GPS/Leveling 자료를 이용한 최신 전지구중력장 모델의 정밀도 검증

Precision Verification of New Global Gravitational Model Using GPS/Leveling Data

백경민¹⁾ · 권재현²⁾ · 이지선³⁾

Baek, Kyeongmin · Kwon, Jay Hyoun · Lee, Jisun

Abstract

The global gravitational model is essential for precision geoid model construction. Also, it would be used as basic scientific data in geophysical and oceanographic fields. In Korea, EGM2008 has been used from the late 2000s. After publishing EGM2008, new gravitational models such as GOCO02S, GOCO03S, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 based on GOCE data were developed. Therefore, we need to verify recent models to select optimal one for geoid computation in Korea. In this study, we compared new models generated based on the GOCE data to EGM2008 and verified the precision of models by comparing with NGII(National Geographic Information Institute) GPS/Leveling data. When comparing EIGEN models to EGM2008, the difference is about 8cm. On the other hand, about 70cm of difference between GOCO models and EGM2008 has been calculated. The reason for this is because GOCO models have been developed using only satellite data while EGM2008 has been used gravity and altimeter data as well as satellite data. When comparing global gravitational model to GPS/Leveling data, EGM2008 showed the best precision of 6.1cm over whole Korean peninsula. The new global gravitational model using additional GOCE data will be published consistently, so the precision verification of new model should be continued.

Keywords : Global Gravitational Model, GOCE, GPS/Leveling Data, Precision Verification

초 록

전지구중력장 모델은 지오이드 모델 개발 시 기반자료로 이용하며 지구물리, 해양 등 다양한 과학적 연구 목적으로도 활용할 수 있기 때문에 정밀한 전지구중력장 모델을 확보하는 것이 중요하다. 우리나라에서는 2000년대 후반까지 EGM2008 모델을 활용하여 왔으나 최근 GOCE 위성 관측자료를 기반으로 한 신규 전지구중력장 모델들(GOCO02S, EIGEN-6C, GOCO03S, EIGEN-6C2)이 발표되고 있으므로 최신 모델들에 대한 검증을 거쳐 우리나라에 가장 적합한 모델을 선정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 EGM2008 모델과 GOCE 자료를 기반으로 구현된 네 모델을 상호 비교하고, 통합기준점 GPS/Leveling 자료와 비교하여 모델의 정밀도를 검증하였다. EIGEN 모델은 위성 관측자료와 가용한 육상, 위성고도계 자료를 복합 사용하기 때문에 차수가 증가하더라도 EGM2008 모델과의 차이가 약 8cm 수준으로 균일하게 나타난다. 반면 GOCO 모델들의 경우 위성 중력자료만을 이용하기 때문에 EGM2008 모델과의 차이가 차수가 높아질수록 증가하며, 최대차수 250일 때의 차이는 70cm 수준에 이른다. 전지구중력장 모델과 통합기준점 GPS/Leveling 자료와 비교하였을 때는 EGM2008 모델과의 차이가 우리나라 전역에서 6.1cm로 가장 작게 나타났다. 현재 더 높은 정밀도 및 해상도를 갖는 EIGEN-6C2 모델의 후속 모델이 개발 중이므로, 최신 모델에 대한 정밀도 검증을 지속적으로 수행하여 지오이드 모델 개발 시 반영하여야 할 것이다.

핵심어 : 전지구중력장 모델, GOCE 중력탐사 위성, GPS/Leveling 자료, 정밀도 검증

1) Member, Master Student, Department of Geoinformatics, University of Seoul, Republic of Korea (E-mail: kbaek@uos.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Professor, Department of Geoinformatics, University of Seoul, Republic of Korea (E-mail: jkwon@uos.ac.kr)

3) Member, Ph.D. Candidate, Department of Geoinformatics, University of Seoul, Republic of Korea (E-mail: leej@uos.ac.kr)

1. 서론

이론적으로 정밀한 지오이드 모델을 구현하기 위해서는 지구에 걸친 연속적인 중력자료가 필요하지만 현실적으로 이는 불가능하다. 따라서 전 지구의 중력신호를 적절히 반영하는 전지구중력장 모델과 대상지역의 특성을 적절히 반영하는 지형자료 및 중력자료를 융합하여 지오이드 모델을 구축하게 된다. 다시 말해서, 지역적인 지오이드는 일반적으로 중력자료로부터 전지구중력장 모델과 지형자료에 의하여 계산되는 장파장 및 단파장 효과를 제거한 후, 이를 적분하여 계산된 잔여 지오이드고에 제거된 효과를 다시 복원하여 계산되므로, 전지구중력장 모델은 지오이드의 정밀도에 직접적인 역할을 미치는 요인이 된다. 따라서 우리나라의 정밀한 지오이드 모델을 결정하기 위해서는 우리나라에 가장 적합한 전지구중력장 모델을 선정하는 것이 필요하다. 또한, 전지구중력장 모델이 위성 및 육상 중력자료를 기반으로 구현된 모델인 만큼 측지, 지구물리, 해양 등 과학적인 연구 분야에 있어서 기초자료로 활용될 수 있다.

우리나라에서는 지오이드 모델을 구축함에 있어 당시 가용한 전지구중력장 모델을 GPS/Leveling 자료와 비교하여 차이가 가장 적은 전지구중력장 모델을 이용하여 왔다. 2000년대 초반에는 EGM(Earth Gravitational Model)96, EIGEN(European Improved Gravity model of the Earth by New techniques)-CG03C 등의 모델을 활용하였으며, EGM2008 모델이 발표된 이후부터는 이를 이용하고 있다 (Lee, 2000; Lee *et al.*, 2008b; NGII, 2012). 또한 GPS/Leveling 자료를 이용한 우리나라에서의 EGM2008 모델 정확도 검증에 대한 연구가 수행된 바 있다 (Lee *et al.*, 2008a; Huang *et al.*, 2009). 최근 2009년 발사된 GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) 중력탐사위성으로부터 획득한 자료를 기반으로 한 신규 전지구중력장 모델이 다수 발표되었으나, 신규 모델에 대한 분석이 미국, 캐나다, 호주, 일본 등 일부 국가에 한정되어 수행되었을 뿐 우리나라에서의 정밀도는 밝혀진 바 없다. 또한 GOCE 관측자료의 정밀도가 기존의 탐사위성인 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)에 비해 높은 것으로 알려져 있는 만큼 신규 전지구중력장 모델에 대한 정밀도 분석을 수행하여 지오이드 모델 개발을 위한 기반자료로서의 활용성을 검증할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 EGM2008 및 GOCE 기반의 최신 전지구중력장 모델을 대상으로 GPS/Leveling 자료와 비교하여 정밀

도를 검증하고, 우리나라에 가장 적합한 전지구중력장 모델을 선정하였다.

2. 전지구중력장 모델

2.1 전지구중력장 모델의 정의

전지구중력장 모델은 육상 중력자료, 위성고도계 자료 및 인공위성 궤도관측에 의한 중력자료 등을 합성하여 지구 전체에 대한 평균 중력이상값을 구면조화분석에 의하여 계산한 모델로, NGA(National Geospatial-Intelligence Agency), ESA(European Space Agency), GFZ(GeoForschungsZentrum Potsdam) 등 개발 기관에서는 차수(degree), 위수(order)에 따라 정규화된(Fully normalized) 구면조화계수를 제공한다 (Pavlis *et al.*, 2008; Mayer-Gürr *et al.*, 2012; Förste *et al.*, 2012). 이 때, 차수와 위수가 0일 때는 지구의 실제 질량과 사용된 기준타원체의 질량을 동일하게 간주하기 때문에 구면조화계수 $\bar{C}_{00}$, $\bar{S}_{00}$ 이 각각 1과 0이고, 차수와 위수가 각각 1과 0, 1과 1일 때는 지구의 질량 중심과 사용된 좌표계의 원점이 일치하기 때문에 구면조화계수가 0이므로 일반적으로 차수 2 이상부터 구면조화계수를 제공한다 (Jekeli, 1999).

이론적으로 구면조화계수가 주어졌을 때, 목표표 하는 해상도에 따라 차수와 위수를 정하여 더하면 Eq. (1), (2)에서 나타내는 바와 같이 원하는 위치 P에서의 중력이상값(Δg)과 지오이드고(N)를 계산할 수 있다 (Heiskanen and Moritz, 1967).

$$\Delta g = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^{N_{max}} (n-1) \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda_P + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda_P] \bar{P}_{nm}(\sin \phi_P) \quad (1)$$

$$N = R \sum_{n=2}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda_P + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda_P] \bar{P}_{nm}(\sin \phi_P) \quad (2)$$

여기서, GM : 중력상수($= 3986005 \times 10^8 m^3/s^2$)

R : 지구의 평균반지름($= 6371008.7714m$)

n, m : 차수, 위수

$\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$: 정규화된 구면조화계수

$\bar{P}_{nm}$: 르장드르 함수 (Legendre function)

ϕ_P, λ_P : 지점 P의 위치 (위도, 경도)

2.2 최신 전지구중력장 모델

전지구중력장 모델은 1966년 SE(Standard Earth)1 모델을 시작으로 개발되어 왔으며 현재까지 100개 이상의 모델이 개발되었다. 대표적인 모델로는 OSU(Ohio State University)91A, EGM96, EIGEN-CG03C, EGM2008,

Table 1. Global gravitational models.

		EGM2008	GOCO02S	EIGEN-6C	GOCO03S	EIGEN-6C2
Agency		NGA	ESA	GFZ	ESA	GFZ
Year		2008	2011	2011	2012	2012
Data	Satellite	GRACE	GOCE, GRACE, CHAMP, SLR	GOCE, GRACE, LAGEOS(SLR)	GOCE, GRACE, CHAMP, SLR	GOCE, GRACE, LAGEOS(SLR)
	Terrestrial	DTM2006.0	—	DTU10	—	EGM2008
	Ocean	DNSC07 SIO/NOAA	—	DTU10	—	DTU10
Degree/Order		2159/2159	250/250	1420/1420	250/250	1949/1949
Resolution		10km	100km	15km	100km	10km

GOCO(Gravity Observation COmbination)02S, EIGEN-6C 등이 있으며, 2012년에는 GOCO02S, EIGEN-6C의 후속 모델로서 GOCO03S와 EIGEN-6C2가 개발되었다. 현재 가장 많이 사용되는 모델은 EGM2008로서 우리나라에서도 2000년대 초반까지는 EGM96, EIGEN-CG03C 등을 활용하였으며, 2000년대 후반부터는 EGM2008을 이용하고 있다. 그러나 최근 AGU(American Geophysical Union), EGU(European Geoscience Union) 등 측지 분야의 학회 연구 동향을 살펴보면, GOCE 관측 자료를 포함한 전지구중력장 모델에 대한 활용성 분석이 활발히 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 EGM2008과 2010년 이후 새롭게 개발된 GOCO02S, GOCO03S, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 모델을 비교하였다.

EGM2008은 2008년 미국의 NGA에서 개발한 전지구중력장 모델이다. EGM2008은 EGM96 모델의 후속모델로서 GRACE 위성 관측자료와 육상 중력자료, SIO(Scripps Institution of Oceanography)/NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), DNSC(Danish National Space Center)07의 위성고도계 자료 및 ArcGP(Arctic Gravity Project)의 자료를 이용하여 개발되었다. EGM2008은 최대 차수 및 위수가 2,159인 초고차항 전지구중력장 모델로서, 해상도는 10km로 이전 모델인 EGM96에 비해 6배나 향상되었다 (Pavlis *et al.*, 2008).

최근 개발된 GOCO02S, EIGEN-6C, GOCO03S, EIGEN-6C2 모델은 중력탐사를 목적으로 발사된 GOCE 위성의 관측 자료를 포함하고 있다는 점에 차별성이 있다.

먼저, GOCO02S와 그 후속 모델인 GOCO03S는 ESA에서 개발한 모델로 인공위성 관측 자료 즉, CHAMP, GRACE, GOCE 위성 관측자료와 SLR(Satellite Laser Ranging) 자료만을 이용하여 구현한 모델이다. GOCO02S는 2009년 11월부터 2010년 7월까지, GOCO03S는 GOCE 위성 발사 이후 2011년 4월까지 획득된 GOCE 위성 관측자료를 포함한다

(Goiginger *et al.*, 2011; Mayer-Gürr *et al.*, 2012). 육상 및 위성고도계 관측자료를 포함하지 않으므로 상기 모델의 해상도는 전적으로 위성 중력자료의 해상도에 의존한다. CHAMP는 약 650km, GRACE는 약 400km 해상도로 중력장을 결정할 수 있으며, GOCE 위성의 경우 100km 해상도를 갖기 때문에, 상기 위성 관측자료를 융합하여 구현된 최신 전지구중력장 모델의 해상도는 100km로 개발되었다.

EIGEN-6C와 EIGEN-6C2는 독일의 GFZ에서 개발된 모델로 GOCE, GRACE 위성 관측자료와 LAGEOS(Laser GEodynamics Satellites)의 SLR 자료, EGM2008 모델 개발 시 사용된 육상 중력자료, 위성고도계 자료를 포함하며, 최신 자료인 DTU(Danmarks Tekniske Universitet)10 위성고도계 자료까지 포함하여 구현되었다. EIGEN-6C는 2009년 11월부터 2010년 7월까지의 GOCE 위성 관측자료를 포함한다. EIGEN-6C2는 EIGEN-6C 모델 구축 이후 취득된 2011년 4월까지의 GOCE 관측 자료와 GRACE 및 LAGEOS 관측자료 및 육상 중력자료로서 EGM2008의 지오이드고를 일부 반영하여 업데이트한 모델이다. EIGEN-6C와 EIGEN-6C2 모델의 최대 차수와 위수는 각각 1,420과 1,949로서 공간해상도는 약 15km와 10km이다 (Förste *et al.*, 2011; Förste *et al.*, 2012).

Table 1은 앞서 언급한 5개의 전지구중력장 모델(EGM2008, GOCO02S, EIGEN-6C, GOCO03S, EIGEN-6C2)을 간략히 정리한 것이다.

2.3 전지구중력장 모델 별 정밀도

최신 전지구중력장 모델이 개발되어 발표되면, 활용성을 판단하기 위한 정밀도 분석을 수행한다. 독일의 GFZ에서 운영 중인 국제 전지구중력장모델 센터(ICGEM; International Centre for Global Earth Models)에서는 미국, 캐나다, 유럽, 호주, 일본 등의 GPS/Leveling 자료를 제공받아 지역적인 정밀도 분석을 수행하고 그 결과를 공개하고 있다.

Table 2. Precision of global gravitational models. (unit: m)

Country	GPS/ Leveling(pts.)	Global Gravitational Model (Nmax)				
		EGM2008 (2159)	GOCO02S (250)	EIGEN-6C (1420)	GOCO03S (250)	EIGEN-6C2 (1949)
USA	6,169	0.248	0.435	0.247	0.428	0.249
Canada	1,930	0.126	0.352	0.135	0.340	0.127
Europe	1,235	0.208	0.434	0.214	0.418	0.212
Australia	201	0.217	0.371	0.219	0.355	0.214
Japan	816	0.083	0.516	0.082	0.500	0.080

Fig 1. Strategies of the study.

Table 2는 앞서 선정한 다섯 가지 전지구중력장 모델의 최대차수 적용 시 정밀도를 나타낸 것이다. 위성 중력자료와 지역적인 중력자료를 포함하여 구현된 EGM2008, EIGEN 모델들의 경우 미국, 유럽 및 호주에서 20cm 내외의 정밀도를 나타내며, 캐나다와 일본의 정밀도는 각각 13cm와 8cm 수준이다 (ICGEM, 2013).

그러나 우리나라의 경우 전지구중력장 모델을 구현 및 평가하기 위해 필요한 중력 및 GPS/Leveling 자료가 제공되지 못하였기 때문에 객관적인 평가가 이루어지지 않았다. 특히, 전지구중력장 모델의 경우 전 세계의 중력신호의 흐름에 맞추어 개발된 모델인 만큼 지역적인 수직기준체계(Local Vertical Datum)와는 편이가 존재하므로 지역적인 지오이드 모델 개발을 위해서는 편이와 정밀도 전반에 대한 분석이 수행되어야 한다.

3. 전지구중력장 모델 신뢰도 분석

전지구중력장 모델의 신뢰도 분석은 Fig. 1에서 나타내는 바와 같이 1) 전지구중력장 모델 간의 비교와 2) GPS/Leveling 자료와의 비교를 통한 정밀도 분석으로 나누어 수행되었다.

3.1 전지구중력장 모델 간의 비교

전지구중력장 모델 간의 비교는 각 모델별로 기반이 되는 위성 및 지역적인 중력자료가 상이하므로 신규 자료를 포함하였을 때 나타나는 지역적인 변화를 확인하는데 목적이 있다. 이를 위하여 우리나라 전역을 포함하는 동경 123~132°, 북위 32~40°를 대상지역으로 선정하고, 5' 간격으로 격자를 산정하여 모델별로 차수별(60, 120, 180, 200, 250, 360, 1420, 1949,

2159) 지오이드고를 산출하여 차이를 계산하였다. 이 때, 기준이 되는 모델은 최대 차수가 가장 높은 EGM2008을 이용하였다. Fig. 2와 Table 3은 GOCO02S, EIGEN-6C, GOCO03S, EIGEN-6C2과 EGM2008의 차이를 나타낸 것이다.

Fig. 2. Difference in geoidal height from global gravitational models with respect to EGM2008 in Korea. (unit : m)

위성 중력자료를 기반으로 중력장을 계산하는 저주파 신호 대역(차수 180 이하)은 EGM2008과 신규 전지구중력장 모델인 GOCO 및 EIGEN 모델간의 차이가 일관되게 나타났다. 먼저, 차수 60에서는 다섯 가지 전지구중력장 모델이 기본적으로 CHAMP와 GRACE 위성 중력자료를 기반으로 중력장을 계산하기 때문에 모델별 차이가 나타나지 않았다. 그러나 차수가 120 이상이 되면 위성 중력자료 중 상대적으로 고해상도 자료인 GOCE 자료의 영향으로 EGM2008 모델과의 차이가 발생하는데, 차수 120일 때는 최대 차이가 12cm 내외, 표준편차는 약 4cm 수준이며 차수가 180일 때는 최대 차이는 30cm 내외, 표준편차는 7cm 내외로 발생한다.

차수가 180보다 커지면 중력장 모델링 시 사용한 자료의 차이에 의하여 모델 간의 차이가 극명하게 발생한다. 차수 250을 살펴보면, EGM2008 모델과 GOCO02S 모델의 지오이드고 차이는 최대 72cm, 표준편차 20cm이며, GOCO03S 모델과의 차이는 최대 55cm, 표준편차는 약 17cm 수준인 반면 EIGEN 모델들과 EGM2008의 차이는 차수 180일 때와 유사하다. 이는 EGM2008과 EIGEN-6C, EIGEN-6C2는 위성 관측자료와 육상 및 위성고도계 중력자료를 함께

Table 3. Difference in geoidal height from global gravitational models with respect to EGM2008 in Korea. (unit : m)

d/o	60			120		
	range	mean	std.	range	mean	std.
GOCO02S	-0.010~0.010	0.0002	0.004	-0.080~0.120	0.0037	0.037
EIGEN-6C	-0.010~0.010	-0.0001	0.004	-0.090~0.120	0.0022	0.037
GOCO03S	-0.010~0.010	0.0002	0.004	-0.080~0.120	0.0037	0.037
EIGEN-6C2	-0.010~0.010	-0.0001	0.004	-0.090~0.130	0.0029	0.038
d/o	180			200		
	range	mean	std.	range	mean	std.
GOCO02S	-0.250~0.320	0.0003	0.076	-0.260~0.360	0.0032	0.091
EIGEN-6C	-0.230~0.320	-0.0010	0.068	-0.220~0.340	0.0002	0.072
GOCO03S	-0.230~0.320	-0.0005	0.072	-0.230~0.350	0.0018	0.078
EIGEN-6C2	-0.240~0.340	-0.0005	0.074	-0.260~0.350	0.0003	0.077
d/o	250			360		
	range	mean	std.	range	mean	std.
GOCO02S	-0.530~0.720	0.0032	0.200	—	—	—
EIGEN-6C	-0.260~0.360	0.0002	0.075	-0.270~0.370	0.0004	0.075
GOCO03S	-0.450~0.550	0.0029	0.170	—	—	—
EIGEN-6C2	-0.320~0.290	0.0007	0.080	-0.350~0.310	0.0009	0.082
d/o	1420			1949		
	range	mean	std.	range	mean	std.
EIGEN-6C	-0.270~0.370	0.0004	0.076	—	—	—
EIGEN-6C2	-0.350~0.310	0.0009	0.082	-0.350~0.320	0.0009	0.082

Fig. 3. Difference in geoidal height from global gravitational models with respect to EGM2008. (degree/order = 1420) (unit : m)

사용한 반면 GOCO02S, GOCO03S는 위성 관측자료만을 사용하여 발생한 결과로 사료된다. 다시 말해서, GOCO 모델들은 위성 관측자료 중 가장 고해상도인 GOCE 위성 관측자료에 기반하여 중력장을 계산하지만 EGM2008 및 EIGEN 모델들은 지역적으로 가용한 고해상도의 중력 및 위성고도계 자료를 함께 사용하므로 지역적인 중력신호를 반영한 모델이 계산되기 때문이다. 또한, GOCO03S 모델과 EGM2008과의 차이가 GOCO02S 모델에 비해 작은 것을 확인할 수 있는데 이는 누적된 GOCE 위성 관측자료를 통해 상대적으로 고해상도의 중력신호를 모델링 할 수 있었기 때문으로 판단된다.

반면 차수 250 이상이 되면 육상, 위성고도계 자료가 포함된 효과에 의하여 EGM2008 모델과 EIGEN 모델 간의 차이가 발생하나 최대 30cm 내외이며, 표준편차는 7~8cm 수준으로 차수 180 이후부터는 일관성 있는 차이를 나타낸다.

차수 250 이상일 때 모델 간의 차이를 보다 면밀히 분석하기 위하여, EIGEN-6C와 EIGEN-6C2 모델에 대해 차수 1,420에서 EGM2008과의 차이를 계산하였다. Fig. 3은 이를 나타낸 것으로, EGM2008 모델과 EIGEN-6C, EIGEN-6C2 모델의 차이는 동경 123~132°, 북위 32~40°에서 평균 0.001m 이하로 미미하다. 그러나 경기도 북부(A)와 전라북도 부근(B)에서는 모델 간 차이가 발생한다.

먼저 경기도 북부의 경우, EIGEN-6C 모델은 휴전선 인근 지역에 한정하여 약 10cm 수준의 차이를 나타낸다. 반면, EIGEN-6C2 모델의 차이값은 약 10cm 수준으로 유사하나 그 범위가 경기도 북부와 강원도 북부 지역에 걸쳐 더 넓게 나타난다. 전라북도 주변의 경우 EIGEN-6C와 EIGEN-6C2 모델

에서 평균 3cm 수준의 차이를 나타내지만, 모델 간 차이의 표준편차는 각각 5cm와 3cm로 EIGEN-6C 모델의 지역적인 변화가 더 크게 나타난다. 또한, EIGEN-6C2 모델은 전라북도 전반에 걸쳐 차이가 발생하지만 EIGEN-6C 모델은 전라북도 덕유산, 가야산 주변에서 경상북도 쪽으로 최대 12cm의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 앞서 언급한 바와 같이 EIGEN 모델 구축 시 포함된 GOCE 위성 관측 자료의 영향인 것으로 판단된다. 이 때, EGM2008과 EIGEN-6C2 모델의 차이가 더 작게 나타나는 것은 EIGEN-6C2 모델이 2010년 7월 이후 관측된 GOCE 자료를 추가적으로 포함하고 있으며, 내륙에서의 중력자료로 EGM2008 모델 구축 시 사용된 자료를 이용하였기 때문이다.

3.2 전지구중력장 모델별 정밀도 검증

일반적으로 GPS 측량을 수행하면 타원체면에 수직인 높이 즉, 타원체고를 얻을 수 있고 수준측량과 중력측량 또는 중력측량에 상응하는 보정을 통해서 지오이드에 수직인 표고를 얻을 수 있다. 연직선 편차가 작다는 가정 하에 지역적으로는 타원체고와 표고를 빼서 이를 Eq. (3)과 같이 지오이드고로 근사할 수 있다.

$$N_{GPS} \approx h - H \quad (3)$$

여기서, N_{GPS} : GPS/Leveling 자료로부터 추정된 기하학적인 지오이드고

h : 타원체고

H : 표고

Table 4. Precision of global gravitational models with respect to GPS/Leveling data in Korea. (unit : m)

		EGM2008 (Nmax = 2159)	EIGEN-6C (Nmax = 1420)	EIGEN-6C2 (Nmax = 1949)
W	Range	-0.384 ~ 0.078	-0.402 ~ 0.094	-0.370 ~ 0.072
	Mean	-0.164	-0.170	-0.168
	STD	0.061	0.068	0.066
M	Range	-0.313 ~ 0.038	-0.402 ~ 0.086	-0.350 ~ 0.005
	Mean	-0.153	-0.187	-0.164
	STD	0.062	0.082	0.065
P	Range	-0.258 ~ 0.056	-0.264 ~ 0.026	-0.241 ~ 0.017
	Mean	-0.158	-0.142	-0.127
	STD	0.039	0.051	0.042

※ W : Whole, M : Mountainous area, P : Plain area

만약, 지역적인 GPS/Leveling 자료가 있다면 이로부터 계산되는 기하학적인 지오이드고와 전지구중력장 모델로부터 계산되는 지오이드고를 비교함으로써 전지구중력장 모델의 지역적인 부합도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 위성 중력 자료와 지역적인 중력자료를 포함하여 계산된 것으로 알려져 있는 EGM2008, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 모델에 대해 최대 차수를 기준으로 GPS/Leveling 자료 위치에서의 지오이드고를 계산하고, 이를 기하학적인 지오이드고와 비교하였다. 이때, 비교 대상이 되는 우리나라의 GPS/Leveling 자료는 국토지리정보원의 통합기준점 측량사업(2008~2010년)에서 산출된 성과로 이상점을 제거한 총 1,032점의 자료를 이용하였다(NGII, 2012).

Table 4는 우리나라에서의 EGM2008, EIGEN-6C, EIGEN-6C2 정밀도를 나타낸 것이다. 내륙에서 GPS/Leveling 자

료와의 차이의 표준편차는 EGM2008에서 6.1cm로 가장 작게 나타났으며, EIGEN-6C와 EIGEN-6C2는 각각 6.8cm와 6.6cm로 후속모델인 EIGEN-6C2가 미소하게 향상된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 산악(강원도)과 평지(충청이남)로 나누어 정밀도를 산출하였을 때도 동일하게 나타나는데, EIGEN-6C2 모델에 비해 EGM2008 모델이 GPS/Leveling 자료와 더 부합되는 것으로 확인되었다. 그러나 각 모델과 GPS/Leveling 자료 간 차이의 평균값을 살펴보면 모델간의 차이가 분명하게 나타난다. EGM2008 모델은 평지와 산악에서 모두 15cm 수준으로 유사한 경향을 나타내는 반면, EIGEN-6C2 모델은 산악에서는 16cm, 평지에서는 13cm 수준으로 지역적인 편이가 발생한다. 편이가 발생하는 지역은 앞서 약 3cm 수준의 모델 간 편이가 나타났던 지리산 부근으로, 앞서 모델 간 비교에서도 언급한 바와 같이 GPS/Leveling 자료와 비교하였

을 때도 GOCE 위성 관측자료에 의한 영향이 약 3cm 수준의 평균 차이를 유발하는 것으로 판단된다.

요약하면, 현재까지 발표된 전지구중력장 모델 중 우리나라 GPS/Leveling 자료와 가장 잘 부합하는 모델은 EGM2008이다. 그러나 EIGEN-6C2 모델의 경우 2012년까지 획득된 GOCE 자료를 기반으로 구현된 중간단계의 전지구중력장 모델로 이전 모델에 비해 정밀도가 꾸준히 향상되고 있는 만큼 향후 새롭게 발표되는 전지구중력장 모델에 대한 분석도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 최근 GOCE 위성 관측자료를 포함한 신규 전지구중력장 모델이 다수 개발 및 발표됨에 따라 우리나라에서 가장 적합한 모델을 선정하기 위한 정밀도 분석을 수행하였으며, 그 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫 째, 2008년 개발 및 발표된 EGM2008 모델 이후 GOCE 위성 관측자료를 포함한 신규 모델로 GOCO02S, EIGEN-6C, GOCO03S, EIGEN-6C2 모델은 위성 관측자료만을 이용하거나 또는 그 외 육상 및 위성고도계 자료를 함께 이용하여 고주파 대역을 이용하여 모델링하는 지에 따라 차이를 나타낸다. 차수 250일 때 위성 관측자료만을 이용하는 GOCO 모델과 EGM2008 모델의 차이는 최대 70cm, 표준편차 20cm 내외로 크게 나타나지만 육상, 위성고도계 자료 등 부가적인 자료를 함께 모델링한 EIGEN 모델의 경우 약 8cm 수준으로 일관된 차이를 나타낸다.

둘 째, 각 모델의 정밀도를 검증하기 위해 통합기준점 GPS/Leveling 자료와 비교한 결과 EGM2008 모델의 정밀도가 6.1cm로 가장 높게 나타났고, EIGEN-6C2 모델의 정밀도는 6.6cm로 산출되었다. 지역적인 정밀도 역시 EGM2008이 산악에서 6.2cm, 평지에서는 3.9cm로 EIGEN-6C2 모델에 비해 3mm 정도 더 높게 나타났다.

현재까지 개발된 모델 중 우리나라 GPS/Leveling 자료와 가장 잘 부합되는 모델은 EGM2008이지만 EIGEN 모델의 정밀도 및 해상도가 꾸준히 향상되고 있는 바 신규 전지구중력장 모델 개발 동향을 주시하여야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Förste, C., Bruinsma, S. L., Flechtner, F., Marty, J., Lemoine, J. M., Dahle, C., Abrikosov, O., Neumayer, H., Biancale, R., Barthelmes, F., and Balmino, G. (2012), A new release of EIGEN-6C, *2012 AGU Fall Meeting*, AGU, 03-07 December, San Francisco, US.
- Förste, C., Bruinsma, S. L., Shako, R., Marty, J., Flechtner, F., Abrikosov, O., Dahle, C., Lemoine, J. M., Neumayer, H., Biancale, R., Barthelmes, F., König, R., and Balmino, G. (2011), EIGEN-6 : A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse, *EGU General Assembly 2011*, EGU, 3-8 April, Vienna, Austria.
- Goiginger, H., Rieser, D., Mayer-Gürr T., Pail, R., Fecher, T., Gruber, T., Albertella A., Maier, A., Höck, E., Krauss, S., Hausleitner, W., Baur, O., Jäggi, A., Meyer, U., Brockmann, J., Schuh, W., Krasbutter, I., and Kusche, J. (2011), The satellite-only global gravity field model GOCO02S, *EGU General Assembly 2011*, EGU, 3-8 April, Vienna, Austria.
- Heiskanen, W. A. and Moritz, H. (1967), *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Co, San Francisco, 403p.
- Huang, H., Yun, H., Lee, D., and Jeong, T. (2009). Accuracy analysis of ultra-high degree earth gravitational model EGM2008 in South Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 1D, pp. 161-166. (in Korean with English abstract)
- ICGEM (2013), Evaluation of models: root mean square about mean of GPS/Leveling minus gravity field model derived geoid heights, *ICGEM*, Potsdam, <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/> (last date accessed: 30 May 2013).
- Jekeli, C. (1999), An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models, *Journal of Geodesy*, Vol. 73, No. 1, pp. 10-22.
- Lee, S. (2000), A study on the geoid modeling by gravimetric methods and methods of satellite geodesy, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 18, No. 4, pp 359-367. (in Korean with English abstract)

- Lee, S., Kim, J. S., and Kim, C. Y. (2008a), Evaluation of EGM2008 earth geopotential model using GPS/Leveling data, *Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Information system*, Vol. 16, No. 3, pp 117-126. (in Korean with English abstract)
- Lee, D., Lee, S., Kwon, J. H., and Yun, H. (2008b), Development of hybrid geoid using the various gravimetric reduction methods in Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 5D, pp. 741-747. (in Korean with English abstract)
- Mayer-Gürr, T., Rieser, D., Höck, E., Brockmann, J. M., Schuh, W., Krasbutter, I., Kusche, J., Maier, A., Krauss, S., Hausleitner, W., Baur, O., Jäggi, A., Meyer, U., Prange, L., Pail, R., Fecher, T., and Gruber, T. (2012), The new combined satellite only model GOCO03s, *International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2012*, IAG Commission 2, 9-12 October, 2012, Venice, Italy.
- NGII (2012), *Construction of Precision Geoid Model in Korea*, No. 11-1611265-000078-10, NGII, Suwon, Korea. (in Korean)
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K., (2008), An earth gravitational model to degree 2160 : EGM2008, *EGU General Assembly 2008*, EGU, 13-18 April, Vienna, Austria.

(Received 2013. 06. 12, Revised 2013. 06. 21, Accepted 2013. 06. 24)