

GPS/Leveling 데이터를 이용한 기하지오이드와 중력지오이드의 비교 분석*

A Comparison of the Gravimetric Geoid and the Geometric Geoid Using GPS/Leveling Data

김영길¹⁾ · 최윤수²⁾ · 권재현³⁾ · 홍창기⁴⁾

Kim, Young-Gil · Choi, Yun-Soo · Kwon, Jay-Hyouon · Hong, Chang-Ki

Abstract

The geoid is the level surface that closely approximates mean sea level and usually used for the origin of vertical datum. For the computation of geoid, various sources of gravity measurements are used in South Korea and, as a consequence, the geoid models may show different results. However, a limited analysis has been performed due to a lack of controlled data, namely the GPS/Leveling data. Therefore, in this study, the gravimetric geoids are compared with the geodetic geoid which is obtained through the GPS/Leveling procedures. The gravimetric geoids are categorized into geoid from airborne gravimetry, geoid from the terrestrial gravimetry, NGII geoid(geoids published by National Geographic Information Institute) and NORI geoid(geoid published by National Oceanographic Research Institute), respectively. For the analysis, the geometric geoid is obtained at each unified national control point and the difference between geodetic and gravimetric geoid is computed. Also, the geoid height data is gridded on a regular 10 × 10-km grid so that the FFT method can be applied to analyze the geoid height differences in frequency domain.

The results show that no significant differences in standard deviation are observed when the geoids from the airborne and terrestrial gravimetry are compared with the geometric geoid while relatively large difference are shown when NGII geoid and NORI geoid are compared with geometric geoid. Also, NGII geoid and NORI geoid are analyzed in frequency domain and the deviations occurs in long-wavelength domain.

Keywords : GPS/Leveling, gravimetric geoid, geometric geoid

초 록

지오이드는 수직 높이 체계의 기준으로 다양한 방법으로 측정된 중력값을 이용하여 계산된다. 따라서 지오이드의 계산에 사용된 관측자료에 따라 지오이드 사이에 차이가 발생할 수 있으나 이에 대한 연구가 상대적으로 미흡한 실정이다. 그 이유는 GPS/Leveling 자료와 같은 검증자료가 충분치 않아 제한된 범위 내에서만 분석이 수행되어 왔기 때문이다. 본 연구에서는 GPS/Leveling 자료를 이용하여 계산된 기하지오이드를 기준으로 중력기반 지오이드(항공중력 지오이드, 지상중력 지오이드, 국토지리정보원과 국립해양조사원에서 제공하고 있는 지상중력기반 지오이드)를 비교 분석하였다. 이를 위해 실험지역내에 설치된 통합기준점에 대해 기하지오이드를 산출한 후 중력기반 지오이드와의 차이를 분석하였다. 기하지오이드와 중력 지오이드와의 차이는 통합기준점 각 지점(포인트)별로 혹은 10km × 10km로 격자화 한 후 분석하였으며 파장별 분석이 용이하도록 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 이용하였다.

기하지오이드를 기준으로 각 지점별 차이에 대한 표준편차를 비교 분석한 결과 항공중력과 지상중력에 의한 지오이드고는 유사한 것으로 나타났다. 반면 국토지리정보원과 국립해양조사원에서 제공하고 있는 지상중력기반 지오이드고는 차이가 있는 것으로 나타났다. 주파수 영역에서 차이를 비교한 결과, 저주파 영역에서는 모두 유사한 결과를 보였으며 국토지리정보원/해양조사원에서 제공하고 있는 지상중력기반 지오이드의 경우 고주파 영역에서 차이를 보이는 것으로 나타났다.

핵심어 : GPS/Leveling, 중력지오이드, 기하지오이드

*이 논문은 서울시립대학교 일반대학원 김영길 석사학위 논문을 수정 보완한 것입니다.

- 1) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사(E-mail : zeroway@uos.ac.kr)
- 2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(E-mail : choiys@uos.ac.kr)
- 3) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(E-mail : jkwon@uos.ac.kr)
- 4) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 연구교수(E-mail : ckhong@uos.ac.kr)

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

GPS 측량에 의해 기존 측량방법으로는 측정이 어려웠던 타원체고(h)의 결정이 가능해짐으로써 수준점에서 GPS 측량을 통한 기하학적 지오이드고(N)의 결정이 가능하게 되었다. 이에 따라 GPS/Leveling 자료를 이용한 정밀 지오이드의 결정 및 검증에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.(이석배 등, 2009)

국내외 선행연구들을 살펴보면 지오폠펜셜 모델과 GPS/Leveling 방법에 의한 지오이드를 비교 분석 하고자 하였다. 기존 연구들을 보면 지구중력장 모델을 똑같은 조건인 구면조화분석으로 지오이드고를 산출하여 지오이드고와 기하학적 지오이드고의 편차를 구하였다(이석배 등, 2004). 또한 수준점 및 삼각점에서 GPS 측량을 실시한 후 지오이드모델 기반에서 정표고를 산정한 것과 기지점 고정 의 망조정에 의한 정표고 산정을 상호 비교(박병욱 등, 2002)하였고, 최소제곱 콜로케이션(Least-squares collocation) 피팅(Fitting)기법을 통해 개발된 지역적 정밀지오이드 모델의 정밀도를 분석하여 비교 평가 하고 적합성을 검증(윤홍식 등, 2005)하였다.

따라서 본 연구에서는 GPS/Leveling 데이터인 통합기준점 자료와 항공중력자료를 이용한 지오이드고, 지상중력자료를 이용한 지오이드고, 국토지리정보원이 제공하는 프로그램으로 산출한 지오이드고, 국립해양조사원이 제공하는 프로그램으로 산출한 지오이드고등을 이용하여 대상 지역을 선정하고 비교 한다. 이 비교를 토대로 분석하여 중력지오이드와 기하지오이드의 정확도 분석 및 실용화에 기여하는데 목적이 있다.

1.2 연구 방법

본 연구에서 사용한 자료는 국토지리정보원에서 보유하고 있는 GPS/Leveling 데이터인 통합기준점 자료(275 점)와 항공중력측정에 의한 지오이드고(이지선, 2009)와 지상중력측정에 의한 지오이드고(이동하, 2008), 또한 국토지리정보원이 배포하는 세계측지계 좌표변환 프로그램인 NGI_Pro와 국립해양조사원이 배포하는 지오이드고 계산 프로그램인 nori05 에서 실험 대상 지역의 지상중력기반 지오이드고 자료를 추출하였다.

항공중력측정에 의한 지오이드고는 우리나라 전역에 걸쳐 총 51개의 노선에 대하여 수행되어 교차오차 ± 2.21mGal, 노선별 정밀도 ±1.56mGal의 프리에어이상값

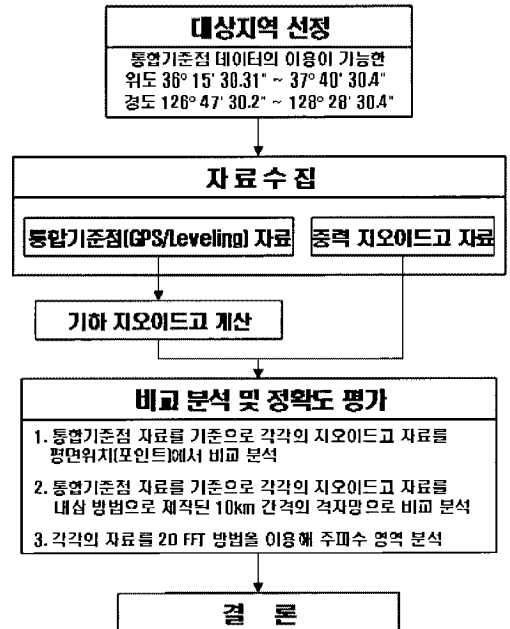


그림 1. 연구 흐름도

을 확보한 것으로 알려져 있으며, 지상중력측정에 의한 지오이드고는 성균관 대학교 이동하 박사학위 논문에서 개발한 모델이며 적합도는 약 0.001m ±0.054m로 알려져 있다. 또한, NGI_Pro 프로그램은 국토지리정보원에서 세계측지계 시행에 따른 사용자의 편의를 도모하고 세계측지계의 조기정착을 위해 대한측량협회와 공동으로 개발한 것이며, nori05 프로그램은 해양수산부의 한국해양발전 프로그램과 국립해양조사원의 지원으로 개발 되었으며, 육·해상을 연결한 정밀지오이드 모델구축에 의한 지오이드고를 계산하는 프로그램으로 GPS/Leveling 지오이드와 비교한 결과 RMS가 0.132m로 알려진 지오이드이다.

본 연구의 대상범위는 다음과 같다. 10km 간격 격자망은 통합기준점과 각각의 지오이드고를 비교해보기 위해 통합기준점이 분포하는 위치 내에(위도 : 36° 15' 30.31"~37° 40' 30.4", 경도 : 126° 47' 30.2"~128° 28' 30.4")서 비교 대상영역을 선택하였고, FFT 분석을 하기 위해서 대상영역을(위도 : 35°~38.25°, 경도 : 125.9°~129.5°) 선택하였다. 실험의 순서는 첫째, 통합전자기준점 자료를 기준으로 각 지오이드고에 대해 평면위치(포인트)기준 비교 및 경향 분석 둘째, 통합전자기준점 자료를 기준으로 10km 간격의 격자망 구성후 각 지오이드고 비교 및 경향 분석 셋째, 2D FFT방법으로 지오이드고를 주파

수 영역에서 분석을 수행하였다. 처리 S/W는 Golden Software사의 Surfer를 사용하였으며, 지오이드고의 높이 비교를 주파수 영역대에서 분석해보기 위해 Matlab을 통해 FFT방법을 적용하였다. 아래 그림 2는 본 연구에 사용된 통합기준점의 위치 및 기하지오이드고를 나타낸 것이다.

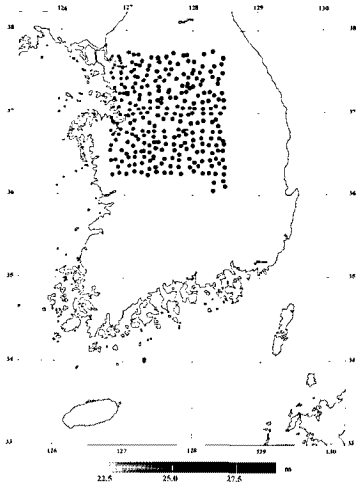
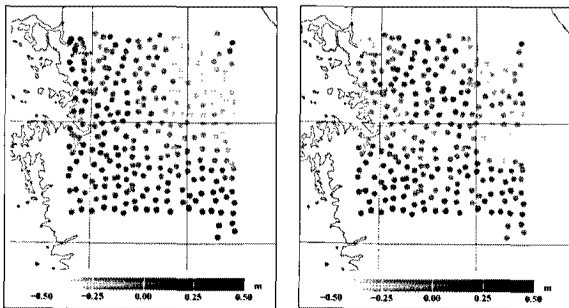


그림 2. 통합기준점 위치도

2. 기하 지오이드와 중력 지오이드 비교 분석

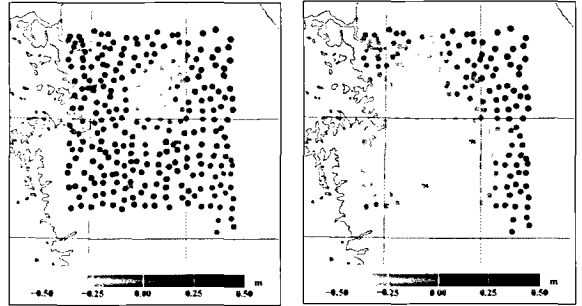
2.1 지오이드고 자료를 평면위치(포인트)로 비교 분석

지오이드의 차이를 비교 분석 하기 위해 중력지오이드고에서 기하지오이드고를 빼서 차이를 구하였으며 다음 그림 3은 순서대로 통합기준점의 평면위치(포인트)를 기준으로 항공중력에 의한 지오이드고, 지상중력에 의



(a) 항공중력에 의한 지오이드고와 지점별 비교

(b) 지상중력에 의한 지오이드 지점별 비교



(c) NGI_Pro에 의한 지오이드고와 지점별 비교

(d) nori05에 의한 지오이드고와 지점별 비교

그림 3. 통합기준점과 방법별 지오이드고의 지점별 비교

한 지오이드고, NGI_Pro에 의한 지오이드고, nori05에 의한 지오이드고를 뺀 차이를 비교한 것이다. 그리고 아래 표 1은 차이를 분석한 통계이고, 표 2는 포인트 분포의 통계이다.

표 1. 통합기준점과 방법별 지오이드고의 지점별 비교 통계 (단위:m)

분류	항공중력의 지오이드고	지상중력의 지오이드고	NGI_Pro의 지오이드고	nori05의 지오이드고
최소 값	0.043	0.130	0.473	0.259
최대 값	0.459	0.582	0.708	0.613
평균	0.266	0.286	0.086	0.324
표준편차	0.080	0.073	0.168	0.202

표 2. 통합기준점과 방법별 지오이드고의 지점별 차이에 대한 분포 통계

(개) (m)	항공중력의 지오이드고	지상중력의 지오이드고	NGI_Pro의 지오이드고	nori05의 지오이드고
-0.5 이하	0	5	0	54
-0.5~-0.25	152	178	37	140
-0.25~0	123	92	181	58
0~0.25	0	0	48	22
0.25~0.5	0	0	4	1
0.5 이상	0	0	5	0

그림 3(a)에서 항공중력에 의한 지오이드고 포인트 자료 비교는 전체적으로 마이너스 값이 나타나는 것으로 보아 통합기준점의 지오이드고가 항공중력에 의한 지오이드고 보다 높음을 알 수 있으며 최대 0.459m, 최소 0.043m 차이를 보이고 있다. 평균 및 표준편차는 각각 0.27m, 0.08m로 나타났다. 계통오차(Systematic Error)의

경향을 나타내는 것으로 보아 전체적으로 항공중력에 의해 계산된 지오프이드고 자료의 품질이 균질한 것을 알 수 있다. 포인트의 분포는 -0.5 ~ -0.25m 사이에 152개, -0.25 ~ 0m 사이에 123개로 모두 마이너스에 분포하며 -0.5 ~ -0.25m 사이에서 가장 많이 나타난다. 그림 3(b)에서 지상중력에 의한 지오프이드고 포인트 자료 비교는 통계값을 보면 알 수 있듯이 항공중력과 비슷한 경향을 나타낸다. 전체적으로 마이너스 값을 나타내며, 최대 0.582m, 최소 0.13m 차이를 보이고, 평균 및 표준편차는 각각 0.286m, 0.073m 로 계통오차의 경향을 나타낸다. 이것으로 보아 지상중력에 의해 계산된 지오프이드고 자료의 품질 또한 균질한 것을 알 수 있다. 포인트의 분포는 -0.5 이하에 5개, -0.5 ~ -0.25m 사이에 178개, -0.25 ~ 0m 사이에 92개로 모두 마이너스에 분포하며 -0.5 ~ -0.25m 사이에서 가장 많이 나타난다. 위의 그림 3(c)와 통계를 보면 알 수 있듯이 다른 지오프이드고들과 다른 경향을 나타낸다. 가장 크게 차이나는 곳은 0.708m 까지 차이가 나면서 통합기준점보다 높은값과 0.473m 차이가 나타나면서 통합기준점보다 낮은 값이다. 포인트의 분포는 -0.5 ~ -0.25m 사이에 37개, -0.25 ~ 0m 사이에 181개, 0 ~ 0.25m 사이에 48개, 0.25 ~ 0.5m 사이에 4개, 0.5m 이상에 5개로 차이가 크게 분포하며 -0.25 ~ 0m 사이에서 가장 많이 나타난다. 그림 3(d)는 다른 지오프이드고들에 비해 다른 경향을 나타낸다. 전체적으로 마이너스 값을 나타내며, 가장 크게 차이나는 곳은 0.614m 까지 차이가 나면서 통합기준점보다 낮은 값이다. 표준편차가 0.202m 인 것과 그림을 보면 차이가 큰 경향을 나타낸다. 포인트의 분포는 -0.5m 이하에 54개, -0.5 ~ -0.25m 사이에 140개, -0.25 ~ 0m 사이에 58개, 0 ~ 0.25m 사이에 22개, 0.25 ~ 0.5m 사이에 1개로 차이가 크게 분포하며 -0.5 ~ 0.25m 사이에서 가장 많이 나타나며 -0.5m 이하에서도 많이 나타난다.

2.2 10km10km 간격으로 격자화 한 후 비교 분석

통합기준점이 10km×10km의 배치밀도를 갖기 때문에 10km 간격으로 격자망을 구성하여 비교분석 하였다. 다음 그림 4는 순서대로 통합기준점을 기준으로 항공중력에 의한 지오프이드고, 지상중력에 의한 지오프이드고, NGI_Pro에 의한 지오프이드고, nori05에 의한 지오프이드고를 비교한 것이다. 그리고 표 3은 격자망을 구성하여 지오프이드고 차이를 분석한 통계이다.

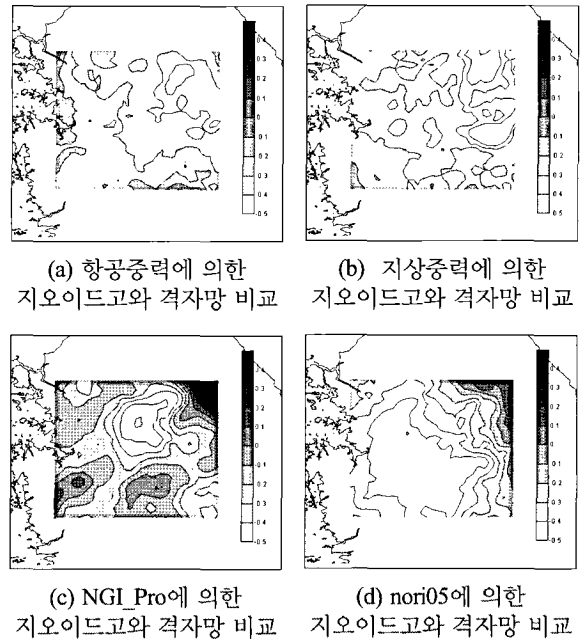


그림 4. 통합기준점과 방법별 지오프이드고의 격자망 비교

표 3. 통합기준점과 방법별 지오프이드고의 격자망 비교 분석 통계 (단위:m)

분류	항공중력의 지오프이드고	지상중력의 지오프이드고	NGI_Pro의 지오프이드고	nori05의 지오프이드고
최소 값	0.009	0.124	0.510	0.286
최대 값	0.642	0.792	0.745	0.698
평균	0.303	0.349	0.120	0.376
표준편차	0.093	0.097	0.180	0.202

그림 4(a)는 항공중력에 의한 지오프이드고 격자망 비교로 통합기준점의 지오프이드고가 항공중력에 의한 지오프이드고보다 높음을 알 수 있으며, 원주 치악산 지역에서 0.64m 차이와 단양 소백산 지역에서 0.52m의 차이가 나타나는 경향을 파악할 수 있다. 그림 4(b)는 지상중력에 의한 지오프이드고 격자망 비교로 통합기준점의 지오프이드고가 지상중력에 의한 지오프이드고보다 높음을 알 수 있으며, 문경 월악산 지역에서 0.79m 차이와 원주 치악산 지역에서 0.68m 차이가 나타나는 경향을 파악할 수 있다. 그림 4(c)는 NGI_Pro에 의한 지오프이드고 격자망 비교로 여주지역에서 0.51m 차이와 강원도 오대산 지역에서 0.74m 차이가 나타내는 경향을 파악할 수 있다. 그림 4(d)는 nori05에 의한 지오프이드고 격자망 비교로 충북 증평지역에서 0.7m 차이와 0.5m이상의 차이가 많이 나는

지역이 나타났고, 강원도 평창지역에서 0.28m 차이를 알 수 있으며, 격자망 비교를 통해 전체적인 경향을 파악할 수 있다.

2.3 지오이드고 자료를 2D FFT 방법으로 비교 분석

위도 경도의 방향성을 고려한 각 지오이드고 자료들의 높이 영역을 주파수대역으로 분석하기 위해 2차원 FFT를 실시하였고, 고주파 영역대에서의 차이를 자세히 보기위해 MATLAB에서 windowing을 적용하여 side lobe를 줄이고, zero padding을 통해 보간(interpolation)을 실시하였고, 주파수단위를 데시벨(dB) 단위로 만들어서 Power Spectrum으로 분석하였다.

다음 그림 5는 순서대로 항공중력, 지상중력, NGI_Pro, nori05에 의한 지오이드고를 2차원 FFT하여 얻은 결과의 고주파 영역대를 보기 위해 데시벨(dB)단위의 파워스펙트럼을 3-D surface로 표현한 것이다.

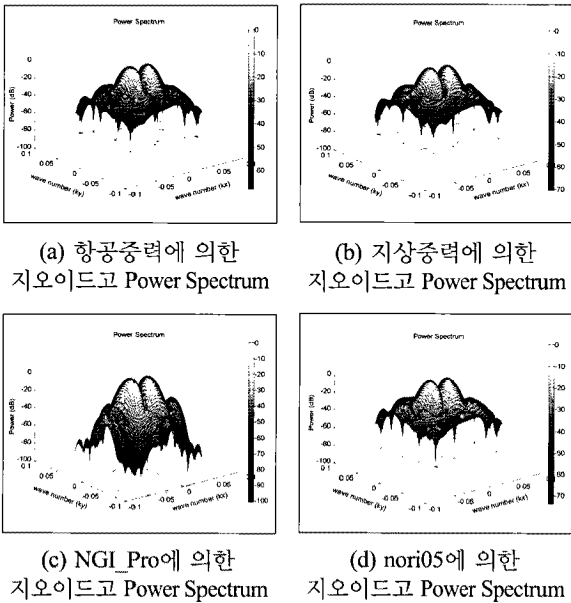


그림 5. 방법별 지오이드고의 Power Spectrum

그림 5에서 보듯이 항공중력과 지상중력 그리고 nori05에 의한 지오이드고는 양상이 비슷하며, 범례를 보면 항공중력과 지상중력에서 고주파가 비교적 많이 나타나며 NGI_Pro에 의한 지오이드고는 고주파대로 갈수록 비교적 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

다음 그림 6(a)는 항공중력, 지상중력, NGI_Pro,

nori05에 의한 지오이드고를 2차원 FFT하여 얻은 결과의 전체적인 경향을 알아보기 위해 데시벨(dB) 단위의 Normalized Power Spectrum으로 나타낸 것이며, 그림 6(b)는 저주파대역 부분만을 확대한 것이다.

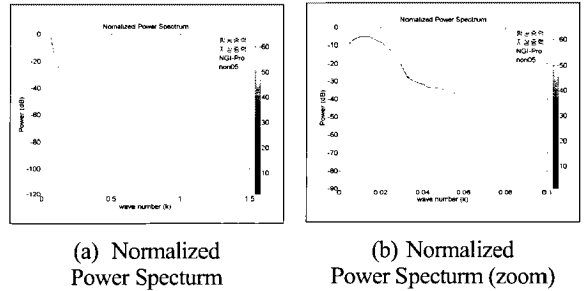


그림 6. Normalized Power Spectrum

그림 6(a)에서 보는 것과 같이 항공중력과 지상중력에 의한 지오이드고의 주파수대역은 매우 비슷한 경향을 나타내며, nori05에 의한 지오이드고의 주파수대역은 저주파에서 비슷하다가 고주파 영역으로 갈수록 약간 낮아지는 경향을 나타내며, NGI_Pro에 의한 지오이드고의 주파수대역은 저주파 영역과 고주파영역 모두 낮은 경향을 나타낸다. 또 그림 6(b)는 저주파 대역의 0~0.1까지 확대하여 나타낸 것인데 0.03까지는 모두 비슷한 경향을 나타내다가 그 이후부터는 NGI_Pro에 의한 지오이드고의 주파수대역만 낮아지는 경향을 나타낸다. 고주파영역대가 작다는 것은 2km 간격에서 지오이드고의 차이가 급변하는 데이터가 없다는 것을 의미한다. 항공중력과 지상중력, nori05에 의한 지오이드고에서는 고주파 대역이 줄어들긴 하지만 어느 정도 있다는 것은 산맥과 같은 지역에서 나타나는 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 국토지리정보원에서 보유중인 GPS/Leveling 관측자료인 통합기준점의 자료와 항공중력에 의한 지오이드고, 지상중력에 의한 지오이드고, 또 국토지리정보원과 국립해양조사원이 배포하는 NGI_Pro와 nori05 프로그램을 통해 추출한 지상중력기반 지오이드고를 이용하여 중력지오이드 및 기하학적 지오이드를 산출하여 평면위치(포인트)와 격자망(10km), FFT (Fast Fourier Transform)방법으로 비교 및 분석하여 다음과 같은 연구 결론을 얻었다.

참고문헌

첫째, 통합기준점의 평면위치(포인트)를 기준으로 지오이드고도를 비교 분석한 결과 항공중력에 의한 지오이드고와 지상중력에 의한 지오이드고는 표준편차가 0.08m, 0.073m로 비교적 작고, 통합기준점보다 평균적으로 0.266m, 0.286m 높지만 비교적 유사한 경향을 나타내며, 데이터의 품질이 균질한 것으로 보인다. NGI_Pro에 의한 지오이드고와 nori05에 의한 지오이드고 비교에서는 표준편차 0.168m, 0.202m와, 평균 0.086m, 0.324m가 나타나는 결과를 보여 주었으며, 표준편차가 비교적 크게 나타나는 것은 산악지역의 정상부분의 데이터가 부족하여 나타는 현상으로 사료된다.

둘째, 통합기준점을 기준으로 10km 간격의 격자망을 구성하여 비교 분석한 결과 통합기준점의 평면위치(포인트)를 기준으로 지오이드고 차이를 분석한 통계와 비슷하게 나타나며 전체적인 경향을 확인할 수 있었다.

셋째, 통합기준점을 제외한 각각의 지오이드고를 2D FFT(Fast Fourier Transform)방법을 통해 비교 분석한 결과 저주파 영역대는 유사한 경향을 나타내고, 고주파 영역대에서는 항공중력과 지상중력, nori05에 의한 지오이드고는 비슷한 경향을 나타내지만 NGI_Pro에 의한 지오이드고만 고주파 영역대로 갈수록 낮아지는 경향을 나타낸다. 고주파영역대가 작다는 것은 2km 간격에서 지오이드고의 변하는 폭이 작다는 것을 알 수 있으며 산맥지형에서 해상도가 낮다는 것을 판단할 수 있다.

연구결과를 종합하면 우리나라 지오이드고의 비교를 통해 항공중력 지오이드고와 지상중력 지오이드고가 매우 유사한 것으로 나타났으며, 중력지오이드고와 기하 지오이드고의 차이는 평균적으로 약 20cm 가량 나타났다. 따라서 향후 우리나라의 적합한 지오이드모델을 개발하기 위해서는 산악지형이 많은 동해안 일대의 수준점 성과에 대한 검토 및 신설이 필요하며, 지상 및 해상 중력 데이터의 연계 및 보안을 통해 보다 개선된 지오이드를 얻을 수 있을 것으로 사료 된다. 따라서 향후 신설되는 통합기준점의 전국적인 데이터를 활용하여 고정밀 지오이드 개발에 힘써야 할 것으로 사료 된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형 국토정보혁신사업과제의 연구비지원(07국토정보C02)에 의해 수행되었습니다.

국토지리정보원 (1998), GPS/Leveling을 이용한 지오이드 평가에 관한 연구.

국토지리정보원 (2006), 지오이드모델 시스템 개발 보고서.

국토지리정보원 (2006), 국가기준점 망조정에 관한 연구.

박병욱, 최윤수, 신상호 (2002), GPS/Leveling의 실용적 활용 방안에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지, 제 10권 제 2호.

윤홍식, 이동하 (2005), Least Square Collocation에 의한 GPS/Leveling의 정확도 개선, 한국측량학회지, 제 23권 제 4호.

이동하 (2008), 한국의 고정밀 합성지오이드 모델 개발, 성균관대학교 일반대학원, 박사학위논문.

이석배, 김진수, 김철영, 권재현 (2009), 1, 2등 수준노선에서 GPS 측량에 의한 기하학적 지오이드고의 계산, 한국측량학회지, 제 27권 제 2호.

이석배, 황용진, 이재원 (2004), GPS/Leveling 데이터에 의한 기하학적 지오이드고의 산출, 한국측량학회지, 제 22권 제 1호.

이지선 (2009), 항공중력기반 정밀지오이드 결정, 서울시립대학교 대학원, 석사학위논문.

Featherstone, W. E., Kirby, J. E., Kearsley, A. H. W., Cilliland, J. R., and Johnston, G. M. (2001), The AUSGeoid98 geoid model of Australia : data treatment, computations, and comparisons with GPS-levelling data, *J. of Geodesy*, V.75.

Kuroishi, Y. (2001), An improved gravimetric geoid for Japan, JGEOID98, and relationships to marine gravity data, *J. of Geodesy*, Vol.74.

Leick, A. (1995), *GPS Satellite Surveying*, Second edition, John Wiley & Sons, Inc.

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. and Factor, J. K. (2008), EGM2008: An Overview of its Development and Evaluation, *An IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Earth Observation 2008*.

(접수일 2010. 02. 16, 심사일 2010. 03. 12, 심사완료일 2010. 04. 20)