

# 우리나라 지오이드 모델 구축 및 정밀도 검증

## Development of Korean Geoid Model and Verification of its Precision

이지선<sup>1)</sup> · 권재현<sup>2)</sup> · 백경민<sup>3)</sup> · 문지영<sup>4)</sup>

Lee, Jisun · Kwon, Jay Hyoun · Baek, Kyeong Min · Moon, Jiyeong

### Abstract

The previous geoid model developed in early 2000s shows 14cm level of precision due to the problems on distribution, and quality of the land gravity and GPS/Leveling data. From 2007, the new land and airborne gravity data as well as GPS/Leveling data having high quality and regular distribution has been obtained. In 2011, a new gravimetric geoid model has been constructed with precision of 5.29cm which was improved about 27% comparing to the previous model. However, much more land gravity data has been collected at the control point, bench marks and triangulation points since 2010. Also, GPS/Leveling data having 10km spacing over whole country has been obtained through the project which is for the construction of new control points.

In this study, new gravimetric geoid has been calculated based on the all available gravity data up to present. The geoid height shows the range from 18.05m to 32.70m over whole country and its precision is 5.76cm. The degree of fit and precision of hybrid geoid model are 3.60cm and 4.06cm, respectively. At the end, 3.35cm of the relative precision in 15km baseline has been calculated to confirm its practical usage. Especially, it has been founded that regional bias occurred at the Kangwon and coastal area due to problems on the leveling data. Also, some inland points show inconsistent large difference which needs to be verified by analyzing the unified control points results.

Keywords : Precision Geoid Model, Absolute Precision, Relative Precision

### 초 록

2000년대 초반까지 우리나라 지오이드 모델의 정밀도는 지상 중력 자료 및 GPS/Leveling 자료의 낮은 분포 및 정밀도로 인해 약 14cm 수준에 머물렀다. 그러나 2007년 이후 높은 정밀도와 고른 분포를 나타내는 새로운 지상 및 항공 중력 자료, GPS/Leveling 자료가 획득됨에 따라 지오이드 모델의 정밀도를 향상할 수 있는 기반이 마련되었으며, 2011년 초반에 발표된 중력 지오이드 모델의 정밀도는 약 5.29cm로 기존 모델에 비해 약 27% 향상되었다. 2010년 이후에도 많은 중력 자료가 통합기준점, 수준점 및 삼각점에서 획득되었고, 특히 2010년 통합기준점 구축 사업이 완료됨에 따라 우리나라 전역에서 약 10km의 간격을 나타내는 GPS/Leveling 자료가 구축되어 보다 정밀한 지오이드 모델의 구축 및 검증이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 2012년 현재 우리나라에서 가용한 지상, 항공, 위성고도계 중력 자료를 기반으로 하여 중력지오이드 모델을 구축하였다. 그 결과 우리나라 전역에서 중력 지오이드 모델은 18.05m부터 32.70m의 범위의 값을 나타내며, 정밀도는 약 5.76cm로 산출되었다. 또한, 중력 지오이드 모델과 GPS/Leveling 자료를 융합하여 구축한 합성 지오이드 모델의 적합도 및 정밀도는 각각 3.60cm와 4.06cm로 계산되었다. 마지막으로 건설현장 등에서 합성 지오이드 모델을 활용할 수 있는지 검증하기 위하여 15km 기선거리에 대한 상대 정밀도를 계산한 결과 약 3.35cm로 나타났다. 상대 정밀도가 낮게 나타나는 이유는 강원도 및 동해안, 서·남해안 등에서 우리나라 수직기준체계간의 불일치로 인해 지역적인 편이가 존재하며, 일부 내륙에서도 주변 성과와의 일관성 저하 문제가 나타나는 점들이 있기 때문에 향후 통합기준점 성과에 대한 신뢰도 검증이 필요한 것으로 사료된다.

핵심어 : 정밀 지오이드, 절대 정밀도, 상대 정밀도

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

## 1. 서론

우리나라에서는 1990년 초반부터 많은 지상 중력 자료를 획득하였으나 지구물리탐사를 주목적으로 하였기 때문에 대부분의 자료가 지역적으로 한정되어 분포하고 있다. 이러한 불균등한 자료의 분포로 인하여 2000년대 초반까지 구축된 우리나라 중력 지오이드 모델의 정밀도는 약 14cm 수준에 머물렀다(윤홍식 등, 2005; 이석배, 2000; 해양수산부, 2005).

2007년 이후부터 지능형국토정보기술혁신사업, 국토지리정보원의 통합기준점 구축사업, 수준점 및 삼각점 중력 측량 사업이 실시됨에 따라 우리나라 전역에 걸쳐 고른 분포 및 높은 정밀도를 나타내는 중력 자료가 획득되었다. 이지선 등(2011)은 2007년 이후 획득된 신규 지상 중력 자료와 우리나라에서 가용한 지상 및 항공 중력 자료를 융합하여 정밀도 5.29cm를 나타내는 중력 지오이드 모델을 구축하였다. 이는 기존의 지상 중력 자료만을 기반으로 구축한 지오이드 모델에 비해 약 27% 향상된 결과이며, 특히 산악 지역에서는 정밀도가 42% 향상되었다. 그러나 2010년 이후 정밀지오이드의 중요성이 강조되면서 국토지리정보원의 주도 하에 많은 중력 자료가 측정되고 있고, 신규 중력 자료 및 GPS/Leveling 자료를 포함하여 지오이드 모델의 정밀도를 향상하여야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 2010년 이후 획득된 통합기준점, 수준점, 삼각점 중력 자료 및 통합기준점의 GPS/Leveling 자료를 추가하여 지오이드 모델을 업데이트하고, 통합기준점 GPS/Leveling 자료와 비교하여 지오이드의 정밀도를 분석하였다. 특히, 통합기준점 구축 사업의 완료로 우리나라 전역에서 GPS/Leveling 자료가 약 10km 해상도로 고르게 분포하므로 지오이드와 GPS/Leveling 자료를 직접적으로 비교하여 계산되는 절대적인 정밀도 뿐 아니라 기선 거리를 함께 고려하는 상대 정밀도도 함께 제시하였다.

## 2. 우리나라 중력 및 GPS/Leveling 자료

### 2.1 중력 자료

이론적으로 중력지오이드 모델을 구축하기 위해서는 전 지구에 걸친 중력 자료와 지형자료를 필요로 하지만 이는 현실적으로 불가능하므로 전지구중력장 모델을 기반으로 전반적인 중력신호를 계산한 후 대상지역에서의 중력 자료를 포함하여 지역적인 지오이드 모델을 구축한다. 따라서 높은 정밀도를 갖는 지오이드 모델을 구축하기 위

해서는 대상지역에서 고른 분포와 높은 정밀도를 나타내는 중력 자료를 반드시 확보하여야 한다. 또한, 지오이드 모델의 정밀도 검증 및 지역적인 수직기준체계와 부합하는 합성 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 신뢰할 수 있는 GPS/Leveling 자료 역시 필요하다. 본 장에서는 우리나라의 지오이드 모델을 구축하기 위해 사용할 수 있는 중력 및 GPS/Leveling 자료의 현황을 2012년 현재 시점에서 파악하고, 자료별 장/단점에 대하여 정리하였다.

현재 우리나라에서 이용할 수 있는 중력 자료는 지상, 항공, 선상 및 위성고도계 중력 자료가 있다. 지상 중력 자료는 1960년대 처음 측정된 후 1990년대 초반부터 지구물리탐사를 목적으로 활발히 획득되었다. 그러나 측정 목적이 지하자원탐사에 국한되었기 때문에 자료가 충청이남 및 경상도 등 일부 지역에 제한적으로 분포하고 있다. 2007년 이후부터는 지오이드 모델 및 국가 기준점 구축, 수직기준체계 정표고화 등을 목적으로 하여 계획적인 중력측정을 실시하였으며, 그 결과 우리나라 전역에서 0.05mGal의 높은 정밀도를 갖는 약 8,000여점의 지상 중력 자료를 획득하였다. 그러나 2011년 삼각점에서 획득된 중력 자료 외에 대부분의 지상 중력 자료가 측정의 편의상 평지에 위치하고 있기 때문에 아직까지는 산악지역에서의 중력신호를 적절히 반영할 수 없다는 문제점이 있다.

해상에서는 1997년부터 국립해양조사원에 의하여 측정되어 온 선상 중력 자료와 위성고도계 자료를 이용할 수 있다. 대표적인 위성고도계 자료는 2008년 발표된 DNSC08 모델로 육지로부터 약 10km 떨어진 해상에서 약 10km의 해상도로 분포하며, 정밀도는 5mGal 수준이다(Anderson 등, 2008). 반면 국립해양조사원의 선상 중력 자료는 약 10m 간격으로 높은 해상도를 나타내며, 정밀도는 약 1.2mGal 수준으로 위성고도계 자료에 비해 품질이 우수하다. 그러나 선상 중력 자료의 경우 연도별로 구역을 나누어 측정된 후 통합망조정이 실시되지 않아 서해 및 남해 일부 지역에서 중력 자료 간의 편이(bias)가 존재하는 것으로 알려져 있기 때문에 지오이드 모델 구축 시에 활용하기에는 한계가 있다. 2011년부터 국립해양조사원에서 국가해양기본조사 통합자료 분석 및 도면제작 사업을 통해 지역적인 자료의 통합 및 단일화 연구를 진행하고 있으므로 선상 중력 자료는 본 사업이 완료된 후 활용하는 것이 바람직하다(국립해양조사원, 2011).

앞서 설명한 바와 같은 많은 중력 자료가 획득되었음에도 불구하고 지상과 해상 중력 자료 간에 공백이 존재하며, 산악 지역에서는 지상 중력 자료가 고도가 낮은 지역에 주

표 1. 우리나라 중력이상값

구 분		중력이상값				정밀도 (mGal)		
		측점수	범 위	평 균	표준편차			
지상	기존 (2007년 이전)		10,611	-29.14 - 166.54	21.69	20.38	0.4	
	지능형국토정보기술혁신사업		486				0.1	
	국토지리정보원	통합기준점 (2008-2010년)					1,200	0.05
		수준점 (2009-2010년)					6,333	
		삼각점 (2011년)					469	
항공		27,343	-26.68 - 118.12	26.70	17.82	1.56		
위성고도계 (DNSC08)		8,822	-139.32 - 100.00	8.50	17.28	5		

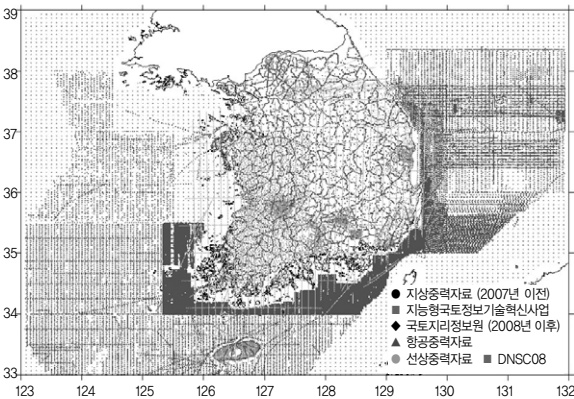


그림 1. 우리나라 중력 자료 분포도 (2012년 기준)

로 분포한다는 문제점이 있다. 특히, 연안지역의 경우 선박의 접근이 불가능하고, 위성고도계 자료도 육지에 가까운 자료는 다중반사에 의해 정밀도가 크게 저하되는 것으로 알려져 있기 때문에 육지로부터 약 10km 이내에는 중력 자료가 분포하지 않는다. 2009년 지능형국토정보기술혁신사업에서 연안 및 산악지역에서의 중력 자료를 확보하기 위해 주노선 간격을 10km로 하여 항공 중력측정을 수행하여 정밀도 약 1.5mGal의 자료를 획득한 바 있으므로 연안 및 산악지역에서의 중력 자료로 항공 중력 자료를 이용할 수 있다(이지선 등, 2009).

그림 1은 현재 우리나라에서 가용한 지상, 항공, 선상 및 위성고도계 자료의 분포를 나타낸 것이며, 표 1은 각 자료별 중력이상값(free-air anomaly)의 범위 및 정밀도를 정리한 것이다.

## 2.2 GPS/Leveling 자료

2007년 이전에 획득된 GPS/Leveling 자료는 많은 항공측량 업체들의 사업을 통하여 수집되었으나 측정 시기, 처리

과정 등이 명확히 제시되지 않아 신뢰할 수 없으며, 특히 전라도 일부 지역에서는 오류가 있는 것으로 알려져 있다(국토해양부, 2010).

2008년부터 시작된 통합기준점 사업을 통해 획득된 약 1,200여점의 GPS/Leveling 자료는 그림 2에서 나타내는 바와 같이 우리나라 전역에서 약 10km 간격으로 고르게 분포하며, cm 수준의 정확도를 갖는 위치 및 높이 정보를 포함하므로 지오이드 모델의 정밀도 검증 및 지역적인 합성 지오이드 모델 구축 시 본 자료를 이용하는 것이 바람직하다. 단, 우리나라의 경우는 육상과 도서 지역 간의 수직기준체계가 이원화 되어 있다는 문제점이 있으므로 GPS/Leveling 자료는 육상지역에 한정하여 이용하여야 한다.

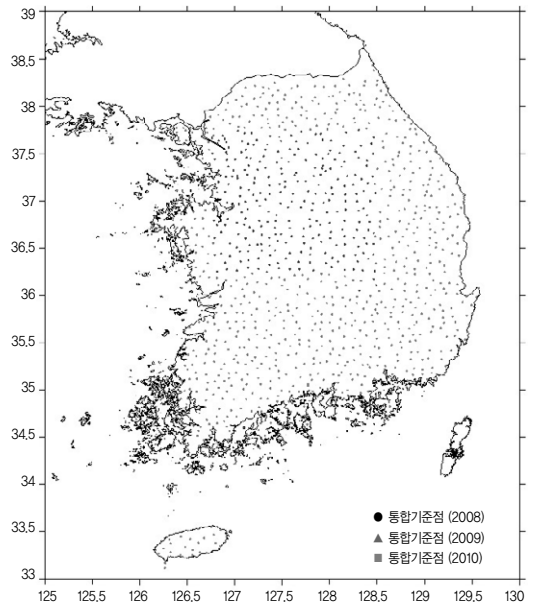


그림 2. 신규 GPS/Leveling자료 (2008~2010년)

### 3. 최신 지오이드 모델 개발

#### 3.1 대상자료

앞서 언급한 바와 같이 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 대상 지역의 중력신호를 적절히 표현할 수 있는 중력 자료와 장파장 및 단파장 효과를 제거 및 복원하기 위한 전 지구중력장 모델 및 지형자료가 필요하다. 현재 가장 널리 사용되는 전지구중력장모델과 지형자료는 EGM2008 (Earth Geopotential Model 2008)과 SRTM(Shuttle Radar Terrain Model)로서 본 연구에서도 동일한 모델을 이용하였다. 중력 자료는 자료 간의 편이 제거를 위해 통합재처리 사업이 진행 중인 선상 중력 자료를 제외하고 지상, 항공, 위성고도계 자료를 활용하였다.

#### 3.2 지오이드 모델 개발

중력지오이드 모델의 계산 과정은 1) 장파장 및 단파장 효과 제거, 2) 항공 중력 자료의 하향연속, 3) 잔여지오이드고 계산, 4) 장파장 및 단파장 효과 복원의 네 단계로 구성되며, 합성 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 중력지오이드와 지역적인 GPS/Leveling 자료를 융합하는 과정이 추가된다.

지오이드 계산 과정을 간략히 살펴보면, 첫 번째, 지상, 항공, 위성고도계 자료로부터 장파장 효과와 단파장 효과를 제거하는 과정으로 본 과정에서는 전지구중력장 모델의 최대 차수를 몇 도로 한정할 것인지, 지형에 의한 단파장 효과를 계산할 때 각 중력 자료로부터의 반경을 몇 km 까지 적용할 것인지를 적절히 결정하여야 한다.

두 번째, 지상 및 위성고도계 자료와 달리 항공 중력 자료는 특정 고도 상에서 측정된 자료이므로 다른 중력 자료와 융합하여 활용하기 위해서는 높이 0m의 값으로 환산하는 하향연속(downward continuation)이 필요하다. 본 연구에서는 최소제곱콜로케이션(Least Square Collocation; LSC) 기법을 이용하였으며, 이 때 Bjerhammar 구의 깊이와 장파장 감쇠변수를 최적으로 계산하여야 한다.

세 번째, 장파장 효과와 단파장 효과가 제거된 잔여 중력이상값을 높이 0m 상의 값으로 환산하였다면, Stokes' 적분을 통하여 잔여 지오이드고를 계산한다. 이론적으로 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 전 지구에 대하여 적분을 수행하여야 하나 가능한 중력 자료가 지역적으로 한정되어 있고, 이질의 중력 자료를 복합적으로 활용하기 때문에 자료에 포함된 오차가 지오이드에 전파되지 않도록 적분 반경을 제한하여야 한다. 더불어 전지구중력장 모델 구축 시 우리나라 중력 자료가 포함되어 있지 않아 발생할 수 있는 오차를 최소화

기 위해 신뢰할 수 있는 최대 차수를 선정하여야 한다.

네 번째, 앞서 제거하였던 장파장 및 단파장 효과를 복원하여 중력 자료 기반의 지오이드 모델을 계산하고, 마지막으로 중력 지오이드와 지역적인 수직기준체계 간의 차이를 최소화하도록 GPS/Leveling 자료와 중력 지오이드를 융합하여 합성지오이드 모델을 구축한다.

본 연구에서는 상기 다섯 단계에 따라 지오이드 모델을 구축하였으며, 장파장 및 단파장 효과 제거 및 복원반경, Stokes' 적분 반경 등은 이지선 등(2011)에 의해 발표된 논문의 값을 적용하였다. 그림 3은 일련의 지오이드 모델을 계산하기 위한 과정과 각 단계별로 적용한 최적 변수를 나타낸 것이다.

그림 4는 위의 산출과정을 통하여 결정된 우리나라 중력 지오이드 모델이며 위도 33~39°, 경도 125~130°의 영역에서 18.05m부터 32.70m의 범위의 값을 보인다. 평균은 25.56m, 표준편차는 3.27m로 산출되었다(그림 4)<sup>4)</sup>.

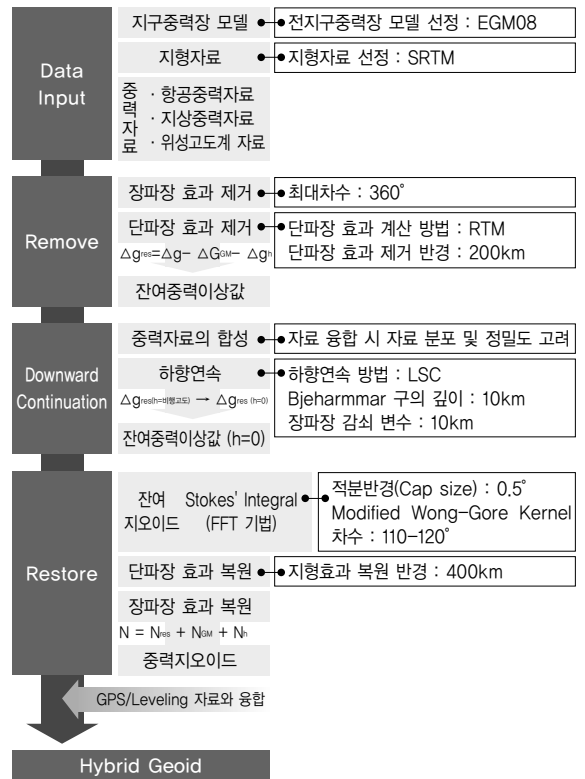


그림 3. 지오이드 계산 과정 및 변수 (이지선 등, 2011)

4) 정정 : 이지선 등(2011)에 의해 발표된 논문에 지오이드고의 범위가 28.045m부터 32.692m로 기재되어 있습니다(p. 85). 28.045m는 논문 제출 시 오타로 18.045m로 수정합니다.

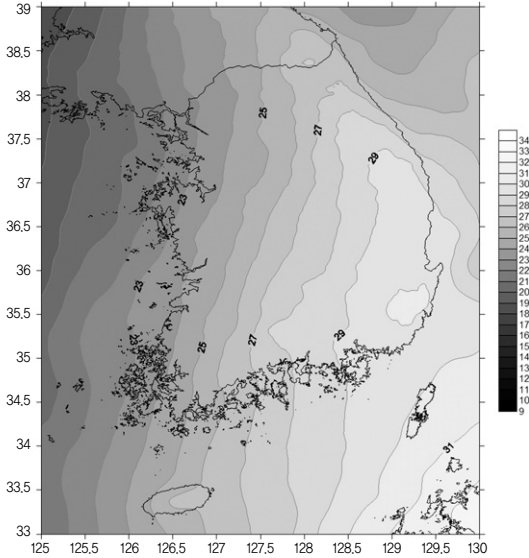


그림 4. 우리나라 중력지오이드 (unit : m)

#### 4. 지오이드 모델의 정밀도

중력 및 합성 지오이드 모델의 정밀도는 GPS/Leveling 자료와 비교하여 검증하는 것이 일반적이다. 이 때, 비교 방법에 따라 절대적인 정밀도와 상대적인 정밀도로 나눌 수 있는데, 절대적인 정밀도란 중력 또는 합성 지오이드 모델을 GPS/Leveling 자료와 직접 비교하여 그 차이를 기반으로 산출한 통계량을 의미하고, 상대적인 정밀도란 지오이드 모델과 GPS/Leveling 자료와의 차이를 기선 길이에 따라 비교하는 것을 의미한다. 다시 말해서 상대적인 정밀도란 일정 거리에 대해 지오이드 모델과 GPS/Leveling 자

료의 차이를 계산한 후 산출한 RMS(Root Mean Square)값이다.

일반적으로 중력 지오이드 모델의 정밀도는 GPS/Leveling 자료와의 차이값의 표준편차값인 절대 정밀도로 대표된다. 반면 GPS/Leveling 자료와 융합하여 구축된 합성 지오이드 모델의 경우는 융합 시 활용되는 GPS/Leveling 자료에 따라 정밀도가 달라지므로 절대 정밀도를 가용한 모든 GPS/Leveling 자료와 융합한 후 재비교하는 적합도와 가용한 자료 중 절반의 GPS/Leveling과 융합한 후 나머지 자료와 비교하는 정밀도로 나눌 수 있다. 마지막으로 건설 등 응용분야에서 합성 지오이드 모델을 실제 활용할 수 있는지 판단하기 위해서는 일반적인 수준측량에서와 같이 기선에 따른 상대 정밀도를 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 앞서 계산한 중력 지오이드의 절대 정밀도를 계산한 후 가용한 GPS/Leveling 자료를 이용하여 합성 지오이드 모델을 구축하고 이에 대한 절대 및 상대 정밀도를 산출 및 검증하였다(그림 5).

#### 4.1 중력 지오이드의 절대 정밀도

그림 6은 중력 지오이드와 GPS/Leveling 자료를 비교한 결과로, 최대 47.7cm, 평균 -14.29cm의 차이를 나타내며, 정밀도는 약 5.76cm로 나타났다. 지역적인 정밀도를 검증하기 위해 산악 및 평지지역으로 나누어 정밀도를 비교한 결과, A(평지)에서의 정밀도는 3.65cm, B(산악)에서의 정밀도는 7.85cm로 상대적으로 산악에서의 정밀도가 낮게 나타난다.

2011년에 발표된 중력 지오이드 모델의 정밀도와 비교하면, 우리나라 전역에서의 정밀도는 5.29cm, 평지와 산악 지역에서의 정밀도는 각각 3.26cm와 4.65cm로 본 논문에서

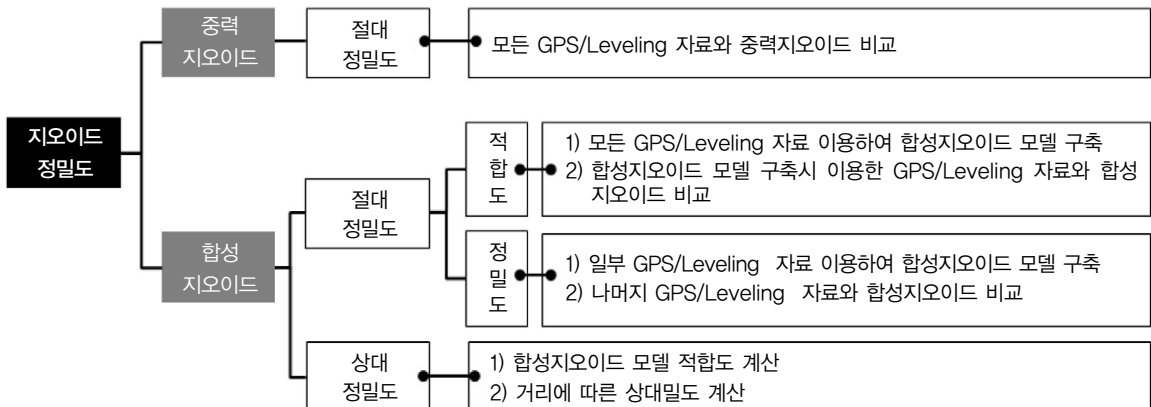


그림 5. 지오이드 모델의 절대 정밀도 및 상대 정밀도



그림 6. 중력지오이드 정밀도

새롭게 구축한 지오이드 모델의 정밀도가 더 낮게 나타난다. 이는 2011년에 지오이드 모델의 정밀도를 검증할 때는 경기 북부 및 강원도 산악지역에서의 GPS/Leveling 자료에 대한 최종 성과가 도출되기 이전으로 산악 지역에서의 일부 GPS/Leveling 자료만을 기반으로 정밀도를 산정하였기 때문이다. 그러나 2010년까지 구축이 완료된 통합기준점 GPS/Leveling 성과를 이용하여 산악지역에서의 정밀도를 객관적으로 재평가한 결과, 정밀도는 약 7.85cm 수준으로 나타났다. 산악에서의 정밀도가 평지보다 낮게 나타나는 이유는 대부분의 GPS/Leveling 자료가 평지에 분포하기 때문에 항공 및 삼각점 중력 자료를 통하여 정밀하게 계산한 실제 중력신호와 차이가 있기 때문으로 판단된다.

반면 평지에서의 정밀도가 미소하지만 저하된 것은 2010년 이후 새롭게 획득된 삼각점 및 수준점에서의 중력 자료를 추가하여 발생한 효과로서 기존 중력 자료와 통합 기준점, 수준점 및 삼각점 중력자료 간의 통합 검증 및 처리가 완료되지 않아 일부 지점에서 중력자료 간 차이가 지오이드 모델에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 현재 국토지리정보원의 국가 지오이드 모델 개발 연구에서 자료의 통합 및 신뢰도 분석이 수행되고 있으므로 평지에서 신뢰할 수 있는 중력 자료가 재구성된다면 보다 향상된 정밀도를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4.2 합성지오이드의 절대 정밀도

전지구중력장 모델을 기반으로 구축된 중력지오이드는 지역적인 수직기준체계와는 편이가 존재하므로 중력지오이드와 GPS/Leveling 자료를 융합하여 합성 지오이드 모델을 구축하였으며, 합성 지오이드 모델의 절대 정밀도는 앞서 언급한 바와 같이 적합도와 정밀도로 나누어 검증하였다.

적합도는 총 1,086점의 GPS/Leveling 자료와 중력 지오이드 모델을 융합한 후 다시 1,086점의 GPS/Leveling 자료와 비교한 결과로 내륙에서 최대 28.10cm의 차이를 나타내며, 표준편차는 3.60cm로 계산되었다(그림 7). 반면 가용한 자료 중 절반인 543점의 GPS/Leveling 자료를 기반으로 융합한 후 나머지 543점의 자료와 비교하였을 때의 표준편차는 4.06cm로 적합도와 정밀도 모두 약 4cm 내외로 나타났다.

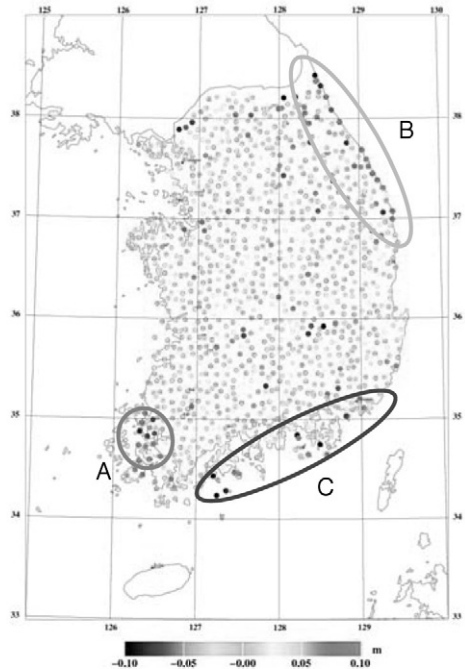


그림 7. 합성 지오이드 적합도

앞서 정밀 지오이드 모델과 동일하게 산악과 평지로 나누어 살펴보면, 평지에서의 적합도와 정밀도는 2.87cm, 3.40cm로 약 3cm 수준이고, 산악에서는 각각 4.14cm와 4.85cm로 나타났다.

#### 4.3 합성지오이드의 상대 정밀도

합성 지오이드 모델의 상대 정밀도는 1,086점의 GPS/Leveling 자료와 융합하여 구축한 합성 지오이드 모델

을 대상으로 계산하였으며, 이 때, 기선거리는 통합기준점의 배치 간격이 약 10km 내외로 알려져 있으므로 최소한 점 이상이 포함될 수 있도록 15km로 하였다. 그 결과 우리나라 전역에서의 상대 정밀도는 약 3.35cm로 계산되었으며, 합성 지오이드 모델의 적합도가 낮은 전라도 지역(A), 강원도 산악 및 동해 연안지역(B)과 남부 연안(C) 지역에서는 그림 8과 같이 낮은 상대 정밀도를 나타내었다. 상기 지역들은 중력 지오이드 모델과 GPS/Leveling 자료를 비교하였을 때, 또한 합성 지오이드 모델과 GPS/Leveling 자료를 비교하였을 때 모두 차이가 크게 나타나는 지역으로 GPS/Leveling 자료를 구성하는 수준망 측, 표고 자체에 지역적인 편이가 존재하는데 그 원인이 있다고 판단된다.

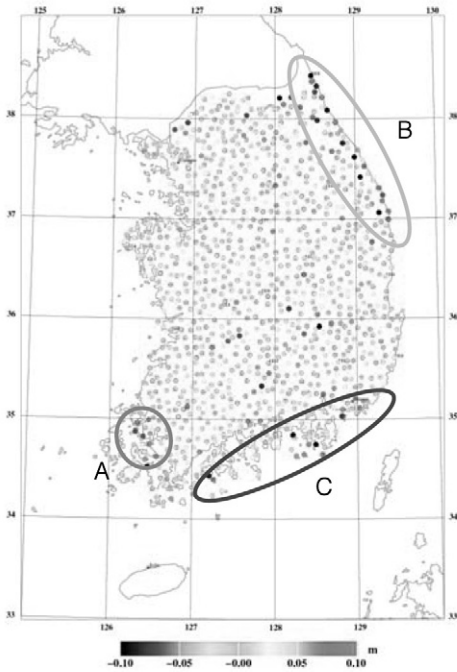


그림 8. 합성 지오이드 상대 정밀도

우리나라의 수준망은 1등, 2등 수준측량으로 나누어 측량한 후 1등 수준망은 인천 수준원점을 고정하여 망조정을 실시하고, 2등 수준망은 1등 수준망과 연결한 후 인천 수준원점을 고정하여 망조정을 실시한 성과로 알려져 있다(국토지리정보원, 2011). 일반적으로 수준측량의 성과는 고정점으로부터 거리가 멀어질수록 정밀도가 저하되는데, 동해안의 경우는 태백산맥을 넘어 측량하면서 관측오차가 누적되었고 이를 인천 수준원점에 고정하였기 때문에 지역적인 편이가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 2등 수준점

들도 기본적으로 1등 수준점들을 기반으로 수준측량을 실시하므로 동해안 산악 및 연안지역에서 전반적인 편이가 발생하게 된다. 반면 서남해안의 경우는 2000년부터 2005년까지 실시된 2등 수준망 재측량 사업에서 제외된 지역으로 기존의 성과를 이용하였기 때문에 주변 지역과의 차이가 발생한 것으로 사료된다.

그 외 주변점과 달리 내륙에서 이산적으로 적합도 및 상대 정밀도가 낮게 나타나는 점은 통합기준점에서의 GPS 측량 또는 수준측량 시 오차가 포함되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 이용한 GPS/Leveling 자료 및 중력 자료는 지구별로 산정한 성과를 이용한 것으로 2012년 현재 통합기준점 위치 성과의 망조정에 따라 타원체고가 일부 조정되거나, 통합기준점 측량 시 기준이 되는 표고 성과가 업데이트 된 점들이 존재한다. 또한, 일부 통합기준점은 망실로 인해 이설된 경우도 있다. 따라서 합성 지오이드 모델의 상대 정밀도는 통합기준점 높이(타원체고 및 표고) 성과에 대한 검증이 완료된 후 재산정할 필요가 있으며, 최종 성과 산출 시에는 상대 정밀도가 일부 지역에서 여전히 낮게 나타나는지 확인하여야 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 우리나라에서 가용한 지상, 항공, 위성고도계 중력 자료를 기반으로 지오이드 모델을 구축하고, 지오이드 모델의 정밀도를 산출하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 기존 지구물리탐사를 위해 획득된 지상 중력 자료와 2007년 이후 새롭게 획득된 지상, 항공 중력자료 및 위성고도계 자료, EGM08 전지구중력장 모델 및 지형자료를 기반으로 구축한 우리나라 중력 지오이드 모델은 위도 33~39°, 경도 125~130°의 영역에서 18.05m부터 32.70m의 범위의 값을 나타내며, 2010년까지 구축이 완료된 통합기준점 GPS/Leveling 자료와 비교한 결과 중력 지오이드 모델의 정밀도는 5.76cm로 계산되었다. 2011년에 구축된 중력 지오이드와 비교하여 보면, 평지에서의 중력 지오이드 정밀도는 3.65cm로 새롭게 추가된 중력 자료와 기존 자료 간의 차이로 약 4mm 저하되었으나 이는 중력자료 간의 차이에 기인한 것으로 향후 중력자료 간의 통합 및 검증이 완료되면 보다 높은 정밀도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 산악지역의 경우는 2011년 당시 가용하였던 통합기준점 GPS/Leveling 자료만을 대상으로 산출되었던 수치로 새롭게 획득된 자료를 모두 포함하여 객관적으로 재검증

한 결과 정밀도는 7.85cm로 산출되었다. 이는 삼각점 및 항공 중력 자료를 통하여 산악지역에서의 중력신호를 반영하여 지오이드를 계산한 후 평지에 위치하는 GPS/Leveling 자료와 비교하여 발생하는 효과이다. 따라서 산악 지역에서의 지오이드 모델의 정밀도를 보다 객관적으로 검증하기 위한 GPS/Leveling 자료의 확보가 필요하다.

둘째, 중력 지오이드 모델과 가용한 GPS/Leveling 자료를 융합하여 합성 지오이드 모델을 구축한 결과 적합도 및 정밀도는 각각 3.60cm와 4.06cm로 약 4cm 수준을 나타내었다. 더불어 합성 지오이드 모델을 건설 현장 등에서 직접 사용할 수 있는지 검증하기 위해 15km 기선 거리에 대한 상대 정밀도를 계산한 결과 3.35cm로 나타났다. 내륙에서는 일부 GPS/Leveling 자료의 높이 성과 오류로 상대정밀도가 저하되는 지점이 불규칙하게 나타나는 반면 강원도 및 동해안, 서해 및 남해안 일부에서는 지역적으로 상대정밀도가 저하되는 경우가 발생하였다. 이는 우리나라 수직기준 성과를 인천 수준원점 1점을 고정하여 산출하다보니 거리가 상대적으로 멀리 떨어져 있는 동해안 지역에서 오차의 전파로 편이가 발생하였고, 서해안 및 남해안 지역은 2등 수준 재측량에서 제외된 지역으로 구성과를 사용하였기 때문으로 판단된다.

셋째, 국토지리정보원에서는 기준점의 망실, 이설점에 대한 신규 측량을 통해 성과를 업데이트하고 있으며 이에 따라 수준 및 통합기준점 성과도 변하게 된다. 본 연구에서 이용한 자료는 중력 및 GPS/Leveling 측량이 실시된 시점의 자료로 현재 시점까지 기준점의 이설 및 성과의 업데이트가 이루어진 점들이 존재한다. 특히, 통합기준점 자료의 경우 통합재처리를 거쳐 위치 및 타원체고 성과가 재산정되었고, 수준점 성과도 갱신되고 있으므로 신뢰할 수 있는 GPS/Leveling 자료를 재구성할 필요가 있다. 또한, 기존에 획득된 중력 자료와 새롭게 획득된 중력자료 간의 편이가 최소화 되도록 중력자료 간의 비교 검증도 실시되어야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

국립해양조사원(2011), 국가해양기초조사 통합자료 분석 및 도면제작 완료보고서, 국립해양조사원.

국토지리정보원(2011), 국가 수직기준체계 수립을 위한 연구 연구보고서, 국토지리정보원.

국토해양부(2010), 국가기준망 관리혁신 기술개발 완료 보고서, 건설교통기술연구개발사업 지능형국토정보기술혁신사업 R&D/07국토정보C02, 한국건설교통기술평가원.

윤홍식, 이동하(2005), Least Square Collocation에 의한 GPS/Leveling의 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(2009), 항공중력측정에 의한 프리에어 이상 산출, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 2호, pp. 139-147.

이지선, 권재현, 금영민, 문지영(2011), 최신 중력 자료의 획득을 통한 우리나라 지오이드 모델 업데이트, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제29권, 1호, pp. 531-537.

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*.