

# GPS/Levelling데이터를 사용한 새로운 지구중력장모델의 정확도 분석 Accuracy Analysis of New Geopotential Model using GPS/Levelling Data

윤홍식<sup>1)</sup> · 조재명<sup>2)</sup>

Yun, Hong-Sic · Cho, Jae-Myoung

## Abstract

The purpose of this paper is to evaluate a new geopotential model, EIGEN-CG01C which had been developed from CHAMP and GRACE mission observations and surface gravity data. The accuracy analysis was conducted by comparing the geoidal heights computed from two types of geopotential models (i.e., EIGEN-CG01C and EGM96) with spirit leveled GPS bench mark. To this end, three hundred twenty GPS leveled bench marks are used as bases for the numerical investigation. From the analysis, it was possible to conclude that EIGEN-CG01C was more suitable to upgrade the KGEIOD 98 since the results that the EGM96 was slightly biased.

Keywords : Geopotential Model, EGM96, EIGEN-CG01C, GPS/Levelling

## 요 지

본 논문의 목적은 CHAMP, GRACE 데이터와 지표면 중력데이터를 이용하여 개발된 새로운 지오폠펠셀 모델인 EIGEN-CG01C을 평가하는데 있다. 정확도 분석은 EIGEN-CG01C와 EGM96의 두 가지 지오폠펠셀 모델로부터 계산된 각각의 지오이드고와 수준점에 대한 GPS 관측값으로부터 계산된 지오이드고를 비교하는 방식으로 수행하였으며, GPS 관측에 사용된 수준점은 총 320점이다. 본 연구결과, KGEIOD98과 같은 정밀 지오이드를 개선하기 위한 기준면으로서의 편의가 적은 EIGEN-CG01C 모델이 EGM96모델에 비하여 보다 더 적합한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 중력장모델, EGM96, EIGEN-CG01C, GPS/Levelling

## 1. 서 론

21세기에 접어들어 저궤도 위성기술의 발전과 가속도계와 같은 높은 정밀도의 우주 위성 관측장비의 개발에 힘입어 보다 정밀한 지구 중력장 및 영년변화의 관측이 가능하여 졌다. CHAMP(Challenging Minisatellite Payload), GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 및 GOCE(Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) 위성 등을 이용한 중력관측은 지구중력장과

Quasi-geoid의 장과장 영역에 대한 연구를 질적으로 크게 향상시켰을 뿐만 아니라 GRACE위성 자료에 의한 중력장의 시간변화량도 결정할 수 있게 되었다. 이와 같은 지오이드와 중력장에 대한 연구의 질적인 향상은 기존의 Quasi-geoid에 머물렀던 지오이드를 명확하게 정의하는 것이 가능하여졌다(Kandiah, 2004).

한편, CHAMP, GRACE 등의 중력위성 데이터를 이용하여 지속적으로 새로운 전지구 중력장 모델을 개발하여 발표하고 있는 독일 국립 지구과학 연구소의 GFZ

1) 연결저자 · 정희원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)  
2) 정희원 · 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료(E-mail:jmcho@geo.skku.ac.kr)

(GeoForschungsZentrum Potsdam)에서는 CHAMP, GRACE 위성 데이터를 결합한 새로운 지구중력장 모델인 EIGEN-CG01C를 2004년도에 발표하였다. EIGEN-CG01C 모델은 기존의 지구중력장 모델에 비하여 보다 향상된 정확도를 가지는 모델로써 전지구적인 지오이드 모델 개발과 우주 측위 시스템의 정확도 향상에 기여할 뿐 아니라 대기, 해양순환과 같은 지구의 동적 시스템 연구에도 많은 기여를 할 것이다. 본 연구에서는 한반도 및 그 주변 지역에서의 EIGEN-CG01C 모델과 기존의 전지구 중력장 모델인 EGM96 및 GPS/Levelling에 의한 지오이드 모델을 비교함으로써 그 정확도를 분석하였다.

## 2. EIGEN-CG01C 모델

기존의 CHAMP, GRACE, GGM 등의 전지구 지구 중력장 모델이 위성데이터만을 이용하여 지오폠펌셜을 결정하는 반면 가장 최근에 개발된 EIGEN-CG01C 모델은 CHAMP(860일)위성과 GRACE(109일)위성에 의해 관측된 중력데이터와 0.5°×0.5° 간격의 지표면 데이터(중력, 표고) 및 고도계 위성데이터의 구면조화분석을 통하여 계산된다. EIGEN-CG01C 모델의 최대차수는 360이고, 130,317개의 구면조화계수로 구성되어 있으며, 기존의 중력장 모델들과 동일하게 지오이드고와 Free-Air중력이상, 연직선편차 성분 및 중력포텐셜 이상을 계산할 수 있다.

EIGEN-CG01C 모델은 CHAMP/GRACE의 전지구 고해상도 중력장 모델과 비교하였을 때, 400km 파장의 지상해상도에 대하여 정확도가 지오이드고는 5cm, 중력이상은 0.5mgal 정도 향상되어 전체 모델의 정확도는 지오이드고 25cm, 중력이상 5mgal로 추정되었으며, 육상부분보다는 해상부분의 정확도가 더 높은 것으로 평가되었다. EIGEN-CG01C 모델은 지역적인 지오이드 모델링을 위한 기본 모델과 지구의 동역학적인 분석을 위한 기본 모델로써 적합하다(Reigber 등, 2004).

한편, C. Förste(2005) 등은 EIGEN-CG01C 모델의 정확도를 평가하기 위해서 모델로부터 산정된 지오이드고와 GPS/Levelling에 의하여 산정된 지오이드고를 미국, 캐나다, 유럽 등 지역별로 비교하였으며, M. Biker(2005)는 CHAMP, GRACE 지구중력장 모델로부터 계산된 지오이드고와 GPS/Levelling에 의하여 산정된 지오이드고를 비교함으로써 스웨덴 및 핀란드 지역에서의 중력장 모델의 정확도를 평가하였다.

본 논문에서는 새로운 중력장모델인 EIGEN-CG01C를 한반도의 국부적인 지역 범위 내에서 모델로부터 계산한 지오이드고와 GPS/Levelling에 의하여 결정된 기하학적인 지오이드고를 비교하여 정확도를 평가하였다. 즉, GPS로부터 구한 지오이드고( $N_{GPS}$ )와 중력장모델로부터 구한 지오이드고( $N_{MOD}$ )의 차이( $\Delta N$ )를 구하여 분석하였다(Yun, 1999, 2002).

$$\Delta N(i) = N_{GPS}(i) - N_{MOD}(i) \quad (1)$$

## 3. 중력장모델의 정확도 평가

다수의 중력장모델들이 최대차수가 360까지인 구면조화계수  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ 으로 구성되어 있다. 준거타원체 기준의 중력이상과 지오이드고는 각각 식 (2)와 식 (3)을 사용하여 완전하게 정규화된 구면조화계수들을 이용하여 계산된다(Torge, 1989, Featherstone, 2002)

$$\Delta g_{GM} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n-1) [\overline{C_{nm}} \cos m\lambda + \overline{S_{nm}} \sin m\lambda] \overline{P_{nm}}(\cos \nu) \quad (2)$$

$$N_{GM} = \frac{GM}{R\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n-1) [\overline{C_{nm}} \cos m\lambda + \overline{S_{nm}} \sin m\lambda] \overline{P_{nm}}(\cos \nu) \quad (3)$$

여기서  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ 은 차수가  $n$ ,  $m$ 인 완전하게 정규화된 구면조화계수이고,  $\overline{P_{nm}}$ 은 차수가  $n$ ,  $m$ 인 완전하게 정규화된 르장드르 계수,  $n_{max}$ 는 중력장모델의 최대차수이며,  $\phi$ ,  $\lambda$ 는 위도와 경도,  $\nu$ 는  $90 - \phi$ ,  $GM$ 은 대기를 포함한 지구의 지심인력 상수,  $R$ 은 지구중심으로부터의 반경이고  $\gamma$ 는 준거타원체면상의 정규 중력이다.

본 논문에서는 EGM96과 EIGEN-CG01C모델로부터 구한 지오이드고간의 차이와 기하학적인 지오이드고와의 차이로부터 중력장 모델의 정확도를 분석하였다. 동일점에 대한 두 모델의 지오이드고를 비교하기 위해서 위도 123°~132°, 경도 32°~45°지역에 대한 GRS80타원체 기준의 지오이드고를 위, 경도 5' 간격으로 격자화 하기 위한 보간을 실시하였으며, 각 모델의 분포는 그림 1과 2에 표시한 바와 같다.

그림 3은 EIGEN-CG01C 모델과 EGM96 모델로부터 각각 산출된 지오이드고의 차이를 나타낸 것으로 두 중력장모델 사이에 많은 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히 서해안 부근과 북쪽지역에서 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 이것은 EGM96모델 개발에 사용된 데이터를 분석

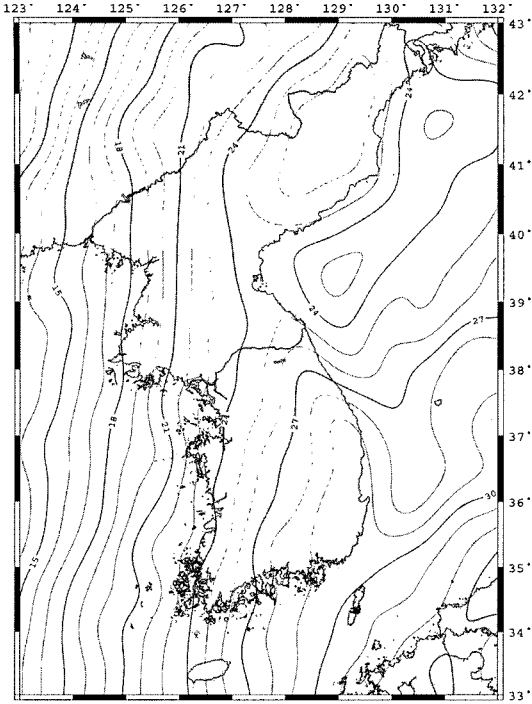


그림 1. EIGEN-CG01C 모델로부터 구한 지오이드(최대차수 360, 등고선 간격 1m)

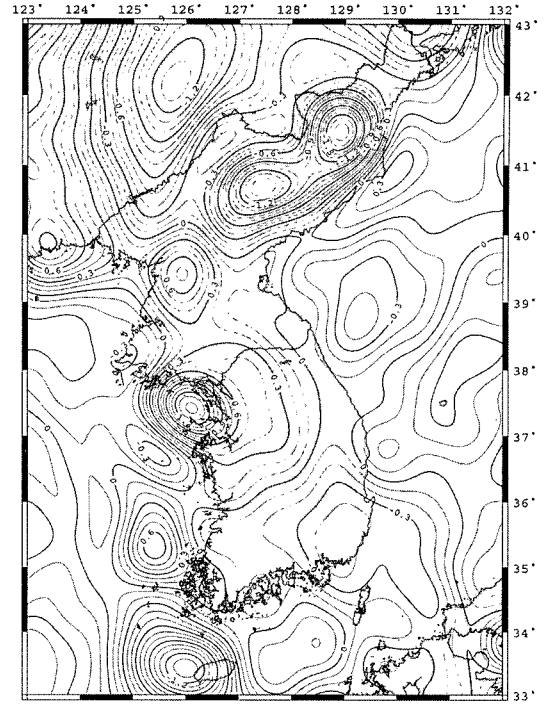


그림 3. EIGEN-CG01C 모델과 EGM96 모델로부터 구한 지오이드 차이(등고선 간격 : 0.1m)

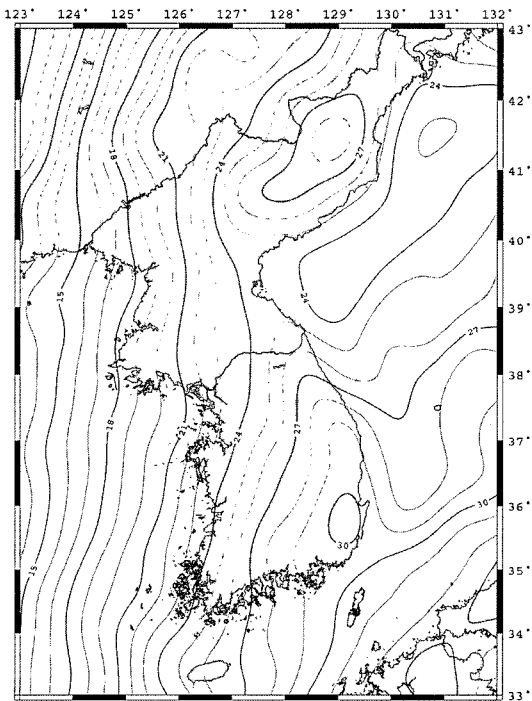


그림 2. EGM96 모델로부터 구한 지오이드(최대차수 360, 등고선 간격 1m)

한 결과, 서해지역과 북쪽지역의 중력데이터가 충분하지 못하기 때문에 발생한 것으로써, 다른 한편으로 새로운 EIGEN-CG01C 모델이 EGM96 모델에 비하여 한반도내에서 더욱 향상된 중력 데이터를 제공함을 의미한다.

한편, GPS 관측을 통하여 두 점 P, Q에 대한 타원체고의 차이( $\Delta h_{PQ} = h(P) - h(Q)$ )를 결정하는 것이 가능하다. 실제 측량에서 사용하는 높이의 기준은 정표고이므로 이러한 GPS 관측을 통하여 산정된 타원체고는 정표고로 변환하여야 한다. 만약 이러한 점들 중 하나의 점에 대한 정표고( $H(Q)$ )를 알고 있고, 두 점의 지오이드고 차이( $\Delta N_{PQ} = N(P) - N(Q)$ )를 알고 있거나 모델로부터 지오이드고를 계산할 수 있다면 P점의 정표고는 다음과 같이 구할 수 있다(Georgia 등, 2003).

$$H(P) = H(Q) + \Delta h_{PQ} - \Delta N_{PQ} \quad (4)$$

타원체고를 정표고로 변환할 수 있다면 GPS 관측에 의한 정표고와 수준측량에 의한 정표고를 비교할 수 있으며, 이때 정확도는 cm 수준이고 정확한 고해상도의 전 지구적인 중력장모델과 지역적인 중력데이터와 지형데이터를 조

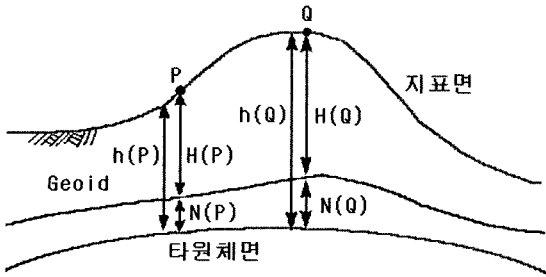


그림 4. GPS/Levelling에 의한 표고측정

합한다면 정밀한 높이 차이를 산정할 수 있으며, 또한 기하학적인 지오이드고를 산정할 수 있다. 본 논문은 이러한 기하학적인 지오이드고와 모델을 이용한 지오이드고의 차이를 평가하기 위하여 GPS관측치와 EIGEN-CG01C 모델을 이용한 수준점들의 높이차( $\Delta H_{GPS}$ )와 수준측량에 의한 수준점들의 높이차( $\Delta H_{KHD}$ )를 비교하였다.

그림 5와 6은 320개 수준점에서 GPS관측을 실시하여 구한 지오이드고와 EGM96모델 및 EIGEN-CG01C모델로부터 구한 지오이드고와의 차이를 구하여 그 분포를 표시한 것이다. 수준점에 대한 GPS관측은 국토지리정보원에서 수준 노선별로 시행하고 있는 GPS 관측 수준점 중 관측이 완료된 320개의 수준점을 이용하였다. 전국적인 수준점에 대한 GPS 관측이 완료가 되지 않았기 때문에 본 연구에 사용된 수준점의 분포가 전국적으로 고르게 분포되어 있지 않고, 지역적으로 편중되어 있음을 그림 5, 6으로부터 알 수 있다.

표 1은 기하학적인 지오이드고와 EIGEN-CG01C 및 EGM96 중력장 모델로부터 구한 지오이드고간의 차이에 대하여 분석한 결과이며, 그림 7은 기하학적 지오이드고와 지오폠펜셜 모델로부터 산정된 지오이드고 차이의 분포를 표시한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 중력장 모델에 따른 지오이드고 차이의 통계값을 비교하였을 때 크기만을 고려한 절대값의 경우에는 평균과 표준편차에 있어서 중력장 모델에 따른 차이가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 두 모델사이의 지오이드고를 직접 비교한 결과에서는 절대값의 차이가 23cm 발생하고 있으며, 지오이드고 차이의 크기와 방향성을 모두 고려한 통계 결과에서는 EGM96 중력장 모델에 평균 15cm 정도의 편차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

이는 동일한 차수의 중력장 모델이라고 하더라도 사용된 데이터와 지역에 따라서 지오이드고 분포가 다르게 나타나고

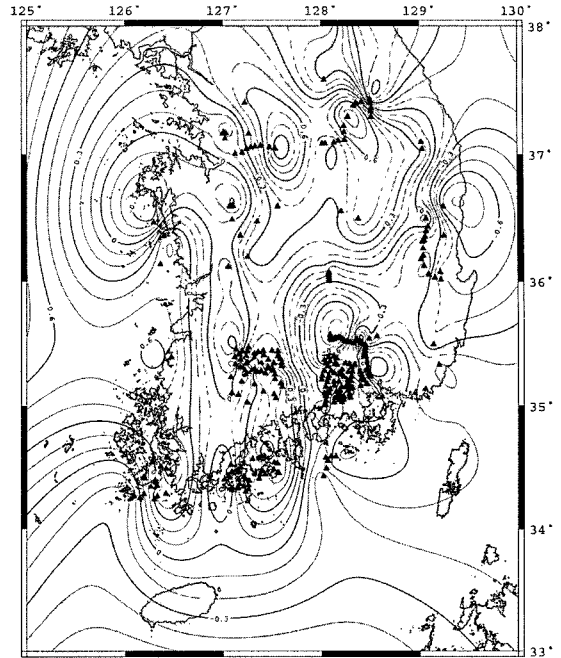


그림 5. 기하학적인 지오이드고와 EIGEN-CG01C 모델을 이용한 지오이드고의 차이 및 320개 수준점의 분포(등고선 간격 : 0.1m)

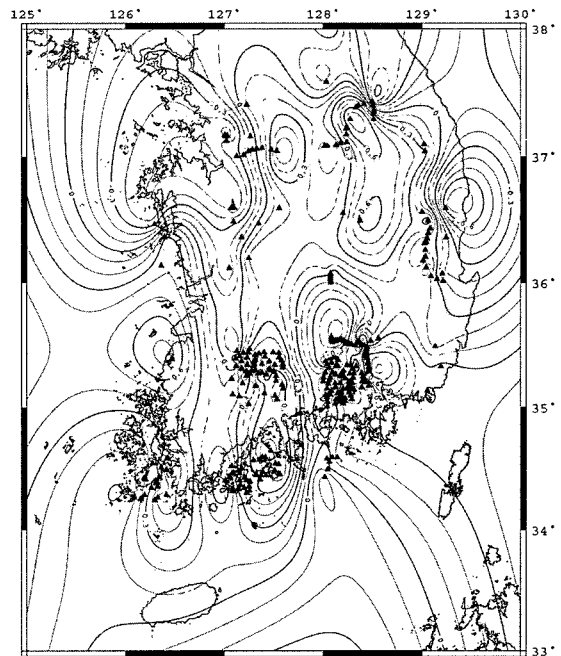


그림 6. 기하학적인 지오이드고와 EGM96 모델을 이용한 지오이드고의 차이 및 320개 수준점의 분포(등고선 간격 : 0.1m)

표 1. 기하학적 지오이드고와 중력장모델로부터 구한 지오이드고의 차이에 대한 통계값(괄호안은 절대값에 대한 통계값, 단위 : m)

	GPS/Level - EIGEN-CG01C	GPS/Level - EGM96	EIGEN-CG01C - EGM96
평균	0.00 (0.31)	0.15 (0.31)	0.15 (0.23)
표준편차	±0.37 (0.21)	±0.34 (0.21)	±0.21 (0.12)
최대값	0.96 (0.96)	0.83 (0.83)	0.45 (0.58)
최소값	-0.84 (0.00)	-0.67 (0.00)	-0.58 (0.01)

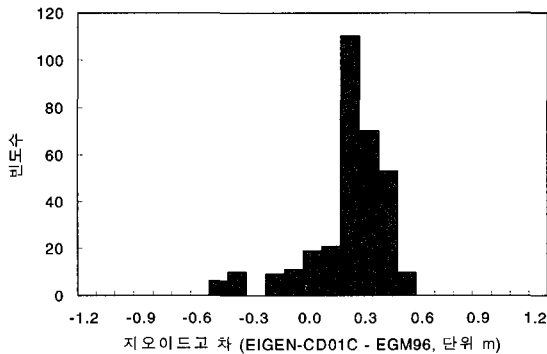
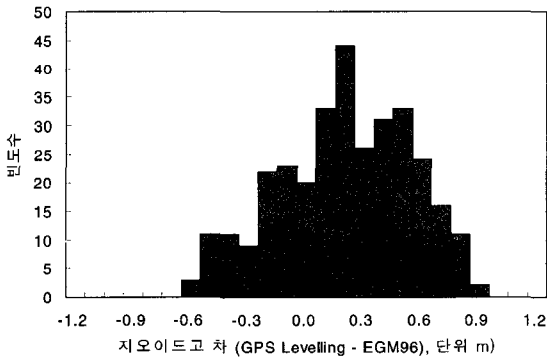
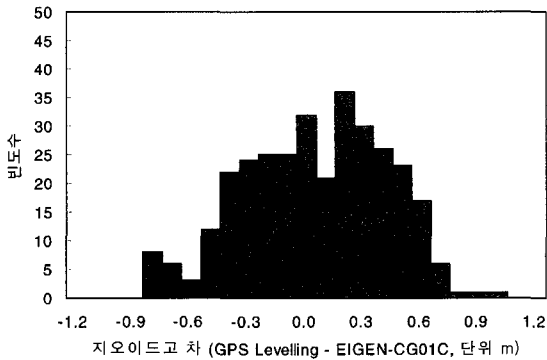


그림 7. 기하학적 지오이드고와 지오폠편셜 모델로부터 산정된 지오이드고 차이의 분포

있음을 나타내는 것으로써 그림 7의 세 번째 그림에서 보는 바와 같이 동일 지점에 있어서의 중력 모델별 지오이드고의 차이가 20cm 이상인 점이 전체의 80% 이상임을 알 수 있다.

## 4. 결 론

새로운 중력장모델인 EIGEN-CG01C의 정확도의 분석을 위해서 GPS/Levelling 데이터와 EGM96 모델로부터 지오이드고를 계산하여 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. EGM96 및 EIGEN-CG01C 모델로부터 산출된 지오이드고를 기하학적인 지오이드고와 각각 비교한 결과, 한반도 지역에서는 두 모델의 정밀도가 약 ±3cm 정도의 차이 뿐이 보이고 있지 않지만 EGM96 모델이 약 15cm의 편의를 가지고 있는 것으로 분석되어 향후 KGEIOD98과 같은 정밀지오이드를 갱신하기 위한 기준면으로 EIGEN-CG 모델이 적합할 것이다.

2. EGM96과 EIGEN-CG01C 모델간의 지오이드 비교에서는 서해안 부근과 북쪽의 백두산 지역에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 EGM96 모델 개발에 사용된 데이터를 분석한 결과, 서해지역과 북쪽지역에서의 중력 데이터 부족에 의한 것으로 분석되었으며, 이는 EIGEN-CG01C 모델이 EGM96 모델에 비하여 한반도 내에서 더욱 향상된 중력 데이터를 제공함을 나타내고 있다.

3. 본 연구에서는 지역적으로 편중된 수준점에 대한 GPS 관측값을 이용하여 기하학적 지오이드고를 산출하였으나, 전국적인 수준점에 대한 GPS 관측값과 EIGEN-CG01C 모델 이후에 발표된(2005년 5월 발표) EIGEN-CG03C 모델을 이용할 경우, 보다 정확한 분석결과를 산출할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 이석배 (2000), 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구, 한국측량학회지, 제18권, 제4호, pp. 359-368.
- 최재화, 윤홍식, 이석배 (1996), FFT에 의한 한반도 일원에서의 중력 지오이드 결정, 한국측량학회지, 제14권, 제1호, pp. 49-58.
- 최재화 (1998), GPS/Levelling을 이용한 지오이드 평가에 관한

연구, 국토지리정보원.

C. Förste, F. Flechtner, R. Schmidt, U. Meyer, R. Stubenvoll, F. Barthelmes, R. König, K. H. Neumayer, M. Rothacher, Ch. Reigber, R. Biancale, S. Bruinsma, J. M. Lemoine, and J. C. Raimondo (2005), A New High Resolution Global Gravity Field Model Derived From Combination of GRACE and CHAMP Mission and Altimetry/Gravimetry Surface Gravity Data, EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria.

Georgia Fotopoulos, Christopher Kotsakis, and Michael G. Sideirs (2003), How Accurately Can We Determine Orthometric Height Differences from GPS and Geoid Data, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp. 1-10.

Hong-Sic Yun (1999), Precision geoid determination by spherical FFT in and around the Korean peninsula, *Earth Planets Space* 51, pp. 13-18.

Hong-Sic Yun (2002), Evaluation of Ultra-high and High Degree Geopotential Models for Improving the KGEIOD98, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 2, No. 1, pp. 7-15.

Kandiah Jeyapalan (2004), Local Geoid Determination Using Global Positioning Systems, *Surveying and Land Information*

*Science*, Vol. 64, No. 1, pp. 65-75.

M. Biker(2005), Evaluation of the new global gravity field models from CHAMP and GRACE with GPS-levelling data in Fennoscandia, XXII Geofysiikan Päivät, Geophysical Society of Finland, pp. 21-26.

Reigber Ch, P. Schwintzer, R. Stubenvoll, R. Schmidt, F. Flechtner, U. Meyer, R. König, H. Neumayer, Ch. Förste, F. Barthelmes, S.Y. Zhu, G. Balmino, R. Biancale, J. M. Lemoine, H. Meixner, and J.C. Raimondo (2004), A High Resolution Global Gravity Field Model Combining CHAMP and GRACE Satellite Mission and Surface Gravity Data: EIGEN-CG01C, Joint CHAMP/GRACE Science Meeting, GFZ.

W. E. Featherstone (2002), Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia, *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-19.

Wolfgang Torge (1989), *Gravimetry*, Walter de Gruyter, pp. 42-45.

---

(접수일 2005. 5. 1, 심사일 2005. 5. 26, 심사완료일 2005. 12. 26)