

# EGM96과 OSU91A 지오폠펠설 모델에 의한 한반도 일원에서의 지오이드 비교분석 Geoidal Heights Analyses in and around Korean Peninsula using EGM96 and OSU91A Geopotential Model

이석배\* · 최재화\*\*

Lee, Suk-Bae · Choi, Jae-Hwa

## 요 旨

지오폠펠설모델은 지오이드 모델링에 있어서 기준면을 결정하기 위하여 사용되어 왔으며, 최근까지는 OSU91A 모델이 전세계적으로 가장 널리 사용되어 왔다. 그러나 GSFC/DMA 프로젝트에 의하여 1996년 후반기에 EGM96이라고 불리는 GSFC/DMA 지오폠펠설모델이 발표되었다. 본 연구에서는 한반도 일원에 대하여 두 모델에 대한 구면조화 분석을 최대차수 360으로 실시하여 그 결과를 비교하였다. 또 한반도 일원에 대한 중력자료를 3 × 3격자간격으로 합성하여 두 모델에 의하여 계산된 중력지오이드를 비교하였다. 연구결과 EGM96에 의한 지오이드값이 OSU91A에 의한 지오이드값보다 평균적으로 0.40 m 크고, 중력자료를 합성하였을 때에는 평균 0.35 m 큰 것으로 나타났다.

## ABSTRACT

Geopotential models were used to determine the reference surface in geoid modelling and until now, OSU91A model has been most widely used in the world. But what so called EGM96, GSFC/DMA geopotential model published in the latter half of the 1996 by GSFC/DMA project. In this paper, we intended to compare the results of spherical harmonic analyses using the both geopotential model and the spherical harmonic analyses performed up to degree and order 360 and the gravimetric geoidal heights considering gravity data on each 3 × 3 grid point in and around Korean peninsula. The results showed that the average geoidal height of study area computed from EGM96 is larger 0.40 m than that computed from OSU91A and the gravimetric geoidal heights using EGM96 is larger 0.35 m than that using OSU91A model

## 1. 서 論

지구중력포텐셜을 규명하려는 첫 시도는 지상중력데이터를 이용하여 8°까지 구면조화확장을 계산한 Zhongolovich I.D.에 의하여 1956년에 이루어졌으며<sup>1)</sup>, 그 이후로 위성의 섭동(攝動)과 위성 데이터의 분석 및 지상 중력자료의 축적과 정확도의 개선에 힘입어 포텐셜의 결정에 있어서 상당한 발전이 이루어져 왔다. 중력장에 대한 위성자료의 해석은 구면조화분석에 있어서 최대차수가 1960년대 초기의 4°에서부터 1980년대 후반 50°에 이르기까지 장파장이 되어 왔으며, 보다 고해상도의 결

과를 얻기 위하여 위성자료에 의해 유도된 포텐셜 계수를 지상중력자료와 결합시키는 방법이 개발되어 왔다. 또 지구중력포텐셜을 보다 정확하게 확장하기 위한 여러 가지 기술들이 데이터의 결합에 적용되어 왔다.

OSU81, GEM10C, GPM2와 같은 최대차수 180° 또는 그 이상의 지오폠펠설모델이 1970년대 후반에서 1980년대초에 이르기까지 개발되었으며, Rapp과 Cruz에 의해 0.5° 평균중력이상값을 사용하여 최대차수 360°까지 확장한 OSU86E/F 모델이 발표되었다. Weber와 Zomorodian는 어떤 특정한 일부 지역에 대하여 중력자료를 해석할 수 있는 고차 모델 ( $N_{max} = 360°$ )을 개발하였는데, 이 고차 포텐셜 계수모델은 많은 분야에 활용되었다. 예를 들어 어떤 특정지역의 지상중력자료

\* 전주공업전문대학 토목과 조교수

\*\* 성균관대학교 토목공학과 교수

에 의한 지오이드를 포함하는 기준면(reference surface)을 측지계산을 통하여 결정할 수도 있고, 지구중력장의 스펙트럼 연구에도 사용될 수 있다.<sup>2)</sup>

NASA의 Marsh J.G. 등에 의하여 위성추적데이터로부터 만든 GEM-T1과 GEM-T2 중력장모델이 1988년과 1989년에 각각 발표되었다.<sup>3,4)</sup> GEM-T2 모델은 degree and order 36에서부터 degree 50 and order 43까지 616개의 조화계수로 이루어져 있다. 또 1989년에 Ohio 주립대학의 Rapp과 Pavlis에 의해 OSU89A/B 모델이 개발되었는데 이 두 모델은 GEM-T2 모델을 기초로 하여 Geos3/Seasat 위성고도자료와 지상의 중력측정자료를 결합하여 degree and order 360으로 하여 공간분해능을 약 50 km로 개선시켰으며 OSU89B 모델의 전체 지오이드 오차는 약  $\pm 63$  cm로 평가되고 있다.<sup>5,6)</sup> 또 1991년 Rapp에 의해 발표된 OSU91A 모델은 GEM-T2 중력모델을 기초로하여 육상 및 선상측정 중력자료와 위성고도계자료 및 지구물리학적 해석에 의한 중력자료 등을 조합하여 구한 지구 전체의  $30^\circ \times 30'$  지역의 평균중력이상에 대한 정규중력포텐셜계수로 이루어진 지구중력장 모델로 기존의 OSU 모델에 비해 해면고도 관측자료의 처리에 정밀성을 기했다.<sup>9)</sup> 또 Texas at Austin 대학의 Tapley와 Shum 등에 의해 JGM-3 모델에 GFZ-1, ERS-1, GPS-Met, TOPEX/POSEIDON 등의 위성데이터를 처리하여 만든 TEG-3 지오포텐셜모델의 발표와 개선이 꾸준히 이루어지고 있다.<sup>10,11)</sup>

EGM96(Earth Geopotential Model 1996)은 미국 Defense Mapping Agency(DMA)와 NASA 산하의 Goddard Space Flight Center(GSFC)에서 수많은 연구진이 동원되어 Ohio 주립대학과 U.S. Naval Surface Warfare Centre의 도움하에 GSFC/DMA 프로젝트에 의하여 만들어 1996년 동경 IAG 심포지움에서 발표한 최대 차수 360의 개선된 GSFC/DMA 지오포텐셜 계수모델이다. 각각 65,338개의 sine 및 cosine 계수로 이루어져 있으며, 전 세계의 지오이드를 절대정확도  $\pm 0.5$  m에서  $\pm 1.0$  m의 범위안에서 결정하는 것을 목표로 하고 있다. 이 새로운 모델은 유럽, 구소련, 중국, 남아메리카, 아프리카, 그린랜드 지역의 새로운 중력 측정값들을 포함하여 DMA에서 계산한  $30^\circ \times 30'$  지상중력이상값을 사용하였으며, Geosat 위성의 Geodetic Mission에 의한 해면고도자료로부터 계산된  $30^\circ \times 30'$  중력이상값과, ERS-1, Topex, Seasat 위성의 해면고도자료뿐만 아

니라 SLR, DORIS, TDRSS, Tranet과 GPS위성자료가 포함되었다. 또한 지형보정과 아이소스타시보정을 계산하기 위하여 DMA의 DTED  $5 \times 5$  DEM 파일이 사용되었으며 전 세계에 분포하고 있는 298개의 GPS/Leveling 데이터로 정확도를 평가하였다.<sup>10,13)</sup> 데이터의 양이나 정확도면에 있어서 상당한 진전을 이룬 것으로 보고되고 있는 EGM96 GSFC/DMA 지오포텐셜모델이 앞으로는 지오이드 모델링에서 기준면을 계산하는데 활발히 사용될 것으로 전망된다.

본 연구에서는 따라서 EGM96 지오포텐셜모델을 한반도 일원에 대하여 구면조화분석을 실시하고 그 결과를 OSU91A 모델의 해석결과와 비교해 봄으로써 EGM96 모델을 소개하고 그 효용성과 OSU91A 모델과의 차이를 평가하고자 하였다. 또한 한반도 일원에 대한 중력자료를 두 모델의 해석결과에 똑같이 합성하여 중력지오이드를 계산하고 그 결과를 비교분석코자 하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 역수거리(reciprocal distance)의 확장

그림 1에서 코사인 법칙을 적용하면 P점과 P'점 사이의 거리( $l$ )에 대한 역수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{l} &= (r^2 + r'^2 - 2r r' \cos \Psi)^{-\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{r} \left(1 + \frac{r'}{r}\right)^2 - 2 \frac{r'}{r} \cos \Psi)^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\Psi$ 는 P점과 P'점 사이의 중심각이다.

$\frac{1}{l}$ 이  $r > r'$  인 경우에 대하여 수렴하는 연속함수로

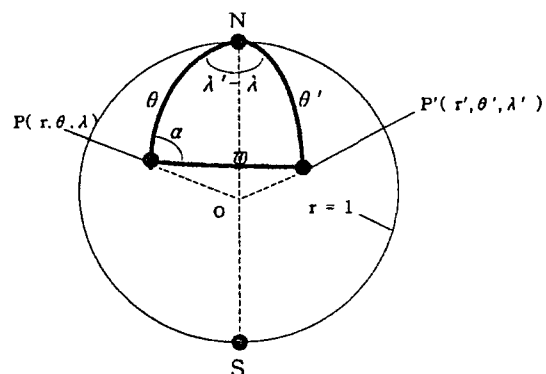


그림 1. Spherical coordinates and spherical distance

확장된다면 식 (1)은 다음과 같이 표현된다

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{r'}{r}\right)^l P_l(\cos \Psi) \quad (2)$$

여기서,  $P_l(\cos \Psi)$ 는  $\cos \Psi$ 의  $l$ 번째 degree의 Legendre다항식(zonal harmonic functions)을 의미한다. 여기서  $\cos \Psi$ 는 구면거리이므로  $P_l(\cos \Psi)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_l(\cos \Psi) &= P_l(\cos \theta)P_l(\cos \theta') + 2 \sum_{m=1}^l \frac{(1-m)}{(1+m)} \\ &\quad (P_{lm}(\cos \theta) \cos m\lambda P_{lm}(\cos \theta') \cos m\lambda' \\ &\quad + P_{lm}(\cos \theta) \sin m\lambda P_{lm}(\cos \theta') \sin m\lambda') \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $l = \text{degree}$ ,  $m = \text{order}$

## 2.2 중력포텐셜의 확장

역수거리  $\frac{1}{r}$ 에 대하여 구면조화함수로 확장한 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 다음과 같은 중력포텐셜을 나타내는 적분식을 얻을 수 있다

$$\begin{aligned} V &= \frac{G}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l k \frac{(1-m)!}{(1+m)!} \times \frac{1}{r^l} (P_{lm}(\cos \theta) \cos m\lambda \\ &\quad \int \int_{\text{earth}} r' P_{lm}(\cos \theta) \cos m\lambda' dm \\ &\quad + P_{lm}(\cos \theta) \sin m\lambda \\ &\quad \int \int_{\text{earth}} r' P_{lm}(\cos \theta') \sin m\lambda' dm), \\ k &= \begin{cases} 1 & \text{for } m = 0 \\ 2 & \text{for } m \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

$l=0$ 인 경우에 적분식은 지구의 질량  $M$ 이 질량중심에 집중되어 있는 경우의 포텐셜을 나타내므로 이 항을 빼고 또 지구 타원체의 장반경을 상수( $a$ )로 도입하고 질량적분을 조화계수  $C_{lm}$ ,  $S_{lm}$ 으로 표시하면 중력포텐셜은 구면조화함수로 확장되어 다음과 같이 표현된다.<sup>2)</sup>

$$\begin{aligned} V &= \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^l \right. \\ &\quad \left. (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta), \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_{l0} = C_l &= \frac{1}{M} \int \int_{\text{earth}} \int \left(\frac{r'}{a}\right)^l P_l(\cos \theta') dm, \\ \left. \begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} C_{lm} \\ S_{lm} \end{aligned} \right\} &= \frac{2}{M} \times \frac{(1-m)!}{(1+m)!} \int \int_{\text{earth}} \int \left(\frac{r'}{a}\right)^l \\ &\quad P_{lm}(\cos \theta) \begin{cases} \cos m\lambda' \\ \sin m\lambda' \end{cases} \quad (m \neq 0 \text{일 때}) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)에서 우변의 첫째항은 정규중력포텐셜을 나타내므로 포텐셜 이상  $T$ 를 구한후 Bruns의 식에 대입하면 식 (7)과 같은 지오이드고  $N_{GM}$ 을 얻을 수 있으며, 중력이상  $\Delta g_{GM}$ 도 식 (8)과 같은 구조화함수로 표현할 수 있다.<sup>6,8,16)</sup>

$$\begin{aligned} N_{GM} &= \frac{GM}{\gamma} \left( \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^l \right. \\ &\quad \left. (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta g_{GM} &= \frac{GM}{\gamma^2} \left( \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^l \right. \\ &\quad \left. (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\gamma$ 는 정규중력을 의미한다.

OSU91A 및 EGM96 모델의 개발에 적용된 지심인력 정수(GM)와 지구장반경( $a$ )값은 표 1과 같다.

이와 같은 구면조화분석에 의거하여 수치해석을 하므로써 지오폠펌셜모델에 대한 지오이드고와 중력이상을 계산할 수 있다.

## 2.3 중력지오이드의 계산

중력지오이드는 지오폠펌셜모델을 해석한 지오이드에 잔여지오이드를 합성하여 계산된다. 잔여지오이드는 잔여중력이상을 고속후리에변환(fast Fourier transform)하여 계산하며, 잔여중력이상은 지오폠펌셜모델을 해석한 중력이상과 중력자료에 의한 중력이상과의 차이로 계산한다. 또한 중력자료는 지상에서 측정된 중력측정자료를 프리에어보정을 실시하여 계산한 중력이상값과, 해상에서 얻어진 위성고도자료를 FFT의 역계산에 의하여 계산한 중력이상값을 합성하여 연구대상 지역 전체에 대한 중력이상값을 얻게 된다. 그러나 이

표 1. Parameter values of both geopotential model

Figure	GM (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	a(m)
OSU91A	3,986,004.360 × 10 <sup>8</sup>	6,378,137.0
EGM96	3,986,004.415 × 10 <sup>8</sup>	6,378,136.3

중력자료는 그 분포가 불균일하기 때문에 일정한 격자 간격으로 보간하여 수치해석을 실시하게 된다.

잔여중력 이상은 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta g_{res} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{GM} \quad (9)$$

여기서,  $\Delta g_{FA}$ 는 육상 및 해상의 중력자료에 의한 중력 이상값이고,  $\Delta g_{GM}$ 은 지오폠펀셜모델의 구면조화분석에 의한 중력 이상값이다.

식 (9)의 잔여중력 이상을 이용한 잔여지오이드는 다음과 같이 계산된다.

$$N_{\Delta g_{res}} = \frac{1}{2\pi\gamma} F^{-1} \left[ \frac{1}{u^2 + v^2} \Delta G(u, v) \right] \quad (10)$$

여기서,

$$\frac{1}{u^2 + v^2} = F \left[ \frac{1}{\sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2}} \right]$$

$$\Delta G(u, v) = F[\Delta g_{res}(x_p, y_p)]$$

$$= \iint \Delta g_{res}(x_p, y_p) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy$$

이 식은 직교좌표계에서 격자구조의 잔여중력 이상값  $\Delta g_{res}(x_p, y_p)$ 를 이용하여 임의점  $(x, y)$ 의 지오이드를 계산하는 고속후리에변환(FFT)식으로, 여기서  $\gamma$ 는 정규 중력을 의미한다.

잔여지오이드가 계산되면 이를 구면조화분석에 의한 지오이드에 더해 다음과 같이 중력지오이드  $N$ 을 계산한다.

$$N = N_{GM} + N_{\Delta g_{res}} \quad (11)$$

여기서,  $N_{GM}$ 은 지오폐텐셜모델의 구면조화분석에 의한 지오이드고이고  $N_{\Delta g_{res}}$ 는 잔여지오이드이다.

### 3. 수치해석 및 결과분석

#### 3.1 OSU91A 및 EGM96에 의한 한반도 일원의 지오이드

EGM96을 이용하여 위도 32°N에서 43°N까지, 경도 123°E에서 132°E까지의 한반도 일원의 지역에 대한 구면조화분석을 최대차수 360으로 실시하였으며, 위도 및 경도방향 각각 3간격으로 중력 이상과 지오이드고를 계산하였다. 또한 그 결과를 비교하기 위하여 OSU 91A 모델을 똑같은 지역에 대하여 똑같은 방법으로 구면조화분석을 실시하여 지오이드고와 중력 이상을 계산하였다. 구면조화분석에 의한 계산결과와 개요는 표 2와 같으며 계산의 결과 얻어진 중력 이상과 지오이드고는 새로운 지오폐텐셜모델인 EGM96에 한하여 각각 그림 2와 그림 3에서 등고선도로 나타내었다. 수치해석을 위한 구면조화분석 프로그램은 캐나다 Calgary Univ. Yecai Li의 GRAVT\_GM을 이용하였다.

표 2에서 보는 것과 같이 OSU91A모델에 의한 우리나라 일원의 중력 이상값은 최소 -95.02 mgal에서 최대 85.59 mgal의 값을 보이고 있으며 중력 이상의 전체 평균값은 17.72 mgal이었다. 또한 연구대상지역에서 지오이드의 분포는 최소 8.85 m에서 최대 33.02 m의 분포를 보이고 있는데 이를 남북한 지역에 국한시켜 볼 때는 용암포 부근의 약 15.5 m에서 부산앞바다 대한해협 의 약 30.0 m까지 북서방향에서 남동방향으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한 EGM96의 해석결과 우리나라 일원의 중력 이상값은 최소 -110.24 mgal에서 최대 107.97 mgal, 전체 평균값은 18.87 mgal의 분포를 보이고 있으며, 지오이드 고의 분포는 최소 8.18 m에서 최대 33.68 m의 분포를 보였다. 이를 다시 남북한 지역에 국한시켜 볼 때는 용암포 부근의 약 15.6 m에서 부산앞바다 대한해협의 약 30.1 m까지 북서방향에서 남동방향으로 증가하는 경향을 보이면서 태백산맥 지역에서 높게 나타났으며, 개마고원 지대를 중심으로 동심원의 분포를 보였다. 중력 이상과 지오이드에 대한 두 모델의 구면조화분석결과와 EGM96의 계산결과가 전반적으로 넓고 크게 나타나고 있으며, EGM96은 국내에 처음 소개되는 것이므로 중

표 2. Statistics of output computed from OSU91A and EGM96 by spherical harmonic analyses

Geopotential Model	FIGURE	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
OSU91A	Gravity Anomalies $\Delta g_{GM}$ (mgal)	-95.02	85.59	17.72	16.42
	Geoidal Heights $N_{GM}$ (m)	8.85	33.02	23.29	5.33
EGM96	Gravity Anomalies $\Delta g_{GM}$ (mgal)	-110.24	107.97	18.87	20.67
	Geoidal Heights $N_{GM}$ (m)	8.18	33.68	23.67	5.38

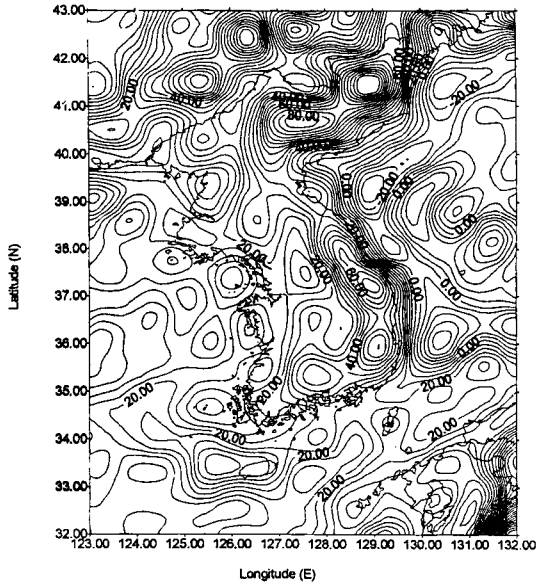


그림 2. Gravity anomalies computed from EGM96 (up to degree and order 360, referred to GRS80) [Contour Interval : 5 mgal]

력이상과 지오이드의 분포를 등고선도로 나타내면 각각 그림 2 및 그림 3과 같다.

### 3.2 중력지오이드의 계산

중력지오이드를 결정하기 위해 먼저 잔여중력이상과 잔여지오이드를 계산하였으며, 잔여중력이상은 중력자료에 의한 중력이상값과 지오폠펜셀모델에 의한 중력이상값의 차이로 계산하였다. 중력자료는 한반도 일원에서의 국립지리원 및 부산대학교의 중력측정자료와 Geosat/ERS-1/Topex- poseidon 위성의 위성고도자료를 합성하여 사용하였다. 중력자료에 의한 한반도 일원에서의 중력이상값의 분포는 표 3과 같다.

또한 3.1에서 계산한 표 1의 결과와 표 2의 결과를 가지고 식 (9)와 식 (10)에 의하여 계산한 잔여중력이상과 잔여지오이드를 정리하면 표 4와 같다.

표 4. Statistics of output computed from both geopotential model and gravity data

FIGURE	Used Model	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
Residual Gravity Anomalies ( $\Delta g_{res}$ : mgal)	OSU91A	-68.70	141.21	-1.45	14.99
	EGM96	-92.36	121.39	-2.67	16.75
Residual Geoidal Heights ( $N_{\Delta, res}$ : m)	OSU91A	-3.97	2.25	0.00	0.96
	EGM96	-5.11	1.88	0.00	1.12

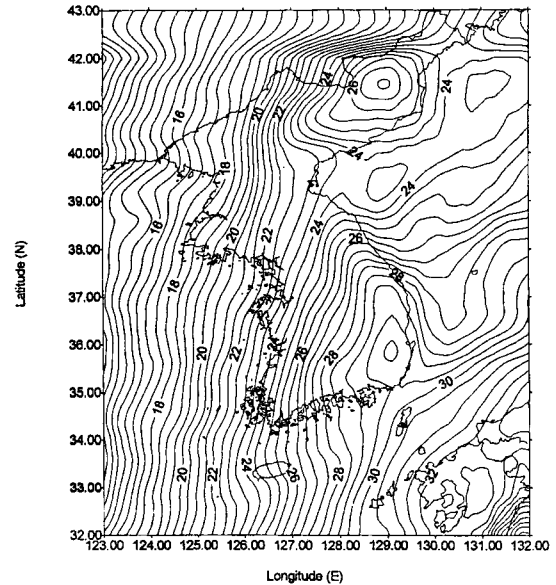


그림 3. Geoidal heights computed from EGM96 (up to degree and order 360, referred to GRS80) [Contour Interval : 0.5 m]

표 4에서 보는 바와 같이 잔여중력이상과 잔여지오이드의 계산결과는 EGM96을 이용한 경우가 OSU91A 모델을 이용한 경우보다 비교적 작게 나타나고 있다. 그러나 전체적인 평균값으로 비교해 볼 때에는 거의 미소한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. EGM96을 이용한 경우의 잔여중력이상과 잔여지오이드를 그림으로 나타내면 그림 4 및 그림 5와 같다.

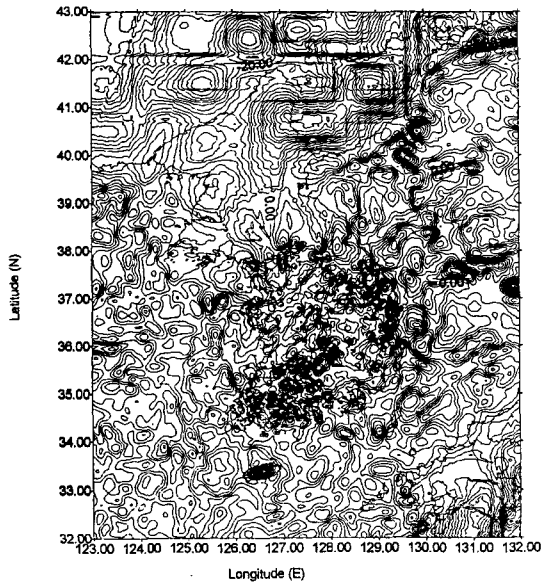
또한 식 (11)에 의하여 계산한 중력지오이드 결과를 정리하면 표 5와 같다.

표 3. Statistics of gravity anomalies computed from gravity data

FIGURE	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
Gravity Anomalies $\Delta g_{FA}$ (mgal)	-90.12	159.59	16.26	15.38

**표 5. Statistics of gravimetric geoidal heights computed from both geopotential model Plus gravity data (unit : m)**

Gravimetric geoidal heights	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
OSU91A+gravity data	8.98	33.51	23.29	5.09
EGM96+gravity data	8.26	34.25	23.64	5.22



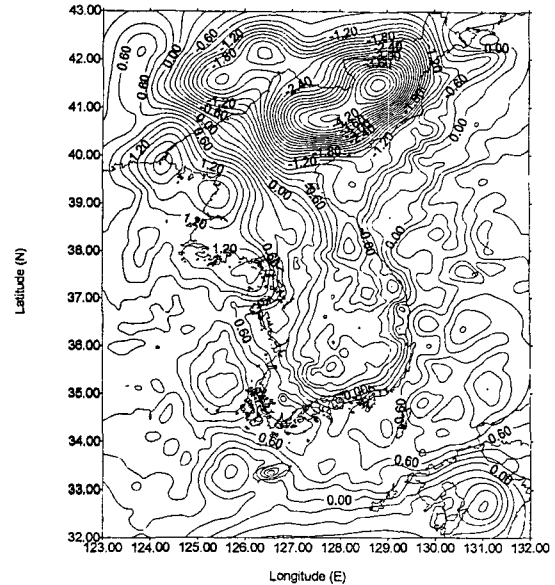
**그림 4. Residual gravity anomalies computed from gravity data and EGM96 [Contour Interval : 5 mgal]**

중력지오이드의 분포를 쉽게 파악하기 위하여 등고선도로 나타내면 그림 6 및 그림 7과 같다.

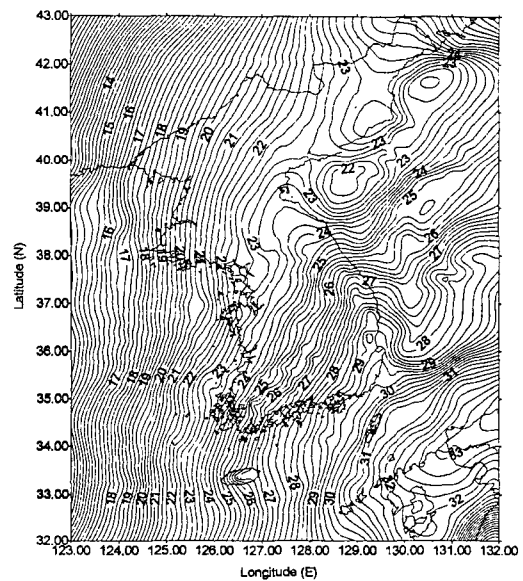
### 3.3 비교분석

EGM96과 OSU91A 모델의 차이를 분석하고자 수치 해석에 이용된 40,001점의 격자점에 대하여 두 모델에 의한 중력이상과 지오이드고의 차이를 각각 모두 계산하여 그 결과를 표 6에 정리하였다. 또한 구면조화분석에 의한 중력이상과 지오이드고의 차이를 한 눈에 알아보기 쉽게 하기 위하여 각각 그림 8 및 그림 9에 등고선도로 도시하였다.

표 6에서 볼 수 있는 것과 같이 구면조화분석 결과 두 모델의 차이는 중력상이 평균 1.62 mgal의 분포를 보였으며, 지오이드고는 평균 0.4 m를 나타내었다. 그런데 EGM96 개발시 중국지역의 중력측정자료의 추가로 인해 그림 9에서 보는 것과 같이 지오이드고 차이의



**그림 5. Residual geoidal heights by FFT [Contour Interval : 0.2 m]**



**그림 6. Gravimetric geoidal heights from OSU91A geoid plus residual geoid [Contour Interval : 0.25 m]**

대부분은 중국지역에서 그리고 수치보간의 영향으로 북한지역에까지 나타나고 있으며, 남한지역은 제주도 남서부를 제외하고는 지오이드고의 변화를 찾아보기 어렵다. 남북한 지역에서 두 모델에 의한 지오이드고의 차이는 제주도 일대에서 약 1.0 m내외의 차이와 북한

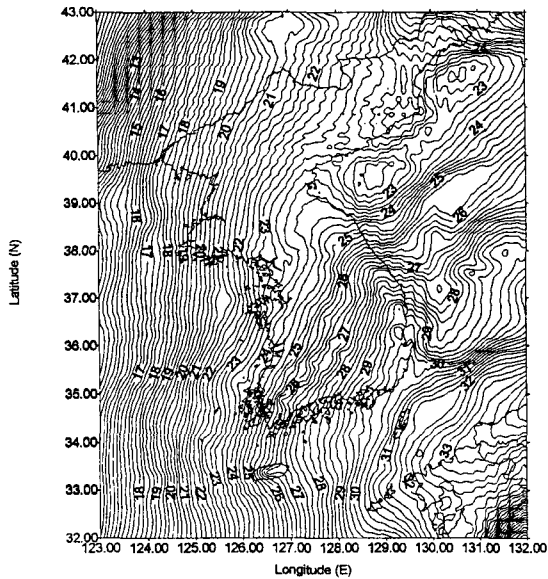


그림 7. Gravimetric geoidal heights from EGM96 geoid plus residual geoid [Contour Interval : 0.25 m]

표 6. Differences between EGM96 and OSU91A Model

FIGURE	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
Gravity Anomalies $\Delta g_{GM}$ (mgal)	-35.31	67.60	1.62	11.05
Geoidal Heights $N_{GM}$ (m)	-4.07	5.02	0.40	0.98

지역에서 약 0.2 m에서 2.6 m까지의 차이를 나타냈으며, 남한 내륙지방에서는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

이와는 별도로 EGM96을 평가하기 위해 전세계에 분포된 298점의 GPS/Leveling에 의한 기하학적 지오이드와 교차를 비교한 결과는 표 7과 같다. 표 7에서 보는 바와 같이 GPS/Leveling 지오이드와 각 모델과의 지오이드 교차는 OSU91A 모델이 평균 -23.6 cm, 표준편차 94.7 cm의 차이를 나타냈고, EGM96 모델이 평균 21.1 cm, 표준편차 51.7 cm의 차이를 보여 상당한 정확도의 개선이 있는 것으로 평가되었다.

또한 두 모델의 구면조화분석에 의한 지오이드에 중력자료에 의해 계산된 잔여지오이드를 더하여 결정된 중력지오이드의 차이를 분석하고자 40,001점의 격자점에서 교차를 구하여 그 결과를 표 8에 정리하였다.

표 8에서 보는 것과 같이 중력지오이드의 차이는 최

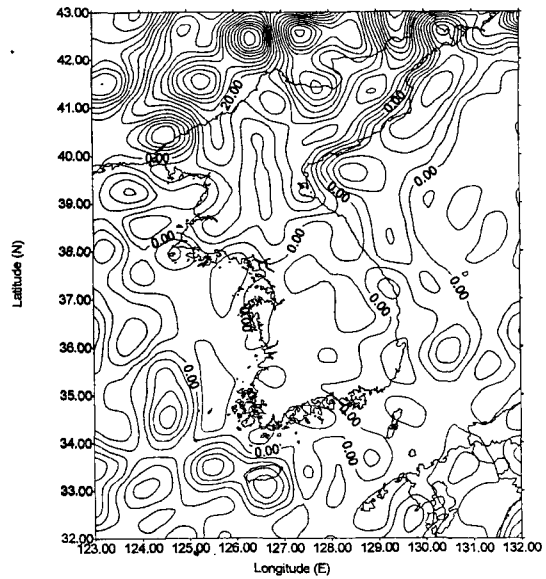


그림 8. Gravity anomaly differences between EGM96 and OSU91A [Contour Interval : 5 mgal]

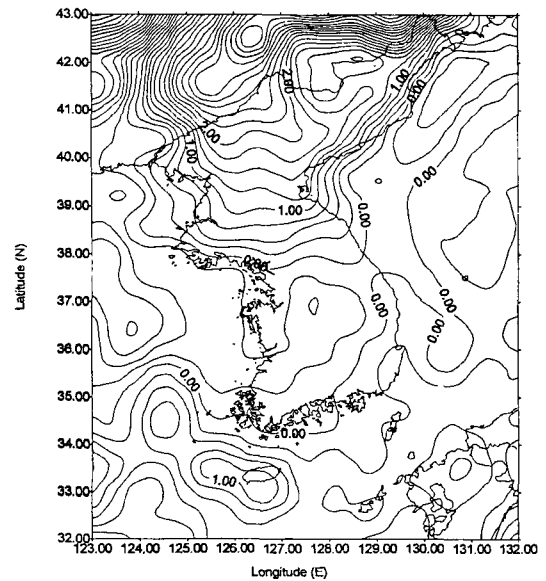


그림 9. Geoidal height differences between EGM96 and OSU91A [Contour Interval : 0.2 m]

표 7. Differences between GPS/Leveling geoid and both model

Geopotential model name	Mean differences	Standard Deviation
OSU91A	-23.6 cm	94.7 cm
EGM96	21.1 cm	51.7 cm

**표 8. Differences between both gravimetric geoidal heights (unit : m)**

FIGURE	MIN.	MAX.	MEAN	S. D.
Differences	-1.61	1.86	0.35	0.36

소 -1.61 m에서 최대 1.86 m의 차이를 나타내고 있으며 평균 0.35 m, 교차의 표준편차는 0.36 m를 나타냈다. 그림 6 및 그림 7을 통하여 한반도 일원에 대한 중력지오이드의 분포를 분석해보면 OSU91A 모델을 이용한 경우에는 용암포의 17.25 m에서 대한해협이 약 30.0 m의 분포를 보이고 있으나, EGM96을 이용한 경우에는 용암포의 17.30 m에서 대한해협이 약 30.50 m의 분포를 보여 후자의 경우가 더욱 큰 것으로 나타났다. 또한 EGM96을 이용한 중력지오이드의 경우 함경도 지역에서 smooth하지 못한 분포를 보이고 있는데 이는 격자간격 및 보간방법에 의한 영향인 것으로 사료되며 추후 북한지역의 중력자료의 확보와 함께 지속적인 연구가 필요한 부분이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GSFC/DMA의 새로운 지오포텐셜모델인 EGM96을 구면조화분석을 실시하여 한반도 일원에 대한 지오이드고와 중력이상을 계산하고 OSU91A 모델의 구면조화분석 결과와 비교하고 그 차이를 분석하였으며, 또 중력자료에 의한 중력이상값을 이용하여 잔여중력이상 및 잔여지오이드를 계산하고 이를 구면조화분석 결과에 합성하여 중력지오이드를 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. EGM96의 구면조화분석결과 지오이드고는 용암포 부근의 약 15.6 m에서 부산앞바다 대한해협이 약 30.1 m까지 북서방향에서 남동방향으로 증가하는 경향을 보이면서 태백산맥 지역에서 높게 나타났으며, 개마고원 지대를 중심으로 동심원의 분포를 보였다. 또 OSU 91A 모델의 구면조화분석결과 지오이드고의 변화는 용암포 부근의 약 15.5 m에서 부산앞바다 대한해협이 약 30.0 m까지 북서방향에서 남동방향으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

2. 두 모델에 의한 구면조화분석 결과의 차이는 연구 대상지역 전체에 대하여 중력상이 평균 1.62 mgal, 지오이드고는 평균 0.4 m의 차이를 나타내었다. 차이

의 대부분은 북한지역과 제주도 일대에서 나타나고 있으며 남한 내륙지방에서는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 지오이드고의 차이는 제주도 일대에서 약 1.0 m내외와 북한 지역에서 약 0.2 m에서 2.6 m까지의 차이를 나타냈다.

3. 전세계에 분포된 298점의 GPS/Leveling에 의한 기하학적 지오이드와 두 모델에 의한 지오이드고의 교차를 비교한 결과를 통해서, EGM96의 경우 교차의 표준편차가 OSU91A 모델의 경우의 표준편차보다 약 55 % 수준으로 줄어들어 상당한 정확도의 개선이 있는 것을 확인할 수 있었다.

4. 두 모델에 똑같은 중력데이터 세트를 합성하여 중력지오이드를 계산한 결과 EGM96을 이용한 경우가 한반도 동남부로 갈수록 지오이드고가 점점 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있었으며, 중국지역에서의 중력자료의 추가와 격자간격 및 보간방법의 영향으로 추정되는 북한지역에서의 지오이드고 파장의 변화가 심하게 나타났다. 이는 단파장효과를 보충해 줄 북한지역 중력자료의 확보와 함께 추후 지속적인 연구가 필요한 부분이다.

#### 참고문헌

1. Zhonglovich, I.D., Determination of the dimensions of the general terrestrial ellipsoid, Tr. Inst. Teor. Astronomy, 6, 5-66, 1956
2. W. Torge, Geodesy, Walter de Gruyter, 1980
3. Marsh J. G. et al., A new gravitational model for the Earth from satellite tracking data : GEM-T1. J. Geophys.Res., 93(1988),B6(6169-6215).
4. Marsh J.G. et al., The GEM-T2 gravitational model, NASA Technical Memorandum 100746, NASA/GSFC, 1989
5. Rapp R. H. and J. Y. Cruz, Spherical Harmonic Expansions of the Earth's Gravitational Potential to Degree 360 Using 30' Mean Anomalies. Report No. 376, Dept of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State Univ., Columbus Ohio, December 1986
6. Rapp R.H. and N.K. Pavlis, The Development and Analysis of Geopotential Coefficient Models to Spherical Harmonic Degree 360, J.Geophys.res.,95(1990),B13 (21885-21911)
7. Adam J., Global Geopotential Models in the Region of Hungary, Periodica Polytechnica, Civil Engineering,



- Technical University of Budapest, Vol.37, No.2, 1993, pp.69-90
8. 최광선, OSU 89B에 의한 한반도 일원의 지오이드에 관한 연구, 한국측지학회지, 제9권, 제2호, 1991, pp.67-72
  9. 최광선, 양철수, 박선미, 중력자료 해석에 의한 한반도 일원의 지오이드, 한국측지학회지, 제12권, 제1호, 1994, pp.131-139
  10. Yun H.S., Jozsef Adam, The Global Geopotential Models in the region of Korean Peninsula, 한국측지학회지, 제12권 제1호, 1994, pp.95-106
  11. Byron D. Tapley, C. K. Shum et al, The TEG-3 Earth Geopotential Model, International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30-October 5, 1996, pp.145
  12. Lemoine F.G., D.E. Smith, R. Smith, L. Kunz, E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, S.M. Klosko, D.S. Chinn, M.H. Torrence, R.G. Williamson, C.M. Cox, K.E. Rachlin, Y.M. Wang, S.C. Kenyon, R. Salman, R. Trimmer, R.H. Rapp, R.S. Nerem, The Development of the NASA GSFC and DMA Joint Geopotential Model, International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30-October 5, 1996, pp.146
  13. N.K. Pavlis, R.H. Rapp, F.G. Lemoine, S.C. Kenyon, High Resolution Global Geopotential Models for the Joint GSFC/DMA Project, International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30-October 5, 1996, pp.147
  14. S.C. Kenyon, N.K. Pavlis, The Development of a Global Gravity Anomaly Database used in the DMA/GSFC Geopotential Model, International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30-October 5, 1996, pp.148
  15. Sideris M.G., International Tests of the New GSFC/DMA Geopotential Models, International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30-October 5, 1996, pp.149
  16. 이석배, FFT에 의한 한반도 일원에서의 정밀지오이드 결정, 성균관대학교 대학원, 박사학위논문, 1996