

중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구

A Study on the Geoid Modeling by Gravimetric Methods and Methods of Satellite Geodesy

이 석 배*
Lee, Suk-Bae

요 旨

이 논문은 지구중력포텐셜에 대한 포텐셜계수모델이 표고이상을 계산하는데 사용될 수 있다는 것과, 지오이드 계산에 있어서 표고이상을 고려하였을 때 보다 정밀한 지오이드고를 산출할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 연구를 위해 EGM96의 계수와 수정계수가 사용되었고 한반도 일원의 수치지형모델인 KODEM33이 사용되었다. 연구 결과 나타난 표고이상의 크기는 최대 0.025 m, 평균 -0.015 m의 크기를 보여주었다. 본 연구에서 계산된 중력지오이드 모델의 평가를 위하여 GPS/Leveling데이터로부터 기하학적 지오이드를 산출하였으며, 비교 결과 교차의 평균값과 표준편차는 0.0114 m와 0.2817 m를 나타내 개선된 결과를 보여 주었다.

ABSTRACT

This paper suggests that coefficients models of the Earth's gravitational potential can be used to calculate height anomalies which are then reduced to the geoid undulation to determine more precise geoid undulation. The potential coefficients and modified coefficients of EGM96 and KODEM33 digital elevation model in and around the Korean peninsula were used for this study. The magnitude of height anomaly computed in this study reached 0.025 m and the mean value showed -0.015 m. In this study, geometrical geoid undulation was derived from GPS/Leveling data for evaluating the precisely computed geoid undulation. In comparison with geometric and gravimetric geoid undulations, mean value and standard deviation of the differences showed 0.0114 m and 0.2817 m respectively and it showed the improvement of results.

1. 서 론

지구중력장과 관련한 물리측지학에 있어서 다양한 문제의 해결에 대한 가장 일반적인 정보의 형태는 중력측정치이다. 지구의 물리적인 표면위에서 얻어진 측정치들을 통하여 물리측지학의 문제들을 해결하고자 할 때에는 일반적으로 지오이드와 같은 지구 중력장의 등포텐셜면에서 이루어지게 되며, 중력관측치로부터 지오이드고를 결정하는 측지학적 경계치의 문제는 잘 알려진 고전적인 Stokes 이론이나 좀 더 복잡한 현대적인 Molodensky 이론을 이용하여 그 해를 구할 수 있다.

지오폠펌셜 이론은 과거부터 지구물리학과 측지학 분야에서 매우 중요한 연구대상 분야가 되어왔으며, 3차원

측지학의 확립으로 인해 최근 측지학계의 관심이 증가하고 있다. 지구 내부에 중력이 어떻게 분포하고 있으며, 이것이 지구내부를 구성하고 있는 여러가지 성분들과 어떠한 관계를 이루어 작용하고 있는가 하는 문제와 지각 변동, 지진발생 등에 관한 문제는 주로 지구물리학 분야의 문제였고, 정확한 지구의 형상 및 크기의 결정, 그리고 이에 근거한 3차원 위치결정에 대한 기준면으로서의 지오이드 결정, 정밀 지도제작과 같은 문제는 측지학적인 문제로 다루어져 왔다.

최근에 포텐셜 계수로부터 지오이드고를 계산하는 문제는 포텐셜 계수모델의 정확도가 높아지고 최대차수가 확장되면서 중요한 문제로 부각되고 있다. 이와 관련하여 Rapp R.H.는 지오폠펌셜 계수로부터 지오이드고를 계산하는 방법을 연구하였고,¹⁾ 실제 이를 활용하여 여러 가지 지오이드모델을 개발하기도 하였다.²⁾ 또 1990년에

*전주공업대학 토목과 부교수

는 '구면조화분석을 통한 지오폠편설 계수모델의 개발과 평가'라는 논문을 통하여 OSU91A 모델을 발표하여,³⁾ 오늘날 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 EGM96 지오폠편설 모델의 모태가 되기도 하였다. 또한 그는 포텐셜 계수모델을 이용하여 지오이드고를 계산함에 있어서 표고이상(height anomaly)를 고려하여 지오이드 계산의 정확도를 향상시킨 연구결과를 발표함으로써⁴⁾ Sjöberg의 주장을⁵⁾ 뒷받침하기도 하였다. 본 연구에서는 EGM96 지오폠편설모델의 계수와 수정계수를 활용하여 구면조화분석을 실시하였으며⁶⁾ 표고이상을 고려하여 지오이드고를 계산하였다. 또한 계산된 지오이드고와 중력이상값을 활용하여 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의하여 정밀 지오이드고를 계산하였다. 최종적으로 계산된 결과는 일부지역에 국한하여 GPS/Leveling에 의해 계산된 기하학적 지오이드고와 비교하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 표고이상과 지오이드고

지구 표면상의 임의의 점 P(ϕ, λ, r)에 있어서 표고이상 ζ 는 그 점의 포텐셜이상 $T(\phi, \lambda, r)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.⁷⁾

$$\zeta(\phi, \lambda, r) = \frac{T(\phi, \lambda, r)}{\gamma_P} \quad (1)$$

여기서 r 는 지심거리이고, γ_P 는 P점에 있어서의 이론적인 중력값이다.

표고이상을 지오이드고로 환산하는 수식은 다음과 같은 Heiskanen and Moritz(1967)의 식으로 표시된다.

$$N(\phi, \lambda) = \zeta(\phi, \lambda, r) + \frac{\Delta g_B}{\gamma} H \quad (2)$$

여기서 Δg_B 는 P점에서의 부계이상(Bouger anomaly)이며 H는 P점에서의 정표고이다. 그리고 γ 는 점 P에 대응하는 타원체상의 점 P'와 P에 대응하는 Telluroid상의 점 P'' 사이의 정규중력의 평균값이다.

식 (2)로부터 계산되는 지오이드고는 기준타원체와 지오이드로 볼리우는 등중력포텐셜면과의 이격량이다. 또한, 식 (1)에서 표고이상 ζ 는 지심거리 r_P 에 의하여 달라지므로 r_P 가 타원체상에 있을때의 값 ζ_0 를 구분할 수 있다.

$$\zeta_P = \zeta_0(\phi, \lambda, r_E) + \frac{\partial \zeta}{\partial r} h \quad (3)$$

여기서, h는 P점의 타원체고이고 식 (2)는 다음과 같은 항으로 구분하여 표시된다.

$$N(\phi, \lambda) = \zeta_0(\phi, \lambda, r_E) + C_1(\phi, \lambda) + C_2(\phi, \lambda) \quad (4)$$

여기서,

$$C_1(\phi, \lambda) = \frac{\partial \zeta}{\partial r} H + \frac{\partial \zeta}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial h} H \quad (5)$$

$$C_2(\phi, \lambda) = \frac{\Delta g_B}{\gamma} H \quad (6)$$

이고, 타원체고 h는 H-h의 값이 30m일 때에 정표고 H가 10⁴의 차이를 나타내므로 식 (3)의 h는 식 (5)에 있어서는 H로 바꾸어 주어도 무방하며,⁴⁾ 식 (5)의 두 번째 항도 크기가 미소하므로 계산에서 제외하였다.

식 (4)를 이용하면 적자점에서의 C_1 과 C_2 값을 계산할 수 있으며, 이를 타원체 표면에서 계산된 ζ_0 에 더해서 지오이드고를 얻을 수 있게 된다.

2.2 구면조화계수 및 수정구면조화계수의 활용

식 (1)에 표현된 포텐셜이상 T는 구면조화계수를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T(\phi, \lambda, \gamma) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=2}^M \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\phi) \right] \quad (7)$$

여기서 C_{nm} , S_{nm} 은 완전하게 정규화된 포텐셜 계수들이다.

식 (6)에서 C_2 값을 구하기 위해 필요한 부계이상은 다음과 같은 식으로 표현되고, 식 (8)의 프리에어이상(free-air anomaly)은 구면조화 계수를 이용하여 식 (9)와 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta g_{BA}(\phi, \lambda) = g_{FA}(\phi, \lambda) - 0.1119H(\phi, \lambda) \quad (8)$$

$$\Delta g_{FA}(\phi, \lambda, r) = \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^M (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \times \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\phi) \quad (9)$$

또한, 식 (5)를 수행하기 위하여 식 (1)에 식 (7)을 대입하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial r} = \frac{GM}{Yr^2} \left[\sum_{n=2}^M (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\phi) \right] \quad (10)$$

이와 같이 C_1 과 C_2 값을 계산할 수 있는데, C_1 과 C_2 의 합 C 에 대한 광범위한 데이터 축적과 구면조화 전개를 통하여 구면조화 계수를 구축함으로써 임의의 점 $P(\phi, \lambda)$ 에 대한 C 값을 직접 구할 수 있게 된다. $C(\phi, \lambda)$ 의 구면조화 표현을 위한 계수값을 c_{nm} , s_{nm} 이라 하면 이들 계수값을 다음과 같은 과정에 의하여 포텐셜 계수값으로 환산할 수 있다. 식 (1)과 식 (7)에서 $GM/(r\Gamma) = R$, a 를 지구의 평균반경이라 하면 포텐셜 계수값과의 차이를 식 (11)로 구할 수 있다.⁴⁾

$$\begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} = \frac{1}{R} \left(\frac{R}{a}\right)^n \begin{Bmatrix} c_{nm} \\ s_{nm} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

또한, 지오이드고 계산을 위한 수정 포텐셜 계수값을 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} C'_{nm} \\ S'_{nm} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{nm} \\ S_{nm} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

3. 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링

3.1 EGM96 수정계수 모델의 해석

장파장효과를 해석하기 위하여 EGM96 지오폠펌셜 모델을 사용하였으며, 수정계수 모델을 사용하여 표고이상을 계산하였다. 최대차수(degree and order) 360으로 위도 32° N에서 43° N까지, 경도 123° E에서 132° E까지의 한반도 일원에 대한 구면조화분석을 실시하여 위도 및 경도방향으로 각각 3' 간격으로 포텐셜이상을 계산하고, 이를 바탕으로 지오이드고, 중력이상, 연직선 편차 성분 (ξ , η)을 계산하였다.

포텐셜이상을 구하기 위하여 사용된 측지인자는 Table 1과 같으며, 각 점의 위치가 지심좌표계상에서 계산되어야 하기 때문에 WGS84를 기준타원체로 채택하였다.

또한, 수정계수를 활용하여 계산된 표고이상값을 지오이드고에 적용하였으며, 이 결과에 -0.53 m를 더해 WGS84 타원체상의 지오이드고를 획득하였다. 수정항

Table 1. WGS84 constants used to define geometry

constant	value	remarks
a(m)	6378137.0	semi-major axis
f	1/298.2572235630	flatterening
GM(m ³ /s ²)	0.3986004418×10 ¹⁵	Earth's gravitational constant
w(rad/s)	7292115×10 ⁻¹¹	Earth's angular velocity

-0.53 m는 현재까지 알려진 지구의 가장 이상적인 타원체 제원인 $a=6378136.46$ m와 $1/f = 298.25765$ 을 적용한 것과의 보정항이다.⁴⁾

3.2 중력자료와 위성고도자료에 의한 지오이드의 계산

국립지리원의 중력측정자료, 부산대학교의 중력측정자료를 합성하여 육상지역의 프리에어이상을 구하였으며, 여러 가지 위성고도자료와 동경대학교 해양연구소(ORI)의 해상측정자료(shipborne gravity data)를 이용하여 해상지역의 중력이상을 구하였고, 이들 육상 및 해상자료를 합성하여 우리나라의 중력이상값을 계산하였다. 해상지역에 대하여는 북한 주변도 데이터가 포함되어있으나 육상지역에 있어서는 북한의 중력측정자료가 여전히 포함되지 못하였다. 위성고도자료는 BGI에서 개발된 Geosat, ERS-1, Topex-poseidon위성의 데이터베이스를 이용하였으며 FFT의 역계산에 의하여 중력이상을 계산하였다. 또한 Remove and restore 기법에 의하여 잔여 중력이상과 잔여 지오이드를 계산하였다.

3.3 지형보정 효과의 해석

지형보정량 계산에 있어서 지형은 격자상에서 수치화되는데 각 셀의 표고는 평균표고와 평균밀도를 가지는 프리즘에 의하여 표현되며 이를 Mass prism 지형모델이라고 한다. Mass prism 지형모델을 사용할 때에는 프리즘내의 질량이 균질하다고 가정하여 임의점에서의 지형보정량과 이에 의한 지오이드 효과를 계산하게 된다.

지형보정량 계산을 위하여 US Geological Survey의

Table 2. Statistical characteristics of the KODEM33 digital elevation model(Unit:m)

Points	Mean	Min. value	Max. value	sd	rms
40001	180.33	-0.04	2429.63	321.07	368.25

GTOPO30을 바탕으로 한반도 전체에 대하여 구축된 수치지형모델인 KODEM33모델을 활용하였다.⁸⁾ 현재까지 중력지오이드 계산에 있어서 부분적으로 지형보정효과를 계산한 적은 있으나 한반도 전체에 대하여 지형보정량과 지오이드 효과를 균질하게 계산한 것은 본 연구에서 처음이다. 참고로 KODEM33 수치지형모델의 개요는 Table 2와 같다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 EGM96 해석 결과

EGM96 지오폠펜셜모델의 초기계수와 수정계수를 활용하여 구면조화분석을 실시한 결과는 Table 3과 같다. 표에서 보는 바와 같이 지오이드고의 분포는 최소 7.647 m에서부터 최대 33.008 m의 분포를 보였으며 중력

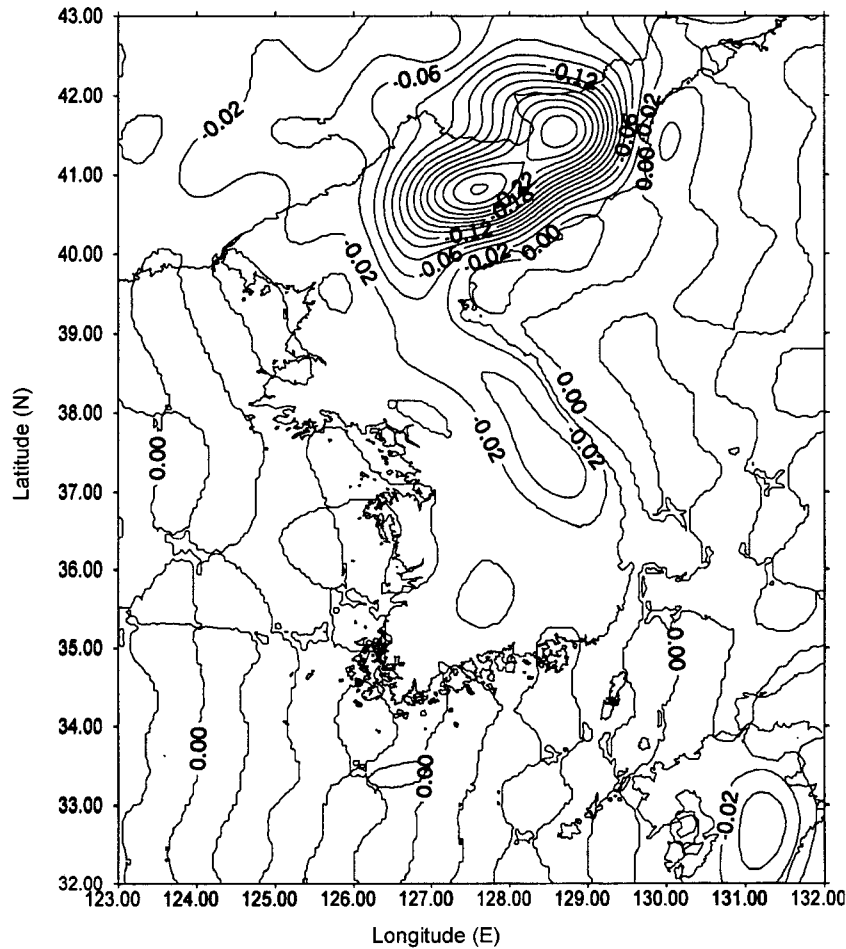


Fig. 1. Contour map of height anomaly (Countour interval=0.02 m)

Table 3. Statistical characteristics of the spherical harmonic analysis of EGM96 geopotential model with original and modified coefficients

	Geoidalundulation (m)	Gravity anomaly (mGal)	Disturbing potential (mGal)	Heightanomaly (m)	ξ (")	η (")
Min. value	7.643	-110.683	-102.596	-0.283	-11.631	-14.286
Max. value	33.008	108.496	117.292	0.025	9.047	17.504
Mean	23.094	18.933	26.206	-0.015	0.982	-4.017
std	5.368	20.641	21.149	0.041	2.692	4.250

이상은 최소 -110.683 mGal에서 최대 108.496 mGal의 분포를 보였다. 연직선편차의 자오선 성분 ξ 는 최소 -11.631"에서부터 최대 9.047"의 분포를 보이고 있으며, 묘유선 성분 η 는 최소 -14.286"에서 최대 17.504"의 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

EGM96의 수정계수를 이용하여 계산한 표고이상값은 최소 -28.3 cm에서 최대 2.4 cm의 분포를 보였으며, 평균값은 -1.58 cm로 나타났다. EGM96 수정계수를 고려하여 구면조화 분석을 실시한 결과는 수정계수를 사용하지 않은 결과와 비교할 때 지오이드의 평균값에서 0.576 m, OSU91A 모델에 의한 결과와는 평균 0.2 m의 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다.⁹⁾ 본 연구에서 계산한 표고이상을 등고선도로 나타내보면 Fig. 1과 같다.

4.2 지형보정량 계산결과

한반도 일원의 연구지역에 대하여 WGS84 타원체상에서 수치지형모델을 구축하고, Mass prism 모델에 의하여 지형보정량을 계산한 결과는 Table 4와 같다. 또한 이에 의한 지오이드 효과를 FFT 방법에 의하여 계산한 결과도 함께 정리하였다.

Table 4에서 볼 수 있는 것과 같이 지형보정량의 분포는 0.006 mGal~47.875 mGal, 이에 의한 지오이드 효과는 -25.7 cm~88.2 cm의 분포를 보였으나 지오이드 효과의 평균값은 0.0 cm로 나타났다.

4.3 잔여중력이상 및 잔여지오이드 계산결과

육상중력자료와 위성고도자료에 의하여 구축된 한반도 일원의 중력이상(프리에어이상)값은 Table 5와 같다. 또한 이 중력이상값을 EGM96 지오폠펠설모델을 해석한 중력이상값에서 제하고 다시 이 값에서 지형보정량을 제하여 계산한 잔여중력이상값은 Table 5에 표시하였다. 정밀지오이드를 계산하기 위하여 이와 같이 계산된 잔여중력 이상을 적분하여 잔여지오이드고를 계산하였다.

Table 4. Statistical characteristics of terrain correction and geoidal effect

	Terrain corrections(mGal)	Geoidal effects by terrain correction (m)
Min. value	0.006	-0.257
Max. value	47.875	0.882
Mean	1.215	0.000
std	2.530	0.216

Table 5. Statistical characteristics of free-air anomaly of gravity data, residual gravity anomaly, residual geoidal heights

	Free-air anomaly of gravity data (mGal)	Residual gravity anomaly (mGal)	Residual geoidal heights (m)
Min. value	-90.124	-110.781	-5.703
Max. value	159.590	95.682	1.899
Mean	16.263	-3.885	1.724×10^{-6}
std	15.383	18.047	1.298

Table 5에서 보는 바와 같이 잔여중력 이상의 경우 최소 -100.781 mGal~최대 95.682 mGal의 분포를 보이고 있으며, 잔여지오이드고는 최소 -5.703 m~최대 1.899 m의 분포를 보이고 있다.

4.4 지오이드 계산결과

4.1에서 4.3까지의 계산결과를 restore기법에 의하여 정밀중력지오이드를 다음과 같이 결정하였다. 정밀중력지오이드는 EGM96의 수정계수를 이용한 지오이드고(N_{EGM96})를 기반으로 하고 여기에 잔여지오이드고(N_{RES})를 합성한 중파장까지의 결과와 잔여지오이드고 및 지형보정량에 의한 지오이드 효과(N_{TC})를 합성한 단파장까지의 결과를 구분하여 계산하였으며, 계산 결과는 Table 6에 표시하였다.

Table 6으로부터 알 수 있는 것과 같이 연구 대상지역의 전체적인 평균 지오이드고는 23.094 m로 나타나고 있으며 여기에 중파장 효과와 단파장 효과를 고려하였을 때 세부적인 파장의 변화를 통해 보다 정밀한 지오이드고를 산출할 수 있었다.

본 연구를 통하여 한반도 일원의 지역에 구축된 정밀중력지오이드 모델의 지오이드고는 최소 7.732 m에서부터 최대 33.705 m까지의 분포를 보였으며 이를 등고선도로 표현하면 Fig. 2와 같다.

Table 6. Statistical characteristics of the geoidal heights by sum of each wavelength

	N_{EGM96} (m)	$N_{EGM96}+N_{RES}$ (m)	$N_{EGM96}+N_{RES}+N_{TC}$ (m)
Min. value	7.647	7.744	7.732
Max. value	33.008	33.876	33.705
Mean	23.094	23.094	23.094
std	5.351	5.255	5.227

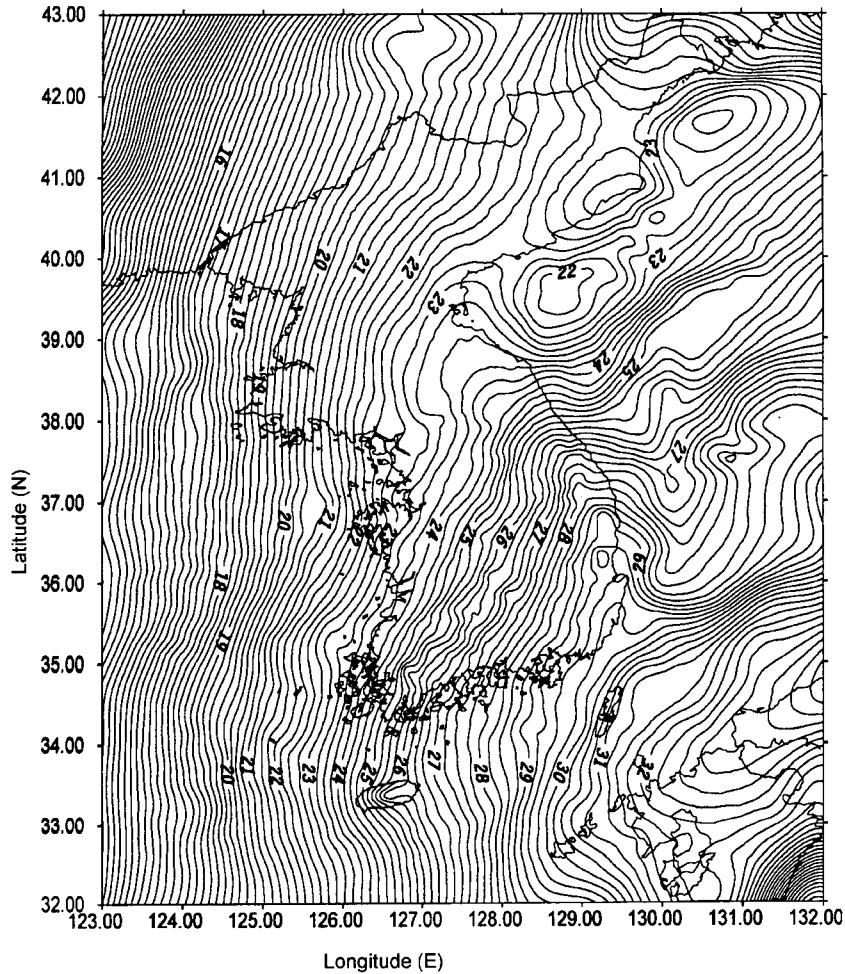


Fig. 2. Contour map of the precise gravimetric geoid model referred to WGS84 (Contour interval=0.2 m)

4.5 GPS/Leveling 지오이드와의 비교

최종적으로 계산된 정밀중력지오이드를 평가하기 위하여 GPS/Leveling에 의해 계산된 기하학적 지오이드와 비교하였다. 비교를 위하여 사용된 기하학적 지오이드는 1998년 11월에 성대 측지연구실에서 관측한 36점의 GPS측량결과를 이용하였다. 이 36점은 목포-익산 노선의 1등 수준노선으로 36점에 대하여 Ashtech Z-12 및 Trimble 4000SSI GPS 수신기를 이용하여 Static방법에 의하여 GPS 측량을 실시하였으며, 1998년도에 국립지리원에서 재측량한 수준측량 결과를 이용하여 GPS/Leveling에 의한 기하학적 지오이드를 계산한 것이다.

정밀중력지오이드와 GPS/Leveling에 의한 지오이드 및 그 차이는 Table 7에 표시한 바와 같다.

Table 7에서 Gravimetric Geoid는 본 연구를 통해 얻

어진 지오이드모델에서 GPS측량을 실시한 점의 지오이드를 추출한 것이다. 또 Ellipsoidal Height는 GPS측량을 통하여 얻어진 타원체고이고, Orthometric Height는 국립지리원에서 측량한 수준측량결과(정표고)이다. GPS/Leveling Geoid는 앞의 두 결과를 이용하여 타원체고에서 정표고를 제하여 얻어진 지오이드고이며, Difference는 두 지오이드고의 교차이다.

또한 Table 7의 결과에서 중력지오이드와 GPS/Leveling에 의한 지오이드를 보다 쉽게 비교하기 위하여 그래프상에서 표현하면 Fig. 3과 같다.

Table 7에서 살펴보면 No. 29점의 교차가 -1.49 m나 발생하여 다른 점들의 교차와 매우 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 이들 결과의 통계분석에 있어서는 No. 29점을 과대오차(gross error)로 간주하여 그 점

Table 7. Difference between the final gravimetric geoid and GPS/Leveling geoid

No	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Gravimetric	Ellipsoidal	Orthometric	GPS /Leveling	Difference (m)
			Geoid (m)	Height(m)	Height(m)	Geoid(m)	
1	35.906442	126.935339	24.9199	29.9593	5.3966	24.5627	0.3572
2	35.876342	126.924431	24.7901	42.1960	17.6964	24.4996	0.2905
3	35.855844	126.904978	24.8900	59.1269	34.5854	24.5415	0.3485
4	35.828083	126.892450	24.8487	36.4180	11.8958	24.5222	0.3265
5	35.794164	126.877264	24.6504	34.2669	9.8435	24.4234	0.2270
6	35.766942	126.861908	24.5925	31.6640	7.2710	24.3930	0.1995
7	35.734194	126.843919	24.7109	30.5300	6.0788	24.4512	0.2597
8	35.703892	126.787072	24.5431	36.3604	12.0251	24.3353	0.2078
9	35.654949	126.784986	25.2949	43.3520	18.6182	24.7338	0.5611
10	35.618728	126.771839	24.8466	50.9913	26.4773	24.5140	0.3326
11	35.617158	126.721544	24.6513	36.0857	11.7152	24.3705	0.2808
12	35.590569	126.677533	24.4113	28.0682	3.8448	24.2234	0.1879
13	35.555803	126.697183	23.7299	54.1131	30.1900	23.9231	-0.1932
14	35.521058	126.703439	23.8904	58.9755	34.9417	24.0338	-0.1434
15	35.494105	126.700781	24.5869	57.5652	33.1664	24.3988	0.1881
16	35.455322	126.695289	22.9053	82.3380	58.7551	23.5829	-0.6776
17	35.414055	126.747031	25.3115	309.2700	284.3966	24.8734	0.4381
18	35.374628	126.807153	24.6135	94.0250	69.3914	24.6336	-0.0201
19	35.320975	126.802911	24.8340	86.5790	61.8086	24.7704	0.0636
20	35.274433	126.792972	24.0708	144.2360	119.8304	24.4056	-0.3348
21	35.237947	126.818097	23.8792	57.1050	32.7432	24.3618	-0.4826
22	35.186039	126.867925	24.2702	63.8260	39.1665	24.6595	-0.3893
23	35.138178	126.901131	25.3384	74.1310	48.8452	25.2858	0.0526
24	35.085408	126.867686	25.0282	63.4290	38.2964	25.1326	-0.1044
25	35.058155	126.848875	24.8907	47.0070	21.9378	25.0692	-0.1785
26	35.039617	126.805136	24.6980	38.6240	13.6830	24.9410	-0.2430
27	35.033063	126.731675	24.6742	42.3730	17.5371	24.8359	-0.1617
28	35.006153	126.711667	24.7955	32.0460	7.1510	24.8950	-0.0995
29	35.019189	126.636925	21.7524	37.4800	14.2376	23.2424	-1.4900
30	35.032730	126.551275	24.6746	36.8340	12.2444	24.5896	0.0850
31	35.009850	126.515842	24.3571	37.0680	12.6612	24.4068	-0.0497
32	34.968255	126.456281	24.4069	41.3470	16.9605	24.3865	0.0204
33	34.908283	126.432958	23.7284	38.3322	14.2664	24.0658	-0.3374
34	34.835978	126.421156	23.7475	38.1750	14.0940	24.0810	-0.3335
35	34.805053	126.396350	23.6609	28.5813	4.5679	24.0134	-0.3525
36	34.782731	126.384100	24.5366	27.2442	2.7960	24.4482	0.0884

을 제외하고 통계분석을 실시하였으며, 파장별 지오이드 고의 정확도를 비교하기 위하여 장파장효과와, 장파장 및 중파장 효과, 장파장과 중파장 및 단파장 효과가 고려된 세 종류의 지오이드고에 대하여 GPS/Leveling에 의한 지오이드와 교차를 분석하여 그 결과를 Table 8에 표시하였다.

Table 8에서 보는 것과 같이 교차의 최소값 및 최대값은 중파장이나 단파장 효과가 고려될수록 작아지는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 교차의 평균값 역시 EGM96을 해석한 장파장 효과와의 교차의 평균값은 0.4405 m에서 중력자료에 의한 중파장 효과가 고려되었을 때 교차의 평균값이 0.1630 m로 줄어들었고, 단파장

Table 8. Statistical characteristics of the each geoid differences

	$N_{EGM96} - N_{GPS/Leveling}$ (m)	$(N_{EGM96} + N_{RES}) - N_{GPS/Leveling}$ (m)	$(N_{EGM96} + N_{RES} + N_{TC}) - N_{GPS/Leveling}$ (m)
Min. value	-0.1648	-0.5238	-0.6775
Max. value	0.9244	0.7042	0.5610
Mean	0.4405	0.1630	0.0114
std	0.2533	0.2893	0.2817

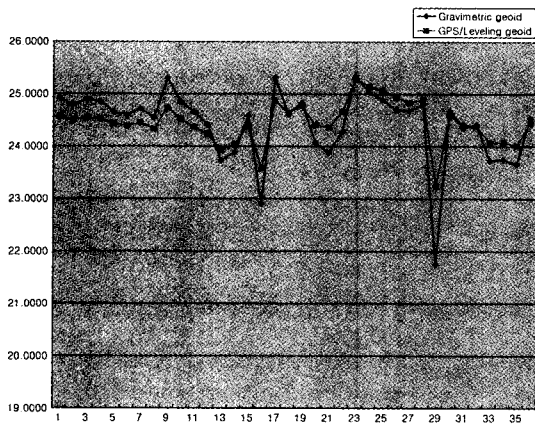


Fig. 3. Comparison between gravimetric geoid and GPS/Leveling geoid

효과인 지형보정 효과까지 고려되었을 때에는 교차의 평균값은 0.0114 m로 줄어들어 정밀지오이드 계산에 있어서 각 파장별 효과의 고려가 지오이드고 계산의 정확도에 미치는 영향이 얼마나 큰가 하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 교차 자체의 표준편차값은 중파장효과가 고려되었을 때 다소 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 성질이 서로 다른 여러 가지 중력자료의 합성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 앞으로 우리나라의 중력측정자료에 있어서 균질성의 확보와 나아가 서로 다른 위성고도데이터의 합성에 있어서 cross over adjustment 같은 기법에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 중력학적 방법 및 위성측지방법에 의하여 한반도 일원의 정밀지오이드모델을 개발하였다. 정밀지오이드모델의 개발을 위하여 EGM96 지오폠펜설모델의 계수 및 수정계수를 활용하여 지오이드고의 장파장효과를 계산하였고, 중력학적 방법에 의하여 중력자료를, 위성측지방법에 의하여 위성고도자료를 처리하여 잔여중

력이상 및 잔여지오이드를 계산하였다. 또한 한반도 전역에 걸쳐 구축된 수치지형모델을 이용하여 한반도 전역의 지형보정량 및 지형보정효과를 계산하였다. 최종적으로 계산된 지오이드모델을 평가하기 위하여 GPS/Leveling에 의한 기하학적 지오이드고와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구를 통해 최초로 계산된 한반도 일원의 표고 이상값은 최소 -28.3 cm에서 최대 2.4 cm의 분포를 보였다.
2. EGM96포텐셜 계수모델의 수정계수 및 이상적 타원체 정수를 활용하여 계산된 지오이드고는 수정계수를 사용하지 않은 기존의 결과와 비교할 때에 지오이드의 평균값에서 0.576 m가 큰 것으로 나타났고, OSU91A 모델에 의한 결과와는 평균값에서 0.2 m의 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다.
3. 본 연구를 통해 최종적으로 얻어진 중력지오이드모델의 지오이드고 분포는 최소 7.732 m에서부터 최대 33.705 m까지의 변화를 보이고 있으며 그 평균값은 23.094 m를 나타냈다.
4. 본 연구의 결과를 GPS/Leveling에 의한 기하학적 지오이드와 비교하였을 때 그 교차의 평균값은 0.0114 m, 표준편차는 0.2817 m로 나타났다.
5. 향후 우리나라의 중력측정데이터에 있어서 균질성의 확보에 대한 보완과 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 98년도 후반기 해외 Post-Doc.연수지원에 의한 연구결과이며, 한국과학재단과 Ohio State University의 Dr. Christopher Jekeli 교수께 감사드립니다.

참고문헌

1. Rapp R. H., "Methods for the Computation of Geoid

- Undulations from Potential Coefficients”, Bulletin Geodesique 101, 1971, pp.283-297.
2. 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, December 1986.
 3. Rapp R. H. and N. K. Pavlis, “The Development and Analysis of Geopotential Coefficient Models to Spherical Harmonic Degree 360”, Journal of Geophysical Research, Vol. 95 No. B13, 1990, pp. 21885-21911.
 4. Rapp R. H., “Use of Potential Coefficients Models for the Geoid Undulation Determinations Using a Spherical Harmonic Representation of the Height Anomaly/Geoid Undulation Difference”, Journal of Geodesy, Vol.71, 1997, pp.282-289.
 5. Sjöberg L., “On the Quasigeoid to Geoid Separation”, Manuscripta Geodetica, 20, 1995, pp.182-192.
 6. 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.
 7. Heiskanen W., Moritz H., “Physical Geodesy”, W.H. Freeman and Co., Sanfransico, 1967.
 8. 이석배, “베셀타원체상에서의 한반도 지오이드 모델의 개발”, 한국측지학회지, 제16권, 제2호, 1998, pp. 213-223.
 9. 이석배, “지형보정효과를 고려한 한반도 일원에서의 정밀중력지오이드”, 대한토목학회 논문집, 제17권, 제III-6호, 1997, pp.619-628.