지역 주변 위성기준점을 이용하여 주변 통합기준점(국가기준점)에 대하여 보정타원체고를 산출하고 검증하였다. 기지점으로 선택된 통합기준점의 보정타원체고를 이용하여 공공기준점과 지역망을 구성하여 공공기준점의 표고 값을 산출하였다. 선점 대상인 공공기준점 표고의 정밀도를 검증하기 위하여 공공측량 심사가 완료되고, 공공수준측량 2급 정밀도로 수행된 직접수준측량 자료를 이용하였다. 사용된 공공기준점은 총 172점으로 GNSS 타원체고를 산출하기 위하여 공공기준점을 2시간 이상 관측하고 GNSS 데이터를 처리하였다. 관측 장비로 Trimble R8, Leica GS-08PLUS 장비를 사용하였으며, GNSS 자료처리는 상용소프트웨어인 Trimble Business Center 3.01과 Leica Geo Office v8.3을 이용하여 GNSS 성과를 산출하였다. GNSS 관측과 자료처리는 국토지리정보원의 GNSS 높이측량 작업규정을 준용하였다.

자료처리 세부사항으로 위성케도력은 IGS 정밀케도력(precise ephemerides)을 이용하였으며, 기선해석 기법은 이중차 다중 고정해(Double

Difference Ambiguity-Fixed Solution)를 적용하였으며, 특히 기선의 최소해에 대한 양호도(Quality) 지표와 기선의 환폐합(Loop Closure) 등으로 불량기선을 점검하였다. 그리고 자료처리 프로그램에서 제공하는 기선해석보고서, 백터 보고서, Loop 폐합 보고서 등을 기반으로 중복기선 비교 및 폐합차에 대한 점검과 망조정을 이용하여 최종 GNSS 성과를 산출하였다. 그리고 GNSS 높이측량 가이드라인을 이용하여 보정타원체고를 산출하여 공공기준점의 표고를 결정하였다.

공공기준점의 표고 검증에 사용된 수준측량은 Trimble Dini12 장비를 이용하였으며, 결합노선 방식과 환·폐합 방식으로 심사된 성과를 이용하거나 2급 공공수준측량 고시된 성과를 이용하였다. 수준측량 정밀도 검사는 왕·복 수준측량 결과와 교차를 점검하고, 거리에 따른 보정량을 계산하여 지반고를 산출하였다. 식 1은 결합노선방식의 2급 수준측량 허용오차 계산방식이며, 식 2는 환·폐합방식의 2급 수준측량 허용기준 식이다.

$$\begin{aligned} & \text{2급 수준측량 허용기준(결합노선방식)} \\ & 15\text{mm} \times \sqrt{S} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{2급 수준측량 허용준(환·폐합 노선방식)} \\ & 5\text{mm} \times \sqrt{S} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 S 는 관측거리(편도)km 단위이다.

실험결과

1. 내륙지역

1) 내륙지역의 GNSS 보정타원체고 검토
내륙지역의 GNSS 보정타원체 검토는 수원 지역의 통합기준점에 대하여 KNGeoid18모델의 정밀도를 산출하였다. 실험 대상지역은 비교적 경사가 완만한 곳으로 선정하였으며, 본 연구의 방법을 검증하기 위해 정밀도가 좋을 것으로 예상되는 내륙지역을 우선적으로 실험하였다. 그

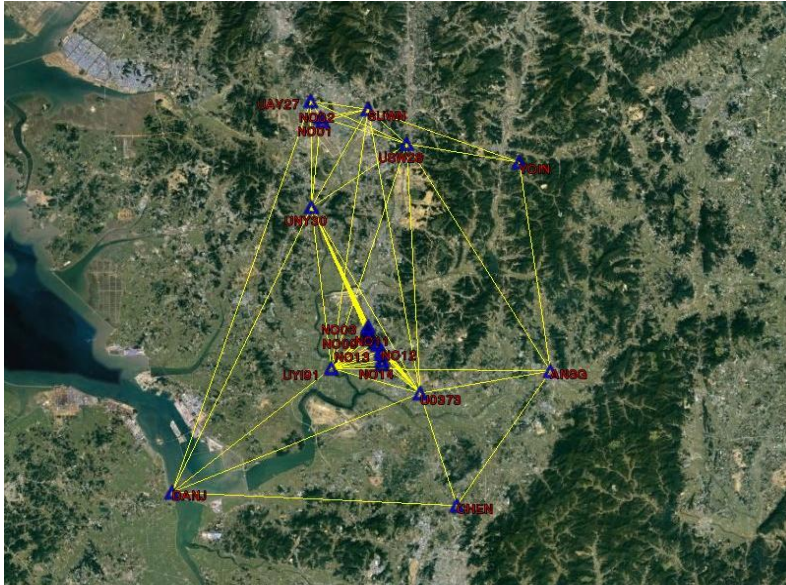


FIGURE 2. Suwon network(Inland area)

TABLE 3. Verification of adjusted ellipsoid heights - Inland (unit : m)

Area	Control point	Adjusted ellipsoidal height(A)	Official ellipsoidal height(B)	A-B
Suwon	U0373	39.721	39.705	0.016
	UAY27	64.224	64.202	0.021
	UNY30	41.909	41.919	0.010
	USW28	72.580	72.567	0.013
	UY191	30.030	30.038	0.009

림 2는 수원지역의 위성기준점, 통합기준점, 공공기준점의 망을 나타낸 그림이다.

기지점으로 사용될 통합기준점의 보정타원체고를 검증하기 위하여 실험 대상지 주변의 위성기준점을 이용하여 5점의 통합기준점의 보정타원체고를 계산하고 고시된 타원체고와 비교한 결과는 표 3과 같다. 검토결과 평균 1.4cm, 표준편차 0.5cm의 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 공공기준점 GNSS 높이측량 실험에 사용할 수 있는 기지점으로 판단되었다.

2) 내륙지역 공공기준점 표고 정밀도 분석

타원체고가 검증된 통합기준점을 이용하여 주변 15점의 공공기준점의 GNSS 높이측량과

KNGeoid18을 이용하여 표고를 산출하였다. 산출된 표고와 성과심사가 완료된 표고의 차이는 표 4와 같으며 공공수준점의 고시성과와 GNSS 높이측량의 차이가 평균 2cm, 표준편차 1.4cm, 최대 잔차가 5.3cm로 1일 2시간 이상의 GNSS 측량으로 3급과 4급 공공수준측량 작업규정에 적합한 결과가 도출되었다. 이를 통해 공공수준점측량의 KNGeoid18모델 적용 결과에 대하여 정밀도를 확인하였으며, 연안과 산지 등 다른 연구대상지에 대한 연구 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 연안지역

1) 연안지역의 GNSS 보정타원체고 검토

TABLE 4. GNSS height survey result of public control points – Suwon(Inland)(unit : m)

Station	Official height	GNSS height	Residual	Station	Official Height	GNSS height	Residual
No.1	32.459	32.451	0.008	No.9	19.366	19.313	0.053
No.2	32.351	32.348	0.003	No.10	36.962	36.921	0.041
No.3	20.867	20.862	0.005	No.11	24.808	24.783	0.025
No.4	20.824	20.808	0.016	No.12	21.994	21.968	0.026
No.5	19.165	19.165	0.000	No.13	17.840	17.815	0.025
No.6	20.672	20.655	0.017	No.14	12.343	12.311	0.032
No.7	17.969	17.950	0.019	No.15	12.803	12.785	0.018
No.8	17.669	17.656	0.013	Residual average	0.020	Standard deviation	0.014
				Residual max	0.053	Residual min	0.000

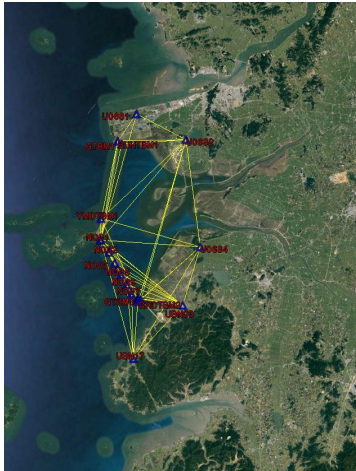


FIGURE 3. Saemangeum



FIGURE 4. Sokcho

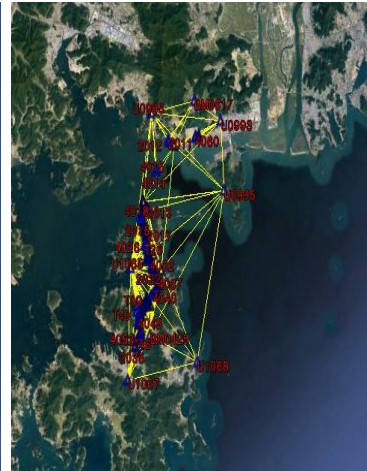


FIGURE 5. Jinhae-Geoje

국토지리정보원 보고서에 따르면 연안지역은 GNSS/Leveling 자료의 분포가 낮은 지역으로 내륙지역과 비교 하였을 때 상대적으로 기준점 GNSS 높이 성과의 정밀도가 낮을 수 있다 (NGII, 2018a). 연안지역의 경우 GNSS 위성 기준점의 배치가 내륙지역과 비교하여 기하적인 조건이 좋지 않은 경우가 발생할 수 있다. 구체적으로 내륙지역은 측량을 수행하는 지역에 대한 위성기준점망을 폐합할 수 있지만 연안지역의 경우 폐합이 안되는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 공간적 특징으로 본 연구에서는 새만금, 속초, 진해~거제 세 곳의 공공기준점에

대한 KNGeoid18의 정밀도를 분석하였다. 구체적으로 그림 3은 새만금지역의 기준점 배치를 나타낸 그림이며, 간척지로 연륙교 및 도로공사 등 주변 지역과의 연결과 지반 침하 등에 발생할 수 있다. 그림 4는 속초지역이며, 인천의 수준원점에서 태백산맥을 넘는 과정에서 직접 수준측량의 오차가 전파될 수 있다. 그림 5는 진해 거제 지역으로 연구에 선정된 지역은 수준단절지역으로 직접수준 측량 시 낮은 정확도가 산출 될 수 있는 지역이다.

기지점으로 사용될 통합기준점의 타원체고 분석을 위하여 통합기준점의 보정타원체고를 산출

TABLE 5. Verification of adjusted ellipsoid heights – Coastal area (unit : m)

Coastal area	Control point	Adjusted ellipsoidal height(A)	Official ellipsoidal height(B)	Residual (A-B)
Saemangeum	U0679	34.707	34.654	0.053
	U0681	30.674	30.659	0.015
	U0682	29.011	29.030	0.019
	U0684	27.972	27.968	0.004
	UBN03	29.494	29.516	0.023
	UBN17	27.797	27.790	0.007
	U0004	48.851	49.040	0.189
Sokcho	U0042	204.197	204.205	0.008
	U0678	76.358	76.357	0.001
	U0985	139.240	139.243	0.003
Jinhae-Geoje	U0993	31.944	31.934	0.010
	U0995	36.903	36.831	0.072
	U1065	46.929	46.950	0.021
	U1067	75.445	75.473	0.028
	U1068	98.853	98.875	0.022

하고 결과를 분석하였다(표 5). 새만금 지역 국가기준점의 GNSS 보정타원체고를 점검한 결과 6점 중 5점이 기지점으로 사용 가능한 것으로 나타났으며, 속초는 3점 중 2점, 진해와 거제도 6점 중 5점의 통합기준점이 기지점으로 이용할 수 있었다. 공공기준점 GNSS 높이 산출에 기지점으로 사용될 12점의 통합기준점 보정타원체고와 고시성과와의 높이 차이의 잔차 평균은 약 1.3cm, 표준편차는 0.9cm로 안정적으로 나타났다. 세 지역에서 잔차가 크게 발생하여 기지점으로 사용하기 어려운 점에 대해서는 향후 주변 환경 등의 원인 조사가 필요한 것으로 판단된다.

2) 연안지역의 공공기준점 표고 정밀도 분석
연안지역 세 곳의 108점의 공공기준점을 GNSS 높이 성과와 KNGeoid 18을 이용하여

산출한 표고의 분석 결과는 표 6과 같다. 고시된 표고와 계산된 표고의 잔차는 평균 -0.4cm의 차이가 발생하였으며, 새만금 지역에서 평균 -2.4cm가 발생하였다. 잔차의 표준편차는 2.3cm로 나타났으며, 새만금 지역에서 최대 3.5cm로 계산되었다. 결과적으로 KNGeoid18을 이용한 연안지역의 공공기준점 GNSS 높이측량은 3급, 4급 공공수준측량이 가능하다고 판단되었다. 향후 새만금 지역에 대하여 더 많은 공공기준점 표본 조사가 필요하다.

그림 6은 연안지역에 공공기준점 108점에 대한 고시성과와 KNGeoid18을 이용한 GNSS 높이 성과의 잔차 정도를 구분한 것으로, 계급을 5mm 간격으로 구분한 도수분포표이다. 연안지역 공공기준점 대부분이 -2.5cm에서 +2.5cm에 분포하는 것으로 나타났으며, 108점 중 약 88% (95점)가 -2.5~2.5cm 구간에 속하여 연안지역

TABLE 6. GNSS height survey result of public control points – Coastal area (unit : m)

Official height -GNSS height	No. Public control point	Residual average	Residual Standard deviation	Residual Max	Residual Min
Saemangeum	8	-0.024	0.035	0.020	-0.065
Sokcho	35	0.004	0.018	0.052	-0.043
Jinhae-Geoje	65	-0.006	0.022	0.100	-0.053
Total	108	-0.004	0.023	0.100	-0.065

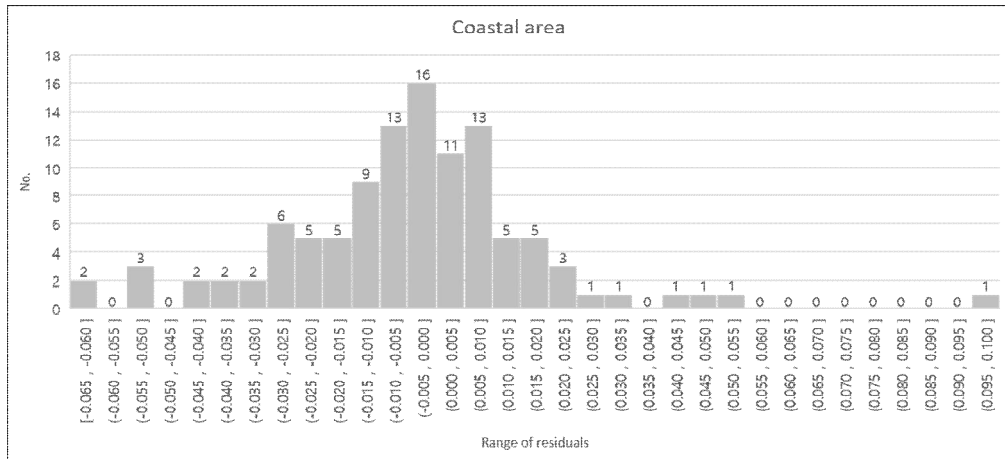


FIGURE 6. GNSS height survey result of public control points - Coastal area

에 대한 KNGeoid18의 정밀도가 높은 것을 확인할 수 있다.

3. 산악지역

1) 산악지역의 GNSS 보정타원체고 검토

산악지역의 경우 GNSS/Leveling 자료의 분포가 낮으며, 직접 수준측량이 평지보다 어려워 정밀도가 낮은 곳으로 알려져 있다. 국토지리정보원 18년 연구에 의하면 산악지역 오차는 평균 10cm, 표준편차 2.58cm로 조사되었으며(NGII, 2018a), 2014년부터 표고 성과와 지오이드 정

밀도를 높이기 위해 산악지역에 위치한 삼각점 등에 중력측량을 수행하였다. 산악지역의 합성 지오이드 모델 정밀도와 GNSS 높이측량 결과를 확인하기 위하여 직접수준측량이 이루어진 공공기준점을 활용하여 KNGeoid18 모델을 정밀도를 분석하였다. 연구 지역은 강원도 영월과 태백 산악지역의 공공기준점 19점을 이용하였다. 그림 7은 영월과 태백지역의 GNSS 망을 나타낸 그림이다.

앞의 실험과 같이 산악지역의 기지점으로 활용할 수 있는 통합기준점의 보정타원체고를 산

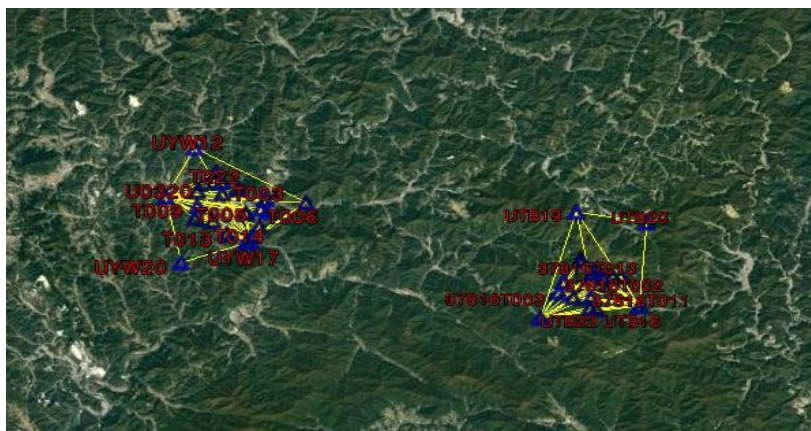


FIGURE 7. Yeongwol-Taebaek network(Mountainous area)

TABLE 7. Verification of adjusted ellipsoid heights – Mountainous area (unit : m)

Area	Control point	Adjusted ellipsoidal height(A)	Official ellipsoidal height(B)	A-B
Yeongwol	UYeongwol12	243.096	243.087	0.009
	UYeongwol17	226.454	226.456	0.002
	UYeongwol20	340.858	340.858	0.000
	UYemi22	277.756	277.749	0.007
	U0320	233.248	233.235	0.013
Taebaek	UTaebaek16	851.619	851.626	0.007
	UTaebaek19	830.882	830.906	0.024
	UTaebaek20	896.059	896.061	0.002
	UTaebaek22	515.626	515.708	0.082

TABLE 8. GNSS height survey result of public control points – Mountainous area (unit : m)

Taebaek	Official height	GNSS height	Residual	Yeongwol	Official Height	GNSS height	Residual
NO.1(T)	951.131	951.201	-0.070	NO.1(Y)	240.802	240.842	-0.040
NO.2(T)	724.412	724.436	-0.024	NO.2(Y)	200.279	200.285	-0.006
NO.3(T)	464.756	464.749	0.007	NO.3(Y)	314.124	314.111	0.013
NO.4(T)	641.517	641.522	-0.005	NO.4(Y)	200.238	200.184	0.054
NO.5(T)	643.665	643.657	0.008	NO.5(Y)	207.112	207.098	0.014
NO.6(T)	669.076	669.054	0.022	NO.6(Y)	209.306	209.275	0.031
NO.7(T)	681.359	681.353	0.006	NO.7(Y)	238.182	238.205	-0.023
NO.8(T)	568.348	568.329	0.019	NO.8(Y)	267.169	267.136	0.033
NO.9(T)	605.230	605.216	0.014	Residual average	0.004	Standard deviation	0.029
NO.10(T)	604.568	604.546	0.022	Residual max	0.054	Residual min	-0.070

출하고 고시성과와 결과를 비교·분석하였다(표 7). 영월 5점, 태백 4점의 통합기준점의 타원체고를 분석한 결과 태백의 통합기준점 1점(U태백22)을 제외하고 공공기준점 표고 성과산출을 위한 기지점으로 사용이 가능하였다. 총 9점의 통합기준점 중 1점을 제외한 8점의 통합기준점 GNSS 보정타원체고와 고시성과의 잔차는 평균과 표준편차 모두 1cm 미만으로 안정적으로 나타났다.

2) 산악지역의 공공기준점 표고 정밀도 분석
 산악지역의 공공기준점 GNSS 높이측량의 정밀도를 분석한 결과는 표 8과 같다. 산출된 18개 공공기준점의 GNSS 높이결과와 성과심사가 완료된 표고의 차이는 표 8과 같으며 잔차가 평균 0.4cm, 표준편차 2.9cm, 최대 잔차가 5.4cm,

최소 잔차가 -7.0cm로 1일 2시간 이상의 GNSS 측량으로 산악지역에서 3급과 4급의 공공수준 측량 작업규정에 적합한 결과가 도출되었다.

4. 접경지역

1) 접경지역의 GNSS 보정타원체고 검토

접경지역의 경우 군 관련 시설과 국가 보안 등으로 기준점의 설치 제한이 많으며, 항공중력 등 중력관측의 제약이 많은 지역이다. 그리고 연안지역과 같이 위성기준점의 분포도 지역적으로 폐합이 어려울 수 있어 연구대상지로 선정하였다. 접경지역 대상지는 철원지역으로 공공기준점 30점의 정밀도를 분석하였다. 그림 8은 철원지역에서 실험한 망을 나타낸 그림이다.

철원지역 GNSS 높이측량 기지점으로 사용되는 8점의 통합기준점의 보정타원체고를 점검하

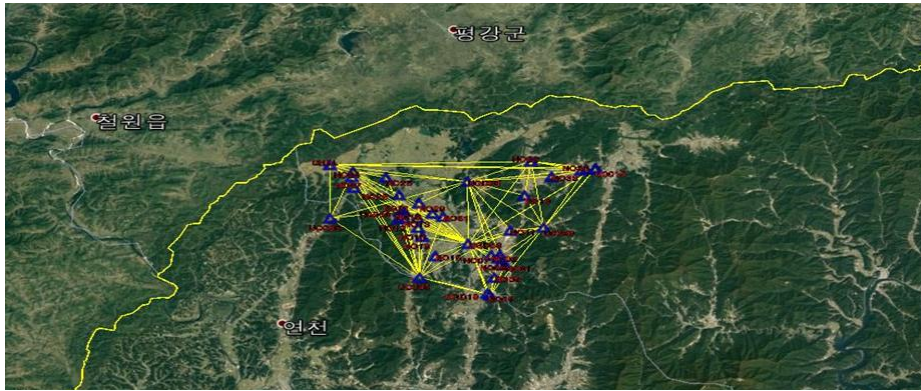


FIGURE 8. Cheorwon network(border area)

TABLE 9. Verification of adjusted ellipsoid heights – Border area (unit : m)

Area	Control point	Adjusted ellipsoidal height(A)	Official ellipsoidal height(B)	A-B
Cheorwon	U0009	212.529	212.535	-0.006
	U0015	233.616	233.632	-0.016
	U0020	227.778	227.747	0.031
	UCC03	144.591	144.617	-0.026
	UCC49	178.230	178.197	0.033
	UGD03	195.975	195.96	0.015
	UGD04	210.473	210.483	-0.010
	UGD19	174.070	174.045	0.025

TABLE 10. GNSS height survey result of public control points – Border area (unit : m)

Cheorwon	Official height	GNSS height	Residual	Cheorwon	Official Height	GNSS height	Residual
NO01	148.887	148.875	0.012	NO21	188.435	188.437	-0.002
NO02	161.346	161.355	-0.009	NO22	200.083	200.053	0.030
NO03	154.796	154.786	0.010	NO23	190.555	190.563	-0.008
NO04	140.754	140.769	-0.015	NO24	196.850	196.857	-0.007
NO05	159.727	159.724	0.003	NO25	209.785	209.777	0.008
NO06	145.088	145.095	-0.007	NO26	196.393	196.379	0.014
NO07	144.656	144.641	0.015	NO27	151.460	151.440	0.020
NO10	212.273	212.247	0.026	NO28	190.875	190.856	0.019
NO11	167.747	167.787	-0.040	NO29	188.726	188.747	-0.021
NO12	202.645	202.662	-0.017	NO30	206.880	206.876	0.004
NO14	183.274	183.251	0.023	NO31	178.594	178.608	-0.014
NO15	178.783	178.791	-0.008	NO32	208.937	208.948	-0.011
NO16	189.904	189.917	-0.013	NO33	204.414	204.455	-0.041
NO18	188.532	188.544	-0.012	NO34	207.338	207.355	-0.017
NO19	183.816	183.834	-0.018	Residual average	-0.0025	Standard deviation	0.0178
NO20	185.805	185.803	0.002	Residual max	0.030	Residual min	-0.041

었다. 타원체고 점검을 위해 주변의 위성기준점 4점을 활용하여 망구성을 하였고, 통합기준점의 보정타원체고를 산출하고 결과를 분석하였다(표 9). 분석 결과 통합기준점 8점 모두 공공기준점 표고 성과산출을 위한 기지점으로 사용이 가능한 정밀도가 산출되었다.

2) 접경지역의 공공기준점 표고 정밀도 분석

접경지역의 공공기준점 30점의 GNSS 측량과 KNGeoid18을 이용한 높이 결과는 표 10과 같다. KNGeoid18로 산출된 높이와 고시된 표고의 평균 0.25cm의 차이가 발생하였으며, 잔차의 표준편차는 1.8cm, 제일 크게 나타난 잔차는 3.0cm, 최소 잔차는 -4.1cm이다. 접경지역에 KNGeoid18을 이용한 GNSS 높이측량의 결과 3급, 4급 공공수준측량이 가능하다.

5. 종합분석

본 논문에서는 국가기준점만으로 점검이 이루어진 우리나라 최신 합성 지오이드 모델 KNGeoid18을 이용하여 공공기준점의 정밀도를 분석하였다. 연구대상 지역은 내륙과 위성기준점의 배치, GNSS/Leveling과 중력 자료의 밀도가 낮거나 직접수준측량이 어려운 연안, 산악, 접경 지역을 선정하여 공공기준점의 표고 정밀도를 분석하였다. 표 11은 내륙, 연안, 산악, 접경지역의 공공기준점 수준(고시)측량 성과와 GNSS 높이측량의 차이인 잔차를 정리한 표이다. 이와 같이 GNSS 높이측량과 KNGeoid18 합성지오이드모델을 이용한 공공기준점 표고 정밀도를 분석한 결과 연안, 산악, 접경지역의 경우에서 모두 현재 공공수준측량 3급, 4급 공공수준측량이 가능한 것으로 판단되었다. 실험에

이용된 GNSS 높이측량 결과는 1일 2시간 GNSS 관측 값을 이용하여 분석하였으므로, 3cm의 정확도를 위한 기준 관측시간 인 2일 관측에 1일 4시간 이상 GNSS 관측을 수행하면 더 좋은 높이 성과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 공공기준점 고시성과와의 정밀도 비교분석을 통하여 우리나라 최신 합성지오이드모델(KNGeoid18) 기반 GNSS 높이측량 가능성을 분석하였다. 분석은 연구 방법의 평가를 위해 평지이며 주변의 GNSS 위성기준점과 통합기준점의 배치가 적절한 내륙지역을 이용하여 검증하였고, 기존 보고서 등에서 합성지오이드 정밀도가 낮다고 제시되거나 정밀도가 낮다고 예상되는 연안, 접경, 산악지형의 공공기준점에 대한 GNSS 높이측량 표고를 산출하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국가기준점 배치가 균등한 내륙지역과 GNSS/Leveling 자료의 분포가 다소 낮거나 GNSS 위성기준점 배치가 내륙지역과 비교하여 기하적인 조건이 좋지 않은 경우에서도 일관성 있는 높이 성과가 나타났다. 합성지오이드모델(KNGeoid18) 기반 GNSS 높이측량의 가능성 분석을 위해 공공기준점 표고에 대한 고시성과와 GNSS 높이측량 성과를 비교하였다. 연안지역 표준편차는 2.3cm, 공공기준점(88%) 대부분이 -2.5cm~+2.5cm 구간에 분포하는 것으로 나타났다으며 나머지 연구지역에서도 약 3.0cm 이내의 표준편차 결과값이 도출되었다. 대부분의 공공기준점이 공공수준측량 정확도 3·4급에 정확도에 만족하는 결과를 가지게 되어 기존의


TABLE 11. GNSS height survey results by area

(umit : m)

Area	No. point	Residual average	Residual Standard deviation	Residual max	Residual min
Inland	15	0.020	0.014	0.053	0.000
Coastal	108	-0.004	0.023	0.100	-0.065
Mountainous	18	0.004	0.029	0.054	-0.070
Border	30	-0.003	0.018	0.030	-0.041

정확도가 낮을 것으로 예상되는 지역에서 GNSS 높이측량과 KNGeoid18의 활용이 가능할 것으로 나타났다.

둘째, GNSS 높이측량 방법으로 국가기준점에 보정타원체고를 계산하는 과정에서 연구지역 일부 기지점에 편차가 나타났다. 편차에 원인으로 연안지역은 국가기준점의 배치가 대부분 외삽한 지역이며, 고도차이가 큰 산악지에서는 직접수준측량 과정에서 높이 오차가 거리에 비례하여 정확도가 낮아진 결과로 예상되며, 향후 GNSS/Leveling과 중력 자료의 밀도가 낮은 지역에서 정밀한 보정타원체고를 산출하는 방법에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 또한 균일한 타원체고 성과를 위해 국가에서 규정을 보완하여 통일된 GNSS 관측과 처리 과정이 필요할 것으로 판단된다. 특히 공공측량은 많은 분야에서 다양하게 활용되므로 전문적인 측량 성과 산출보다는 누구나 쉽게 접근할 수 있는 처리 방법이나 소프트웨어 제공도 필요하다.

셋째, GNSS 높이측량 정확도를 향상시키기 위해서는 신뢰할 수 있고 지속적으로 갱신되는 고도화된 지오이드 모델의 개발이 필요하며, 향후 내륙과 수직 기준이 다르며, 위성기준점과 통합기준점의 이용이 제한적인 도서지역에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 

REFERENCES

- Jung, S.C., J.H. Kwon and J.S. Lee. 2018. Accuracy analysis of GNSS-derived orthometric heights on the leveling loop disconnected area. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 36(1): 1-8 (정성채, 권재현, 이지선. 2018. GNSS 높이측량을 통한 수준단절지역 표고 정확도 분석. *한국측량학회지* 36(1):1-8).
- Lee, S.B., K.S. Lee and M.K. Lee. 2017. Analysis of the feasibility of GNSS/geoid technology in determining orthometric height in mountain. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* 25(2):57-65 (이석배, 이근상, 이민근. 2017. 산악지 표고결정에 있어서 GNSS/Geoid 기술의 활용가능성 분석. *한국지형공간정보학회지* 25(2):57-65).
- NGII(National Geographic Information Institute). 2014. A Study on development of national geoid model and linkage of vertical standards in Asia-Pacific region(3rd year). (국토지리정보원. 2014. 국가 지오이드 모델 개발 및 아태지역 수직기준 연계에 관한 연구).
- NGII(National Geographic Information Institute). 2018a. Construction of 2017 geoid model and land, sea, vertical reference cooperation model. (국토지리정보원. 2018. 2017 지오이드 모델 및 육·해상 수직기준 연계모델 구축).
- NGII(National Geographic Information Institute). 2018b. GNSS-derived orthometric heights guideline (Ver.1.0). (국토지리정보원. 2018. GNSS높이측량 가이드라인).
- NGII(National Geographic Information Institute). 2019. Public survey work regulations. (국토지리정보원. 2019. 공공측량 작업규정).
- Shin, G.S., J.H. Han and J.H. Kwon. 2014. Accuracy analysis of orthometric heights based on GNSS static surveying. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 32(5):527-537 (신광수, 한중희, 권재현. 2014. GNSS 정지측량을 통한 표고 산출 정확도 분석. *한국측량학회지* 32(5):527-537). 