

최신 중력 자료의 획득을 통한 우리나라 지오이드 모델 업데이트

The Update of Korean Geoid Model based on Newly Obtained Gravity Data

이지선¹⁾ · 권재현²⁾ · 김영민³⁾ · 문지영⁴⁾

Lee, Jisun · Kwon, Jay Hyoun · Keum, Young Min · Moon, Jiyeong

Abstract

The previous land gravity data in Korea showed locally biased irregular distribution. Especially, this problem was more serious in the mountainous area where the data density was significantly low. The same problem appeared in GPS/Levelling data thus the precision of the geoid could not be improved. From 2008, new gravity and GPS/Levelling data has been collected by the unified control point and survey on the benchmark project which were funded by the national geographic information institute. The newly obtained data has much better distribution and precision so that it could be used for update precision of geoid model. In this study, the new precision geoid has been calculated based old and new gravity data and this model showed 5.29cm of precision compared to 927 points of GPS/Levelling data. And the degree of fit and precision of hybrid geoid has been calculated 2.99cm and 3.67cm. The new gravimetric geoid has been updated about 27% over whole country. And it showed 42% of precision update due to collection of new gravity data on the Kangwon/Kyeongsang area which showed quite low distribution. In 2010, about 4,000 points of gravity and 300 points of GPS/Levelling data has been obtained by unified control and survey on benchmark project. We expect that new data will contribute to updating geoid precision and verifying precision more objectively.

Keywords : Precision Geoid Model, Control Points, Gravity on Benchmark, GPS/Levelling

초 록

기존의 우리나라의 지상중력 자료는 지역적으로 편향된 분포를 나타내며, 특히 산악지역에서는 그 분포가 현저히 떨어진다라는 문제점이 존재하였다. 이러한 문제점은 GPS/Levelling 자료에서도 나타나며 이로 인하여 지오이드 정확도 향상에 한계가 있었다. 그러나 2008년부터 국토지리정보원에서 수행하고 있는 통합기준점 및 수준점 중력측량사업에서 새로운 중력 자료 및 GPS/Levelling 자료를 획득하였으며, 특히 이러한 자료들은 기존의 중력 및 GPS/Levelling 자료에 비해 월등한 분포와 정밀도를 나타내기 때문에 우리나라 지오이드 모델의 정밀도를 개선하는 기본 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 품질이 검증된 기존 자료와 새롭게 획득된 중력 자료를 포함하여 지오이드 모델을 구축하였다. 구축된 지오이드 모델의 정밀도는 새롭게 획득된 927점의 GPS/Levelling 자료와 비교한 결과 약 5.29cm로 나타났으며, 합성지오이드의 적합도 및 정밀도는 각각 약 2.99cm와 3.67cm로 산출되었다. 본 연구를 통하여 산출된 최신 지오이드 모델은 새로운 중력 자료를 포함하기 전에 구축된 모델에 비하여 우리나라 전역에서 약 27% 정도 정밀도가 향상되었으며, 특히 현저히 낮은 분포를 보이던 강원 및 경상지역에서는 중력 자료의 업데이트에 의하여 약 42%의 정밀도 향상이 이루어 졌다. 2010년에 통합기준점 사업 및 수준점 측량사업을 통하여 약 4,000여점의 중력 자료와 300여점의 GPS/Levelling 자료가 획득되었기 때문에 향후 본 자료들을 함께 활용한다면 지오이드 모델 정밀도의 향상과 더불어 객관적으로 정밀도 검증이 가능할 것으로 판단된다.

핵심어 : 정밀 지오이드, 통합기준점, 수준점중력측량, GPS/Levelling

1) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(E-mail : leejs@uos.ac.kr)
2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(E-mail : jkwon@uos.ac.kr)
3) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail : amitayuth@uos.ac.kr)
4) 국토지리정보원 측지과(E-mail : smoon7@korea.kr)

1. 서론

우리나라의 중력 자료는 국토지리정보원과 서울대학교, 부산대학교 등의 대학, 한국지질자원연구원, 국립해양조사원 등의 기관에 의하여 측정되어 왔다 (이석배, 2000; 윤희식 등 2005; 해양수산부, 2005). 그러나 2000년대 초반까지 획득된 자료들은 충청, 전라, 경상도 등 일부 지역에 편향되어 분포하고 있으며, 지리산 및 강원도 지역 등 산악지역에서는 그 분포가 현저히 낮다는 문제점을 가지고 있었다. 또한, 측정 상의 한계로 지상중력 자료와 해상중력 자료 간의 공백이 존재한다는 문제점이 있다. 이러한 자료의 분포에 있어서의 문제는 GPS/Levelling 자료에도 나타나는데 대부분의 GPS/Levelling 자료는 평지에 분포하고 있으며, 특히 기존의 지오이드 모델과 비교하였을 때 전라도 지역에서 큰 차이를 나타내었다.

2008년부터 국토지리정보원에서는 위치, 높이 및 중력값의 정보를 담고 있는 통합기준점을 설치하여 왔고, 또한 수준점 중력측량사업을 통하여 많은 중력 및 GPS/Levelling 자료를 획득하였다. 앞서 언급한 두 사업을 통하여 획득된 중력 자료는 기존의 중력 자료가 가지고 있던 분포상의 문제점을 해결하는데 주요한 역할을 할 수 있으며, GPS/Levelling 자료는 지오이드 모델의 정밀도를 보다 객관적으로 검증하는데 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2008년부터 새롭게 획득된 중력 및 GPS/Levelling 자료를 이용하여 기존 지오이드 모델을 업데이트하고, 그 정밀도를 분석하고자 하였다.

2. 중력 및 GPS/Levelling 자료의 업데이트

2.1 중력 자료의 업데이트

2007년 지능형국토정보기술사업에서는 국토지리정보원, 몇몇 대학 및 기관에서 측정하였던 지상중력 자료를 수집 및 정리하였다. 그 결과 기존 중력 자료의 분포가 지역적으로 편향되어있으며, 산악지역에서는 자료의 수가 현저히 적다는 문제점을 도출할 수 있었다 (그림 1). 또한 지상중력 자료와 해상중력 자료 간의 공백이 지오이드 모델을 구축하는데 있어 필수적으로 해결하여야 하는 문제점으로 제시되었다 (국토해양부, 2010). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지능형국토정보기술사업에서 지상중력 측량(강원지역 및 경기지역)을 일부 수행하였으나, 고른 분포 및 정밀도를 갖는 중력자료를 획득하는데 한계가 존재하였다.

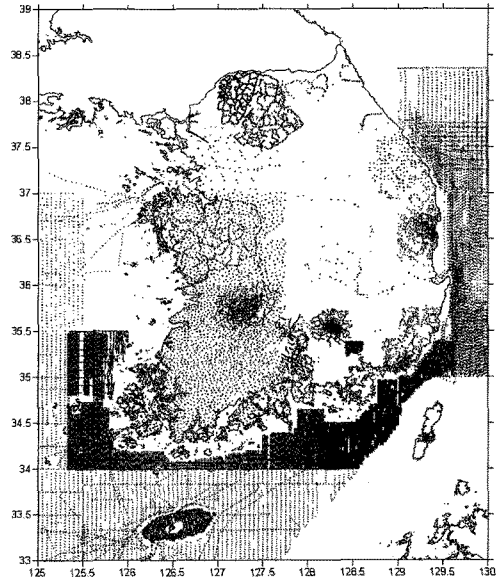


그림 1. 기존 중력 자료의 분포도 (2009년 기준)

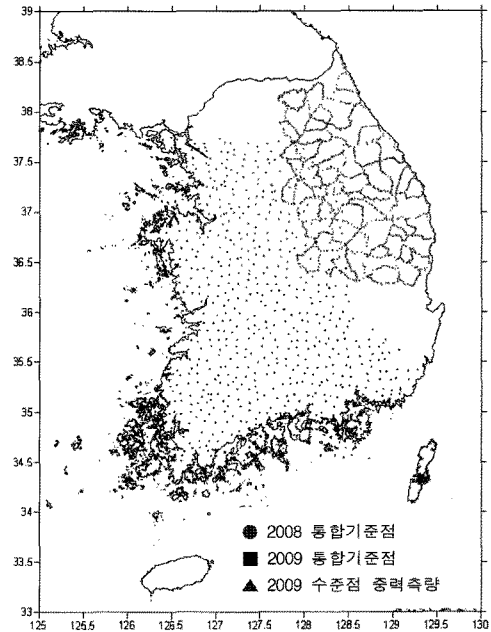


그림 2. 새로운 지상중력 자료 (2008-2009년)

특히, 2008년에 획득된 항공중력자료와 융합하여 육상, 해상을 아우르는 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 고른 분포 및 정밀도의 지상중력자료를 반드시 확보하여야 한다. 2008년부터 국토지리정보원에 의하여 수행된 통합

기준점 사업 및 수준점 중력측량사업은 고른 분포 및 정밀도를 나타내기 때문에 앞서 제기되었던 기존 지상중력자료들의 문제점을 해결하고, 지오이드 구축을 하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다(그림 2).

통합기준점 사업은 사용자의 편익과 측량 능력 극대화를 도모하기 위하여 우리나라 최초로 평탄지에 설치, 운용하는 새로운 측량기준점을 10km 간격으로 설치하고자 하는 사업으로 2011년까지 총 1,200점을 구축하는 것을 목적으로 한다(국토지리정보원, 2008). 본 기준점은 위치 및 높이(타원체고 및 표고) 뿐 아니라 중력값까지 포함하고 있는 국가기준점으로서, 특히 우리나라 전역에서 고른 분포를 나타낸다는 장점이 있으므로 지오이드 모델을 구축하는데 기본 자료로 활용성이 높다. 본 논문에서는 2008년 경기도, 충청도에서 획득된 281점, 2009년에 전라도, 경상도에서 획득된 520점, 총 801점의 중력 자료를 지오이드 모델 구축에 활용하였다.

수준점 중력측량사업은 2009년부터 약 3년간 지속되는 사업으로, 국토 전역에 대한 중력측량을 실시하여 한반도의 안정적인 중력망을 구축하고, 수준점 성과의 정표고 산출 및 한반도 정밀 지오이드 모델 구축의 기반을 마련하여 수준점 성과의 정확도 향상, 측량 능력의 극대화(GPS 수준측량의 실용화)를 도모하고자 한다. 2009년에 총 1,425점의 중력 자료가 획득되었으며, 통합기준점과 달리 수준점에서의 중력 자료는 강원도, 경상도 등의 산지가 많은 지역에서 먼저 수행되었기 때문에 상대적으로 낮은 분포를 보이던 산악지역에서 중력 자료를 얻을 수 있다는 큰 장점이 있다(국토지리정보원, 2009).

어 고시된 성과이므로 신뢰성이 높은 자료이다. 따라서 기존의 자료 대신 새롭게 수집된 통합기준점의 GPS/Levelling 자료를 지오이드 모델의 정밀도를 검증하는데 활용하는 것이 바람직하다고 판단하여 기존 GPS/Levelling 자료를 2008년부터 2009년까지 수집된 총 927점의 자료로 대체하였다. 그림 3은 통합기준점의 GPS/Levelling 자료의 분포를 나타내는 것으로 2010년에 설치된 서울지역과 강원 일부지역을 제외한 모든 지역에서 고른 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

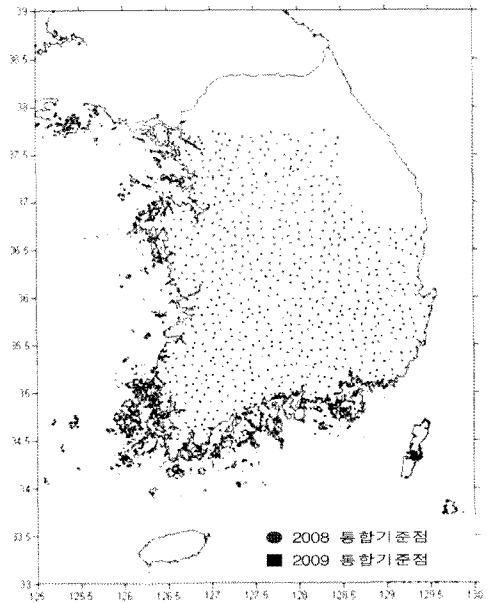


그림 3. 새로운 GPS/Levelling 자료 (2008-2009년)

2.2 GPS/Levelling 자료의 업데이트

기존의 GPS/Levelling 자료는 많은 항공측량 업체들의 업무의 일환으로 수집되어 왔다. 그러나 대부분 평지에 분포하고 있으며, 원시자료로부터 최종 성과가 산출되기까지의 처리과정에 대한 정보가 적절히 알려져 있지 않아 정밀도를 신뢰할 수가 없다. 특히 기존의 다양한 지오이드 모델 개발 연구로부터 산출된 지오이드 모델과 비교하였을 때 전라도 지역의 자료는 그 외 지역에서와 상반된 경향을 나타내고 있기 때문에 자료에 오류가 있는 것으로 판단된다(국토해양부, 2010).

2008년부터 시작된 통합기준점 사업의 결과로 획득된 자료는 위와 같은 문제점을 해결할 수 있는 자료로서, 일련의 처리 과정 및 성과는 국토지리정보원에 의하여 감수되

3. 최신 지오이드 모델 개발

3.1 대상자료

지오이드 모델 개발을 위한 자료는 중력 자료와 장파장 및 단파장 효과를 제거 및 복원하기 위한 전지구중력장 모델, 지형자료로 구분할 수 있다. 먼저 전지구중력장 모델과 지형자료는 기존의 연구에서와 동일하게 EGM2008(Earth Geopotential Model 2008)과 SRTM(Shuttle Terrain Model)을 이용하였으며 EGM2008의 최대차수는 360°로 적용하였다. 본 연구에서는 중력 자료의 업데이트에 따른 지오이드 모델의 개선 효과를 분석하는데 주목적이 있으므로, 중력 자료에 대해서만 상세히 기술하기로 한다. 따라서 전지구중력장 모델과 지형자료와 관련된 자세한 내용은 이지

선 등(2009b)을 참조하기 바란다.

3.1.1 지상중력 자료

중력 자료는 크게 지상중력 자료와 해상중력 자료, 항공중력 자료로 나눌 수 있다. 먼저 지상중력 자료는 기존의 연구에서 활용되어 오던 자료와 2008년부터 2009년까지 새롭게 획득된 자료를 모두 통합하여 총 11,301점을 이용하였다. 통합된 지상중력 자료는 -17.978mGal 부터 166.539mGal 의 값의 분포를 나타내며, 정밀도는 약 0.4mGal 수준으로 판단된다. 그림 4는 본 연구에 활용된 중력 자료의 분포를 나타낸 것으로서 기존 중력 자료에 비하여 산악지역에서의 중력 자료의 분포가 많이 확보되었으며, 그 외 지역에서도 상대적으로 중력 자료의 분포가 고르게 나타남을 확인할 수 있다.

3.1.2 항공중력 자료

2008년부터 2009년까지 많은 중력 자료를 획득하였지만, 대부분의 지상중력 자료는 측량의 효율성 때문에 평지에 많이 분포하며, 산악지역에서도 계곡 또는 도로 등을 따라 측정되어 지형의 특성을 적절히 반영하지 못하고 알리아싱(aliasing) 오차를 유발할 수 있다는 한계가 있다. 또한 지상중력 자료와 해상 또는 위성고도계자료만으로는 지상과 해상 사이에 자료의 공백이 존재하므로 지상과 해상을 모두 아우르는 지오이드 모델을 구축할 수가 없다. 따라서 지상과 해상에서의 중력 자료를 모두 융합하여 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 두 자료를 연결하고 통합하기 위한 자료가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2008년 12월부터 2009년 1월까지 약 2개월의 측량을 통하여 항공중력 측정을 실시, 자료를 획득하였다(그림 4). 본 자료는 -25.78mGal 부터 118.325mGal 의 값의 범위를 나타내며 정밀도는 약 1.5mGal 수준으로 알려져 있다(이지선 등, 2009a).

3.1.3 해상중력 자료

해상에서의 중력 자료는 1997년부터 국립해양조사원에 의하여 측정되어 온 선상중력 자료가 있으나 자료의 분포와 측정 또는 환경적인 요인에 의하여 서해 일부와 남해 일부의 자료에 오차가 존재한다는 점이 김영민 등(2010)의 연구에 의하여 발표된 바 있다. 따라서 해상에서의 중력 자료는 선상중력 자료 대신 DNSC08 위성고도계 자료를 이용하기로 결정하였다. DNSC08 위성고도계자료는 우리나라 뿐 아니라 많은 나라에서 지오이드 모델을 구축하는데

활용하고 있는 자료이며, 그 정밀도는 약 5mGal 로 알려져 있다(Anderson, 2008). 우리나라의 영해에서는 총 8,822점의 DNSC08 위성고도계자료를 지오이드 모델 개발에 활용할 수 있으며(그림 4), -139.32mGal 부터 100mGal 의 값의 범위를 나타낸다.

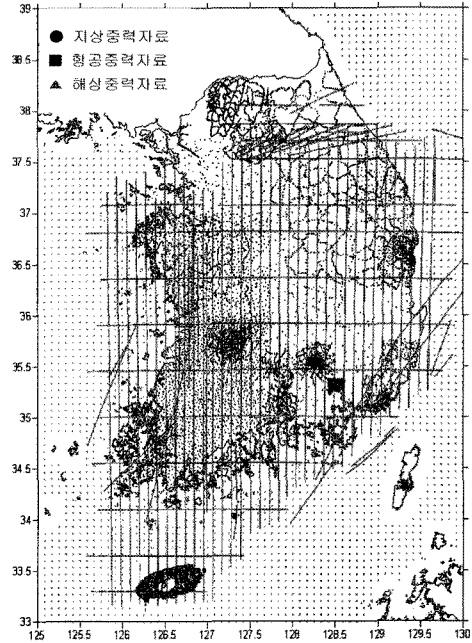


그림 4. 중력 자료 분포도 (2010년 기준)

3.2 지오이드 모델 개발

본 연구에서는 전 지구적인 장파장 효과와 지형에 의한 단파장 효과를 제거(Remove)한 후 복원(Restore)하는 제거 및 복원기법을 적용하여 지오이드 모델을 구축하였다. 제거 및 복원 기법에 의하여 지오이드 모델을 구축할 때는 Stokes' 적분반경, Wong-gore 차수, 지형 복원 반경 등의 변수 및 하향연속 방법/파라미터 등을 적절히 결정하여야 한다. 본 연구에서는 앞서 언급한 네 요소에 대하여 다양한 파라미터를 적용, 지오이드 모델을 구축한 후 GPS/Levelling 자료와 비교하여 차이가 가장 적은 경우를 최적의 값으로 선정하였으며, 일련의 지오이드 계산은 Gravsoft를 이용하였다(Forsberg, 2003).

앞서 언급한 네 요소에 대하여 간략히 정리하면 다음과 같다. 하향연속은 비행고도 상의 중력값을 지상의 값으로 환산하기 위한 과정으로 최소제곱콜로케이션(Least Square Collocation; LSC)의 방법론을 적용하였으며, 하향

연속을 위한 변수인 Bjerhammar 구의 깊이와 장파장 감쇠 변수는 경험적으로 많이 이용되는 10km로 선정하였다 (Forsberg, 2002). 이 때, 항공, 지상, 위성고도계 중력 자료를 융합하는 과정이 포함되며, 다양한 중력 자료가 함께 분포하는 지역의 경우 자료 융합을 위한 가중치는 앞서 언급 하였던 각 자료의 정밀도인 0.4mGal, 1.6mGal, 5mGal의 역수로 적용하였다.

Stokes' 적분 반경은 지오이드 모델을 구축할 때 활용할 수 있는 중력 자료가 지역적으로 한정되어 있기 때문에 중력 자료의 장파장 영향을 제거 후 복원할 때 오차가 최소화 될 수 있도록 하는 변수이다. 특히 우리나라의 지상중력 자료의 경우 분포 및 정밀도가 상이한 자료를 통합하여 이용하고 있기 때문에, 기존 중력 자료에 포함된 오차가 새로운 자료에 포함되지 않도록 하기 위해서는 적분반경을 적절하게 제한할 필요가 있다. 본 연구에서는 0.05°, 0.1°, 0.2°, 0.3°, 0.5°, 1°, 3°, 5°, 10°, 전영역과 같이 다양한 경우의 수를 고려하여 최적의 변수를 선정하고자 하였다.

또한, 전 지구적인 효과를 제거하기 위하여 EGM08과 같은 전지구중력장 모델을 이용함에 있어 모델에 포함된 오차가 지오이드 모델에 오차로 작용하지 않도록 최적의 차수를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 Wong 등(1969)이 제안한 Modified Stokes' kernel (또는 Wong-gore modification)을 이용하였으며, 80~90°, 110~120°, 230~240°, 350~360°의 네 경우로 나누어 분석하였다.

이 때, Stokes' 적분반경과 Wong-gore 차수는 상호 영향을 미치는 변수이므로 최종 변수는 두 변수를 상호 조합하여 GPS/Levelling과의 차이가 최소인 경우로 결정하였으며, 그 결과 Stokes' 적분반경은 0.5°, Wong-gore kernel은 110~120°로 선정되었다.

마지막으로 지형효과와 복원반경과 관련된 최적의 값을 결정하는 과정이 필요하다. 제거 및 복원기법은 지오이드를 계산할 때 동일한 양을 뺀 후 다시 더해주는 것을 원칙으로 한다. 그러나 항공중력 자료의 경우는 비행고도 상에서 지형효과를 제거한 후 지상에서 그 값을 복원하게 되는데, 지형의 제거 반경을 200km로 제한하더라도 실제 비행고도 상에서의 자료는 제거 반경 외부 지형의 효과가 유입될 수 있다. 따라서 실제 비행고도 상에서 제거된 효과와 동일한 효과를 나타내는 반경을 지상에서 찾아서 복원해 주어야 한다. 본 연구에서는 200km부터 500km까지 100km 간격으로 다른 반경을 적용하여 최적의 복원반경을 찾고자 하였으며, 그 결과 400km일 때 지오이드 모델과 GPS/Levelling 자료의 차이가 최소가 됨을 알 수 있었다.

위와 같은 과정에 의하여 최종 선정된 변수는 아래 그림 5와 같다.

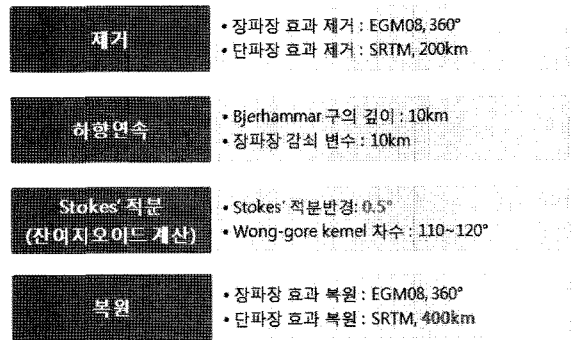


그림 5. 지오이드 구축을 위한 변수 선정

앞서 선정한 각 요소의 값을 적용하여 지오이드 모델을 구축한 결과, 위도 33~39°, 경도 125~130°의 영역에서의 우리나라 지오이드 모델은 28.045m부터 32.692m의 범위의 값을 나타내며, 평균은 25.555m, 표준편차는 3.269m로 계산되었다(그림 6)

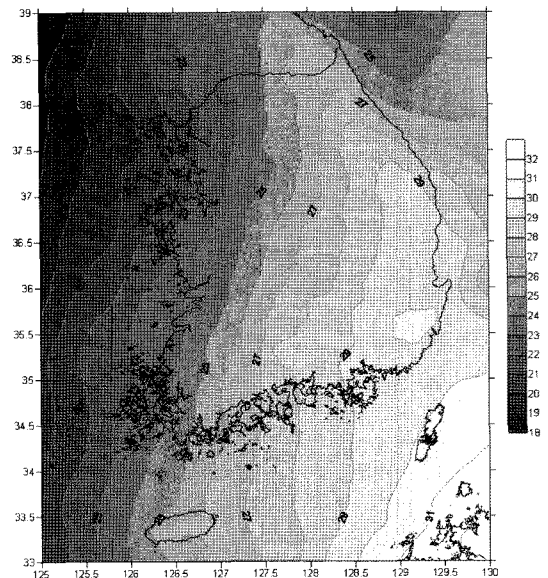


그림 6. 최신 중력지오이드 모델 (단위 : m)

3.3 지오이드 모델의 정밀도 분석

3.2 지오이드 모델 개발에서는 지오이드 모델을 구축하기 위한 최적의 변수를 선정하고, 최신 지오이드 모델을 구

축하였다. 본 장에서는 구축된 지오이드 모델을 GPS/Levelling 자료와 비교함으로써 구축된 지오이드의 정밀도를 분석하고자 한다.

3.3.1 중력지오이드의 정밀도

중력지오이드의 정밀도는 최종 선정된 총 927점의 GPS/Levelling 자료와 비교하여 검증하였다. 그림 7은 중력지오이드와 GPS/Levelling 자료 간의 차이를 나타낸 것이며, 최신 중력지오이드는 GPS/Levelling 자료와 최대 28.80cm, 평균 -14.93cm의 차이를 나타내고, 정밀도는 약 5.29cm로 산출되었다. 그러나 중력지오이드 모델은 전지구중력 흐름에 맞게 계산된 지오이드 모델로서 지형에 따라 지오이드와 GPS/Levelling 자료와의 차이가 다르게 계산될 수 있다. 그림 7에서 A(평지)와 B(산지)는 지형에 따라 중력지오이드의 정밀도가 얼마나 달라지는지 분석하기 위하여 선정된 대상지역으로서, 비교 결과 평지에서의 정밀도는 3.263cm, 산지에서의 정밀도는 4.65cm로 상대적으로 산지에서의 정밀도가 낮음을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7에서 알 수 있듯이 2009년까지 획득된 GPS/Levelling 자료의 경우 경기북부를 포함하여 강원지역에 대한 GPS/Levelling 자료가 빠져있기 때문에 산지에서의 정밀도는 상기 지역의 자료가 모두 채워진 뒤에 객관적으로 검증이 가능할 것으로 판단된다.

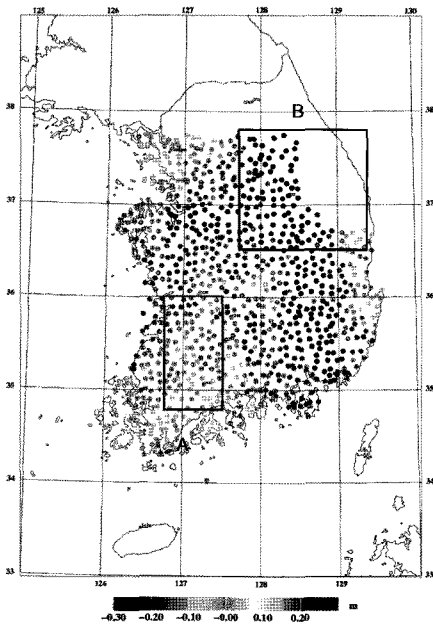


그림 7. 중력지오이드와 GPS/Levelling 자료의 차이 (단위 : m)

또한 중력지오이드는 전지구중력의 흐름에 맞추어 계산된 모델로, 우리나라 수직기준체계와는 차이가 있다. 특히, GPS로부터 획득한 타원체고와 지오이드고를 기반으로 표고를 산출하기 위해서는 우리나라의 수직기준체계와 부합하는 합성 지오이드 모델을 구축한 뒤 이용하였을 때 보다 높은 정밀도를 얻을 수 있기 때문에 다음과 같이 합성 지오이드를 구축하여 활용하는 것이 바람직하다.

3.3.2 합성지오이드의 정밀도

앞서 언급한 바와 같이 중력지오이드 모델은 전지구중력의 흐름에 맞추어져 개발된 모델로서 우리나라의 수직기준체계와는 편이(bias)가 존재하며, 중력지오이드 정밀도에서 살펴본 바와 같이 산악지역에서 GPS/Levelling 자료와의 차이가 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 건설, 토목 등 다양한 분야에서의 활용성을 증대하기 위해서는 중력지오이드 모델을 GPS/Levelling 자료와 융합(fitting)하여 우리나라의 수직기준체계와 부합하는 지오이드 모델을 개발하여야 한다.

본 논문에서는 중력지오이드를 GPS/Levelling 자료와 융합하여 합성지오이드 모델을 구축하고 구축된 지오이드의 정밀도를 분석하는 방법을 적합도와 정밀도 두 가지로 나누어 고려하였다. 먼저, 적합도란 이용 가능한 모든 GPS/Levelling 자료 927점을 중력지오이드와 모두 융합하여 합성지오이드 모델을 구축한 후 다시 927점의 중력 자료와 합성지오이드 모델을 비교하는 방법을 의미한다. 반면 정밀도는 보다 객관적인 비교에 의하여 산출되는 통계값으로, 이용 가능한 GPS/Levelling 자료 중 절반을 이용하여 합성지오이드 모델을 구축하고 나머지 절반의 자료와 합성지오이드 모델을 비교하는 방법이다. 그 결과 최신 합성지오이드 모델의 적합도는 약 2.99cm로 나타났으며, 정밀도는 3.67cm로 산출되었다.

4. 지오이드 모델의 업데이트 효과 분석

본 논문은 최신 지오이드 모델을 구축함과 동시에 2008년부터 2009년까지 획득된 중력 자료를 지오이드 모델 계산에 활용하였을 때 그 효과를 분석하는데 주목적 있다. 따라서 통합기준점 및 수준점 중력 자료가 포함되기 전과 후의 중력지오이드 모델을 비교함으로써 자료의 업데이트에 따른 지오이드 모델의 개선 효과를 분석하고자 하였다.

그림 8은 기존 지상중력 자료와 항공, 위성고도계 자료를 기반으로 구축된 중력지오이드와 총 927점의

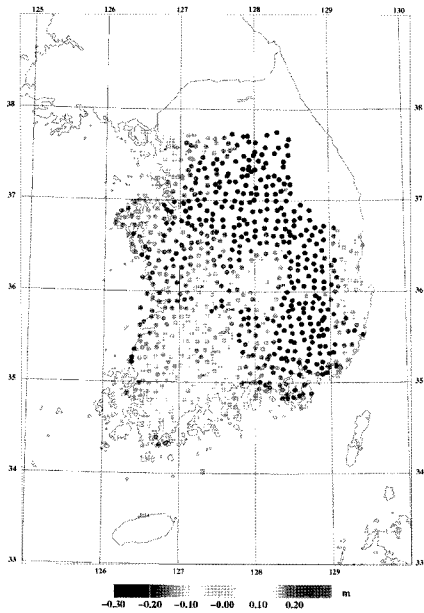


그림 8. 기존 중력지오이드 모델과 GPS/Levelling 자료의 차이 (단위 : m)

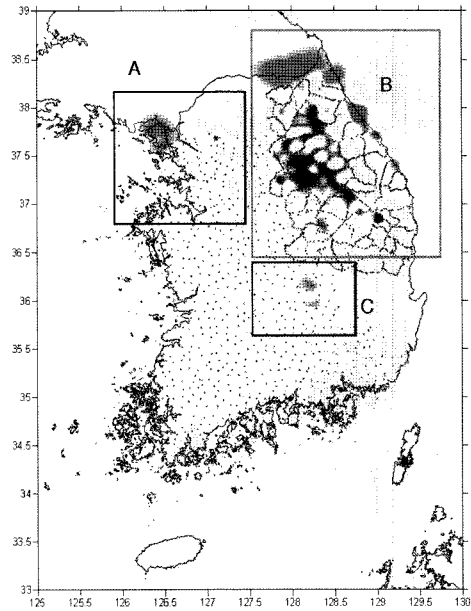


그림 9. 기존 지오이드와 최신 지오이드의 차이 (단위 : cm)

GPS/Levelling 자료와의 차이를 나타낸 것으로 강원도 및 경상도에 인접한 지역에서 GPS/Levelling과 큰 차이를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 수치적으로도 기존 지상중력 자료를 기반으로 한 중력지오이드의 정밀도는 약 7.29cm 반면 최신 중력 자료를 모두 업데이트하여 구축된 중력지오이드 모델의 정밀도는 5.29cm이므로 약 27% 정도 지오이드 모델이 개선되었음을 알 수 있다.

자료에 의한 업데이트 효과는 그림 9에서 나타내는 바와 같이 두 지오이드 모델의 차이를 계산하였을 때 분명히 나타나며, 두 지오이드 모델은 약 -20cm부터 10cm까지의 차이가 있음을 알 수 있다. 상세한 분석을 위하여 두 지오이드 모델의 차이가 상대적으로 크게 나타나는 경기도 서북부 지역(A)과 강원도, 경상도 지역(B), 경상도 서북부 지역(C)에서 중력지오이드 모델과 GPS/Levelling 자료와의 차

이를 표 1에 정리하였다. 표 1을 살펴보면, 업데이트 후에 경기지역은 약 15%, 경상도 서북부 지역은 약 22%의 정밀도가 향상되었음을 확인할 수 있다. 특히, 강원/경상 지역의 대표적인 산악지역으로서 약 42%의 정밀도 향상이 이루어졌으며, 이는 새롭게 획득된 중력자료가 지오이드 모델을 구축하는데 필수적임을 반증하는 것이다.

2010년 국토지리정보원에서는 그림 10에서와 같이 서울 및 강원 일부 지역에서의 통합기준점 신설과 공주, 광주, 경주, 통영 지구에서의 수준점 중력측량사업을 진행하였다(국토지리정보원, 2010). 본 사업을 통하여 중력 자료 약 4,000여점과 GPS/Levelling 자료 약 300여점이 2010년 말까지 획득되었으며, 본 자료들은 향후 지오이드 모델을 업데이트하고 정밀도를 분석하는데 주요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. 자료의 업데이트에 의한 지오이드 모델의 개선 효과

(단위 : cm)

	업데이트 전			업데이트 후		
	범 위	평 균	표준편차	범 위	평 균	표준편차
경 기	-27.30~2.50	-14.72	5.55	-25.60~-3.60	-13.61	4.65
강원 / 경상	-40.90~-7.10	-24.20	7.30	-27.50~-4.70	-18.46	4.23
경 상	-22.50~-3.70	-15.04	5.14	-24.20~-6.20	-15.78	4.02

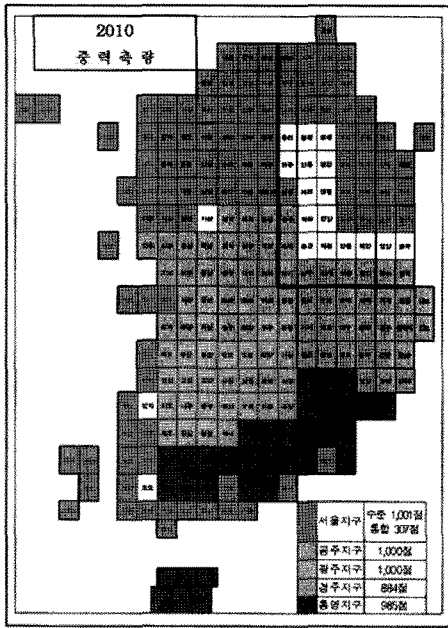


그림 10. 2010년 통합기준점 및 수준점 중력측량사업 계획도

5. 결론

본 논문에서는 2008년 이후로 통합기준점 및 수준점 중력측량사업을 통하여 많은 지상중력 자료가 획득되어지고 있으며, 신뢰성 높은 GPS/Levelling 자료가 확보되고 있기 때문에 본 자료들의 업데이트에 따른 지오이드 모델의 개선 효과를 분석하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국토지리정보원에서 통합기준점 및 수준점 중력측량사업을 통하여 획득한 2,226점의 중력자료를 기존 지상중력 자료와 통합하여 새로운 지상중력자료 데이터 셋을 구축한 후 항공중력 자료, DNSC08 위성고도계 자료를 함께 이용하여 우리나라의 최신 지오이드 모델을 구축하였다. 지오이드 모델은 제거 및 복원 기법에 의하여 계산되었으며, 이 때 하향연속, Stokes' 적분반경, Wong-gore kernel 차수, 지형효과 복원반경 등을 적절히 결정하였다. 그 결과 구축된 중력지오이드 모델은 총 927점의 GPS/Levelling 자료와 비교하였을 때 약 5.29cm의 정밀도를 나타내었다. 합성지오이드 모델은 적합도와 정밀도로 나누어 비교하였는데, 최신 지오이드 모델의 적합도는 약 2.99cm이며, 정밀도는 약 3.67cm로 산출되었다.

둘째, 새롭게 획득된 지상중력 자료가 지오이드 모델의 개선에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 자료가 포함되기 전과 후의 지오이드 모델을 계산하여 그 차이를 비교하였다. 그 결과 기존 모델에 비하여 최신 지오이드 모델은 우리나라 전역에서 정밀도가 약 27% 향상된 것으로 나타났다. 이러한 지오이드 모델의 향상은 자료의 분포가 상대적으로 낮게 나타났던 경기도 북부와 강원도, 경상도 지역에서 크게 나타났으며, 특히 강원도 지역의 경우는 새로운 자료의 확보를 통하여 약 42%의 정밀도 향상이 이루어진 것으로 계산되었다.

셋째, 국토지리정보원에서는 2010년에도 통합기준점 및 수준점 측량사업을 통하여 약 4,000여점의 중력 자료가 추가적으로 획득하였으며, 이를 포함하여 지오이드 모델을 개발한다면 정밀도가 더욱 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 통합기준점 사업에서는 서울지역 및 강원지역에서 약 300점의 GPS/Levelling 자료를 획득하였기 때문에 본 자료를 2008년부터 2009년까지 획득된 927점의 자료와 함께 이용하면 지오이드 모델의 정밀도를 보다 객관적으로 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임

참고문헌

- 국토지리정보원 (2008), 통합기준점측량 사업계획, 국토지리정보원, <http://www.ngii.go.kr/board>.
- 국토지리정보원 (2009), 중력측량(경북지구) 설계설명서 공고, 국토지리정보원, <http://www.ngii.go.kr/board>.
- 국토지리정보원 (2010), 중력측량(통영/서울/광주/공주/경주지구) 설계설명서 공고, 국토지리정보원, <http://www.ngii.go.kr/board>.
- 국토해양부 (2010), 국가기준망 관리혁신 기술개발 완료 보고서, 건설교통기술연구개발사업 지능형국토정보기술혁신사업 R&D / 07국토정보C02, 한국건설교통기술평가원.
- 금영민, 권재현, 이지선, 최광선, 이영철 (2010), 선상 중력 자료의 처리 및 정밀도 분석, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제 18권, 1호, pp. 88~97.

- 윤홍식, 이동하 (2005), Least Square Collocation에 의한 GPS/Levelling의 정확도 개선, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 32권, 4호, pp. 385~392.
- 이석배 (2000), 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제18권, 4호, pp. 359-367.
- 이지선, 권재현, 이보미, 홍창기 (2009a), 항공중력측정에 의한 프리에어 이상 산출, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 2호, pp. 139~147.
- 이지선, 권재현, 이보미, 홍창기 (2009b), 항공중력지오이드 모델 구축 및 검증, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 2호, pp. 159~167.
- 해양수산부 (2005), 정밀 지오이드 모델 구축에 관한 연구, 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업 연구보고서, 부산대학교 SG연구사업단.
- Anderson, O.B., Knudsen, P., Berry, P., Kenyon, S., (2008), The DNSC08 global gravity anomaly field, *EGU 2008 meeting*.
- Forsberg, R., (2002), Downward continuation of airborne gravity data - an Artic case study, *Proc. 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission : Gravity and Geoid 2002*, pp. 51~56.
- Forsberg, R., Tscherning C.C., Kundsén, P., (2003), An overview Manual of the GRAVSOFIT, *Kort & Matrikelstyrelse*.
- Pavlis, N. K., (2008), Development, Evaluation, and Use of Global Earth Gravitational Models(EGM), *IGeS 2008 Int'l Geoid School : The Determination and Use of the Geoid*.
- Wong, L., Gore, R., (1969), Accuracy of geoid heights from modified Stokes kernels, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 18, pp. 81~91.