한국측지학회지, 제 16 권, 제 2 호, pp.213~223(1998년 12월 30일)

베셀타원체상에서의 한반도 지오이드 모델의 개발
Development of the Geoid Model in Korean Peninsula referred to Bessel Ellipsoid

이 석 배*
Lee, Suk-Bae

要 旨

본 논문은 베셀타원체상에서 한반도 일원의 지오이드모델을 개발하기 위한 연구이다. 여러가지의 유용한 데이터를 사용하여 remove and restore technique에 의하여 GRS80 타원체상에서 정밀지오이드고를 계산하였으며, FFT 기법에 의하여 Stokes 적분을 수행하였다. GTOPO30으로부터 표고값을 추출하여 모든 격자점의 위치를 3 매개변수 방법에 의하여 베셀타원체 좌표계로 환산하였으며, 기하학적 방법으로 베셀지오이드고를 계산하였다. 연구결과 한반도 일원에서의 GRS80 기준의 정밀 중력지오이드모델(KOGGDM33)과 베셀타원체 기준의 지오이드모델(KOBGDM33)을 얻을 수 있었으며, 베셀타원체상에서의 지오이드고는 용암포의 -91.8 m에서 대한해협의 -39.0 m에 이르기까지의 점진적인 분포를 보이는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper deals with the geoid modelling in and around Korean peninsula referred to Bessel ellipsoid. Several useful data were used to compute precise geoidal heights referred to GRS80 by remove and restore technique and FFT technique was used to evaluate Stokes' integral. All grid point elevations extracted from GTOPO 30 and Bessel coordinates of all grid point were computed through coordinates transformation by applying three transformation parameters. Finally, geoidal heights referred to Bessel ellipsoid were calculated by geometric method. As the results of this study, a precise gravimetric geoid model referred to GRS80 (KOGGDM33) and geoid model referred to Bessel ellipsoid(KOBGDM33) in and around Korean peninsula were developed. KOBGDM33 shows the gradual distribution of geoidal heights from -91.8 m in Yongampo to -39.0 m in the straits of Korea.

1. 서 론

지구표면은 그 형상이 매우 불규칙하여 어떤 일정한 규칙에 따른 임의 점의 위치표시가 사실상 불가능하다. 따라서 일정한 규칙에 따라 위치를 표현하기 위해서는 새로운 지구의 수학적 형상을 필요로 하는데, 측지학에서 각종 작업의 기준이 되는 이 새로운 지구의 수학적 모델이 지오이드이며, 이는 일종의 등중력포텐셜면으로 물리적인 지구의 형상을 표현한다. 지오이드와 가장 유사한 지구의 기하학적 형상을 지구타원체라고 하며, 각 나라에서는 각 지역의 지오이드면에 적합한 지구타원체를 설정하여 그 지역의 준거타원체로 이용하고 있다. 우리나라에서는 동경원점계의 베셀타원체를 준거타원체로 채택하고 있으므로 모든 기준점의 좌표가 베셀타원체상에서 전개되어 있다.

오늘날 GPS측량이 활발해지고 그 활용범위가 넓어지면서 3차원적 위치결정을 위해 우리나라 지오이드 모델의 개발이 더욱 필요하게 되었다. 또한 이러한 측지학적 목적뿐만 아니라 중력의 분포특성을 고려해야 하는 위성궤도 해석이나 탄도무기의 궤적 계산과 같은 군사적 목적과 지하자원이나 해양자원 탐사를 위한 지질학적 목적 등 여러 분야에서 지오이드 모델의 필요성은 날로 증가해 가고 있다. 지오이드 모델이 개발되었을 때에 얻어지는 기대효과로는 표고의 기준면을 제

*전주공업대학 토목과 조교수

공하여 정표고를 보다 정밀하게 결정할 수 있으며, 지오이드고를 고려한 측지망 조정계산을 실시함으로써 좌표결정의 정확도를 높일 수 있다. 또한 GPS측량의 실용화에 기여할 수 있으며, 장기적으로 우리나라 측지기준계의 재정립에 기여할 수 있는 효과를 가지고 있다.[1,2]

지오이드 연구에 있어서 Marsh J. G.와 Rapp R. H.는 지오포텐셜모델의 개발에 주력해왔고,[7,8] 최근에는 EGM96 지오포텐셜 모델이 발표되어 각 국의 개략적인 지오이드를 계산하는데 활발하게 이용되고 있다.[9] 지오이드 결정에 있어서도 Stokes 함수를 직접 적분하는 방법뿐만 아니라 fast Fourier transform, fast Hartly transform 등의 방법들이 연구되어 정확도와 효율성을 높일 수 있었으며 Tziavos I. N.과 Sideris M. G., R. Forsberg 등에 의하여 FFT기법에 의한 지오이드 계산의 연구와 보완이 이루어져 Zero-padding이나 multi-band 기법에 의한 유용한 결합알고리즘이 개발되었다.[10-12] Yecai Li는 지형보정량 계산을 프로그램화하여 단파장 효과를 고려한 정밀지오이드를 결정할 수 있게 하였다.[13]

GPS의 출현 이후, GPS 측량데이터를 수준측량 또는 중력측량데이터와 결합시켜 지오이드를 보다 정밀하게 결정하고자 하는 연구가 활발해지고 있다.[14-16] 국내에서는 지오이드와 관련된 연구의 대부분이 GRS80 타원체를 기준으로 한 지오포텐셜모델의 해석이나 중력학적 방법에 의한 지오이드고의 계산이 주류를 이루고 있으며,[2-4] 베셀타원체를 기준으로 하는 연구는 남한지역에 국한하여 천문측지지오이드가 계산된 바 있다.[1,5]

본 연구에서는 한반도 일원을 연구대상지역으로 베셀타원체를 기준으로 하여 보다 정밀한 지오이드를 계산하고자 하였다. 먼저 한반도 일원의 연구대상지역에 대하여 40,001점의 3'×3'격자망을 구성하고 중력학적 방법에 의하여 GRS80 타원체기준의 정밀지오이드를 계산하여 KOGGDM33을 구축하였으며, 이와는 별도로 GTOPO30을 해석하여 같은 40,001점의 격자점에 대한 한반도 일원의 수치표고모델인 KODEM33을 구성하였다. 또한 두 모델을 이용하여 기하학적 방법으로 타원체고를 계산하였으며 이렇게 계산된 GRS80 타원체상에서의 격자점의 위치를 3 매개변수방법에 의한 좌표변환을 통하여 베셀타원체상에서의 좌표로 환산한 후 지오이드고를 계산하였다. 또 이렇게 계산된 베셀지오이드를 보간하여 한반도 일원에서의 베셀타원체를 기준으로 한 지오이드모델인 KOBGDM33을 개발하였다.

2. 지오이드의 결정이론

2.1 중력학적 방법(Gravimetric Method)

중력학적 방법에서는 중력측정값과 포텐셜의 차이를 이용하여 지오이드를 결정한다. 중력은 높이와 관련된 함수이므로 서로 다른 고도 및 위도의 중력값을 직접 비교할 수 없으며, 중력의 지리적 변화를 구하기 위해서는 실측된 중력값을 동일 기준면의 값으로 보정하여야 한다. 이때 기준면으로 지오이드가 사용되며 중력보정은 측지학적 목적을 위해서는 주로 프리에어보정 방법이 사용된다.

2.2 위성고도자료에 의한 방법(Satellite Altimetry Method)

이 방법은 위성고도자료(altimetry data)를 통해 해면기복을 구하고, 3×10^{-7}정도의 측지학에서는 해면기복 자체를 지오이드고로 취급할 수 있으며 ±10 cm까지의 지오이드를 구할 수 있다. 여기서 해면고도라고 함은 지구타원체면으로부터 실제 해면까지의 거리로서 지오이드에 근접하는 물리량이며, 종래의 관측수단으로는 직접 측정이 매우 어려웠던 관측량이다.

해면고도의 관측은 궤도상에서 인공위성에 탑재한 고도계(radar altimeter)로부터 해면에 수직한 방향으로 radar pulse를 발사하여 해면으로부터의 반사시간을 측정함으로써 해면으로부터 인공위성까지의 거리를 구한다. 고도계의 관측 정밀도는 위성의 고도가 840 km인 GEOS-3의 경우 60 cm, 위성의 고도가 800 km인 SEASAT, GEOSAT에서는 각각10cm와 3.5 cm, 그리고 위성의 고도가 780 km와 1340 km인 ERS-1과 TOPEX/ POSEIDON에서는 각각 10 cm이하와 2 cm 정도로 크게 향상되었다.

2.3 천문측지 방법(Astrogeodetic method)

천문측량이라 함은 임의점에서 천문경위도를 결정하는 작업을 말한다. 일반적으로 지오이드와 타원체는 일치하지 않기 때문에 지오이드면에 대한 연직선과 타원체면에 대한 법선이 이루는 사이각을 연직선 편차라고 한다. 이 연직선편차는 천문경위도와 측지경위도의 차이로 구할 수 있으며, 이 연직선편차를 거리에 대하여

적분하면 지오이드고의 변화를 구할 수 있다.

2.4 GPS/Leveling에 의한 기하학적 방법

임의점에서의 지오이드고는 그 점에서의 타원체고와 정표고의 차이로 구할 수 있다. 임의점에서의 타원체고는 GPS측량을 통하여 얻을 수 있으며, 정표고는 수준측량을 통하여 얻을 수 있다. 따라서 수준점에서 GPS측량을 실시하거나 임의점에서 GPS측량과 수준측량을 병행하면 기하학적 방법으로 지오이드고를 구할 수 있다.

2.5 지오포텐셜 모델에 의한 방법

지오이드면은 지하구조의 밀도분포에 따라 여전히 불규칙한 형상을 이루므로 하나의 수학적 모델로 인식하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 측지학자들은 구면조화를 이용하여 지오이드 모델의 추정값을 개발해 왔다. 지오포텐셜모델이라고 하는 것은 육상에서 측정한 중력자료와 위성고도계자료 및 인공위성 궤도관측에 의한 중력자료 등을 합성하여 구한 지구전체에 대한 평균중력이상을 구면조화분석을 실시하여 계산한 정규화된 중력포텐셜 계수의 집합으로서 cosine과 sine의 계수들로 이루어져 있다. 육상중력측량과 위성측지학의 결합을 통해 위성관측지역에 대한 지심좌표와 지구중력장에 대한 구면조화계수들을 결정할 수 있다. 역으로 지오포텐셜의 차수에 따라 이미 만들어진 구면조화계수들을 이용하여 구면조화분석을 실시함으로 특정지역의 지오이드고와 중력이상, 연직선편차를 구할 수 있다.

3. 연구의 내용 및 방법

베셀타원체를 기준으로 한 정밀지오이드를 결정하기 위하여 먼저 한반도 일원(위도 32°N~43°N, 경도 123°E~132°E)을 연구대상지역으로 하여 위도와 경도에 대하여 3'×3'격자망을 구성하여 이 40,001점의 격자점에서 수치해석을 수행하였다.

3.1 정밀중력지오이드의 계산

정밀중력지오이드의 결정은 지오포텐셜 모델을 해석한 장파장효과(N_{GM})와 중력자료를 해석한 중파장효과($N_{\Delta g}$) 그리고 DTM자료를 해석한 단파장효과(N_h)로 나누어 계산하였으며, 각각의 결과를 remove and restore 기법에 의하여 합성하였다. 정밀중력지오이드를 결정하기 위한 수치해석과정을 흐름도로 나타내면 그림 1과 같다.

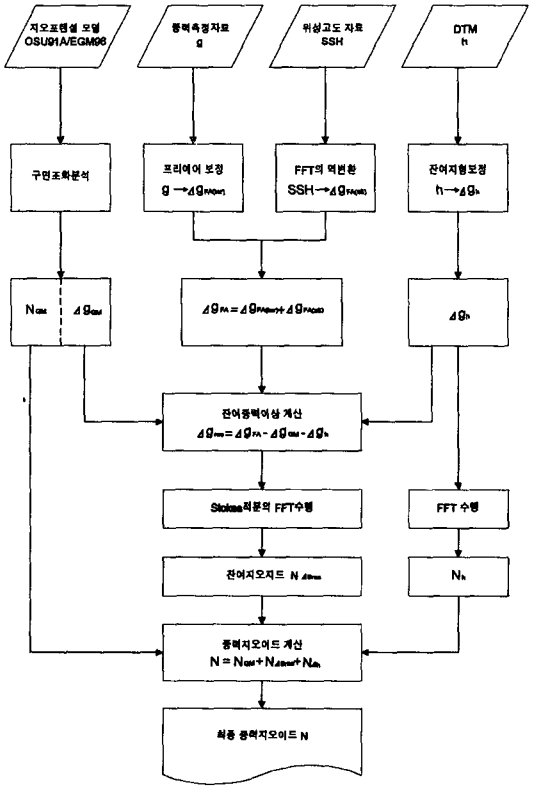

그림 1. Flow chart for precise gravimetric geoidal heights calculation

그림 1에서 보는 바와 같이 장파장효과를 해석하기 위하여 OSU91A 지오포텐셜모델을 최대차수 360으로 구면조화분석을 실시하여 지오이드고와 중력이상값을 계산하였다. 중파장효과를 해석하기 위하여는 중력측정자료를 프리에어보정을 실시하여 중력이상값을 구하고, 위성고도자료는 FFT의 역변환에 의하여 중력이상값을 구하여 두 값을 합성하였다. 단파장효과를 해석하기 위하여는 DTM을 사용하여 잔여지형보정량과 지오이드고를 계산하였는데 기존의 남한지역의 10"× 10" DTM을 보간하여 재구성한 3'×3' DTM을 이용하였다. 각 파장별로 계산된 중력이상값을 이용하여 remove technique에 의하여 잔여중력이상을 계산하였으며, Stokes 적분은 정확도와 효율성이 높은 것으로 평가된 FFT 방법에 의하여 수행하여 잔여지오이드고를 계산한 후 이를 다시 restore technique에 의하여 정밀 중력지오이드를 계산하였다. 그 결과 얻어진 정밀중력지오이드고를 보간하여

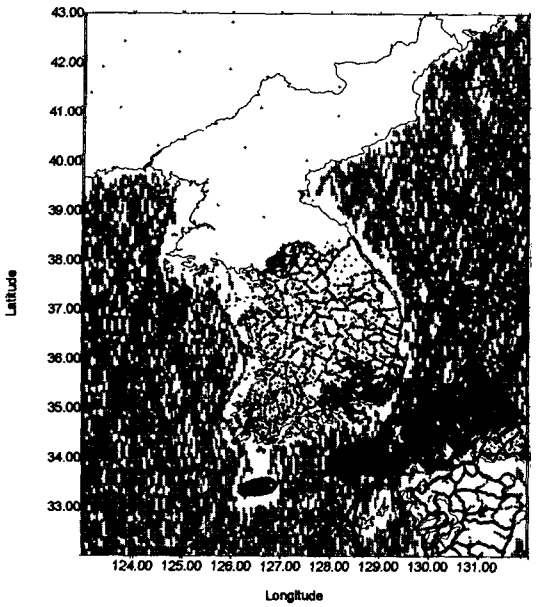

그림 2. Data distribution map of gravity and satellite altimetry data

GRS80 타원체를 기준으로 한 한반도 일원의 중력지오이드모델 KOGGDM33 (KOrean GRS80 Geoid Model, 3' ×3' grid)을 구축하였다. 본 연구에 사용된 데이터는 14,608점의 중력측정자료와 19,833점의 위성고도자료로 구성되어 있으며 이 데이터의 분포는 그림 2와 같다. 중력측정자료는 국립지리원 및 부산대학교 중력측정자료와 동경대학교 해양연구소(ORI)의 해상측정자료로 구성되어 있으며, 위성고도자료는 Geosat, ERS-1, Topex-poseidon Satellite의 해면고도자료를 이용하였다.

3.2 수치표고모델의 구성

기하학적 방법으로 한반도 일원의 지오이드고를 구하기 위해서는 한반도 일원의 수치표고모델(DEM)을 필요로 한다. 그러나 현재 국내에는 한반도 전체에 대하여 구축된 수치표고모델이 없는 상태이므로 USGS의 GTOPO30 모델을 이용하여 한반도 일원의 3'×3' 수치표고모델인 KODEM33(KOrean Digital Elevation Model, 3'×3' grid)을 재구성하였다.

GTOPO30은 미국 NASA, UNEP/GRID, USAID와 멕시코의 INEGI, 일본의 GSI 등 여러 기관의 데이터 협조를 받아 U.S. Gelogical Survey의 EROS Data Center에서 3년간의 노력 끝에 1996년 하반기에 만들어낸 30"×30" (약 1 km×1 km) 격자로 구성된 전세계의 수치표고모델이다. 그림 3은 GTOPO30 모델중 한반도 일원의 연구대상지역에 대하여 데이터를 추출하여 작도한 지형도이다.

3.3 좌표변환 및 지오이드고 산출

좌표변환과 베셀지오이드고 산출은 그림 4와 같은 흐름도에 따라 수치해석을 실시하였다. 앞에서 구축된 정밀지오이드모델 KOGGDM33과 수치표고모델 KODEM33으로부터 위치가 같은 격자점에 대하여 정밀지오이드고와 표고를 추출하고 이를 합성하여 GPS측량의 기준면인 WGS84 에서의 타원체고(h=N+H)를 계산하였다. 또한 위도, 경도, 타원체고(φ, λ, h)로 구성된 격자점의 위치를 WGS84에서의 3차원 지심직각좌표(X, Y, Z)로 환산한 후, 3개의 매개변수를 사용하여 베셀타원체의 지심직각좌표로 환산하였으며 이를 다시 베셀타원체상에서의 위도, 경도, 타원체고로 환산한 후 타원체고에서 표고값을 제하여 지오이드고를 계산하였다. 계산된 베셀지오이드고를 이용하여 한반도 일원에서의 베셀지오이드모델인 KOBGDM33(KOrean Bessel Geoid Model, 3'×3' grid)을 구축하였다. 좌표변환에 사용된 3 매개변수의 값은 다음과 같다.[6]

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{BESSEL} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}_{WGS84} + \begin{Bmatrix} +143.65 \\ -503.82 \\ -686.24 \end{Bmatrix}$$

3.4 천문측지지오이드의 계산

본 연구에서 계산된 동경원점계의 베셀타원체를 기준으로 하는 한반도 일원의 베셀지오이드가 계산되면 이에 대한 정밀도 평가가 요구된다. 그러나 현재로는 한반도 전체를 대상으로 한 베셀지오이드는 계산된 바가 없어 이의 정밀도 평가를 위하여 천문측지 지오이드를 계산하였다.

천문측지 지오이드는 천문측량 데이터를 해석하여 연직선편차의 남북방향성분(ξ)과 동서방향성분(η)을 최소자승 곡면다항식기법에 의하여 결정하였다. 본 연구에 사용된 우리나라의 천문측량 데이터는 국립지리원에서 1970년부터 1994년까지 천문측량을 실시한 총 45점중 39점으로 정확한 측지경위도를 알지 못해 연직선편차의 두 성분을 계산할 수 없는 5점을 포함하여 총 6점을 제외하였다. 본 연구에 사용된 천문측량 데이터

그림 3. Topography map in and around Korean peninsula

의 분포는 그림 5와 같고, 천문측량점(39점)에서의 천문측지지오이드의 분석결과는 표 1과 같다.

천문측량점에서의 계산결과를 minium curvature방법에 의하여 보간하여 등고선도로 나타낸 남한지역의 천

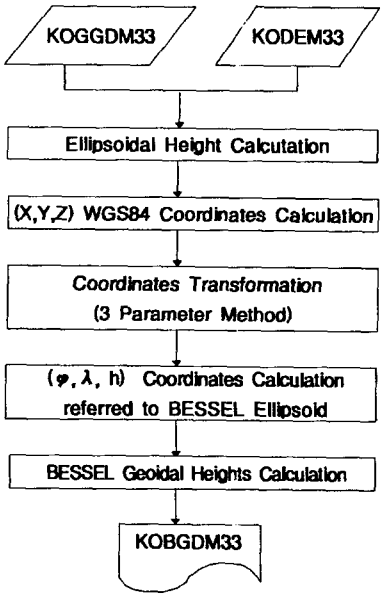

그림 4. Flow chart for BESSEL geoidal heights calculation

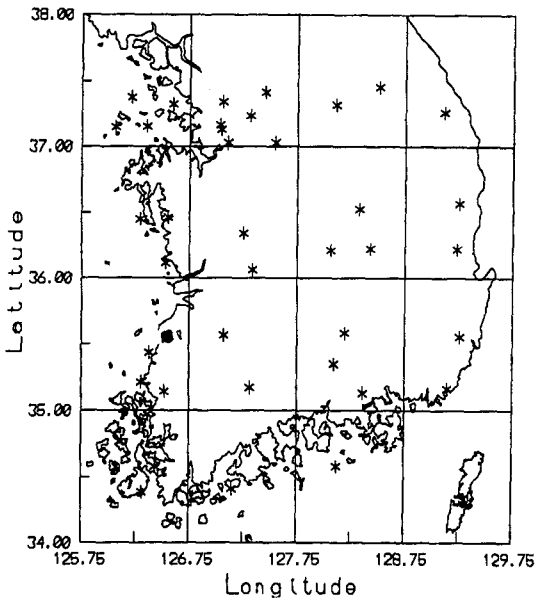

그림 5. Data distribution map of astro-geodetic data

문측지지오이드는 그림 6과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 남한지역에서의 천문측지 지오이드의 분포는 인천 앞바다 영종도의 -63 m에서부터 대한해협의 -40 m에 이르기까지 북서에서 남동으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

표 1. Statistics of deflection of vertical and astro-geodetic geoid

FIGURE (unit)	Minimum	Maximum	Mean
XAI(ξ : second)	-12.54	17.95	10.43
ETA(η : second)	-17.41	12.02	-7.99
Geoidal Heights(meter)	-63.67	-41.21	-53.94

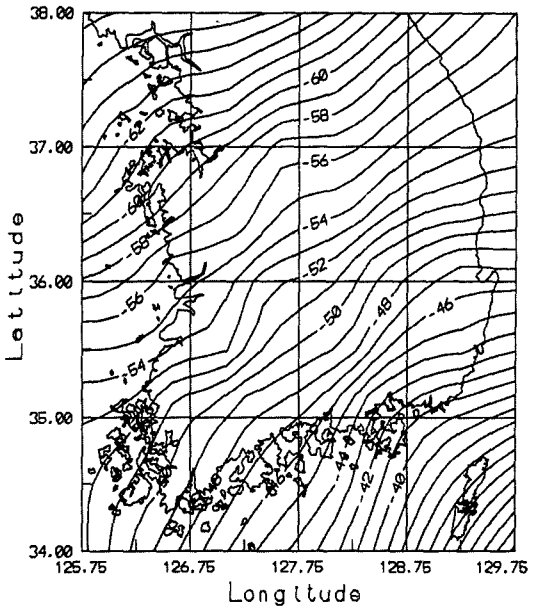

그림 6. Contour map of astro-geodetic geoidal heights referred to Bessel ellipsoid

4. 결과분석

4.1 정밀중력지오이드의 계산결과

정밀중력지오이드를 결정하기 위하여 그림 1의 흐름도에 따라 수치해석을 실시하였으며, 그 결과는 표 2-표 4와 같다.

표 2. Gravity anomaly value of each wavelength and residual gravity anomaly computed by remove technique (unit : mgal)

Figure	Minimum	Maximum	Mean
Long wavelenhth(Δg_{GM})	-95.02	85.59	17.72
Medimum wavelength(Δg_{FA})	-90.12	159.59	16.26
Short wavelength(Δg_{h})	0.00	20.55	0.89
Residual gravity anomaly(Δg_{res})	-68.70	141.21	-1.60

표 3. Geoidal effects of each wavelength and residual geoid computed by FFT technique (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean
Long wavelenhth(N_{GM})	8.85	33.02	17.72
Residual geoid($N_{\Delta gres}$)	-4.06	2.12	-0.15
Short wavelength($N_{\Delta h}$)	-0.06	0.15	0.00

표 4. Precise gravimetric geoidal heights of KOGGDM33 referred to GRS80 (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean
Geoidal heights(N_{GRS80})	9.24	33.52	23.18

표 2는 각 파장별로 계산된 연구대상지역의 중력이상값을 보여주고 있는데 지오포텐셜모델의 해석결과 최소 -95.02 mgal에서 최대 85.59 mgal의 분포를 보이고 있으며, 육상지역의 중력측정자료와 해상지역의 해면고도자료에 의한 중력이상값은 최소 -90.12 mgal에서 최대 159.59 mgal의 분포를 보이고 있다. 또한 북한지역과 해상지역을 제외한 남한의 3′×3′ DTM(6,561점)을 mass prism모델에 의하여 지형보정량을 계산한 결과, 최소 0.00 mgal에서 최대 20.55 mgal의 분포를 보이고 있으며, 그 평균은 0.89 mgal로 미소하게 나타났다. 각 파장별 효과를 각각 계산한 후에 remove technique에 의하여 잔여중력이상을 계산하였는데 최소 -68.70 mgal에서 최대 141.21 mgal의 분포를 보였으며, 그 평균은 -1.60 mgal로 나타났다.

표 3은 지오이드효과를 계산한 것으로 지오포텐셜모델의 구면조화 분석결과 최소 8.85 m에서 최대 33.02 m의 분포를 보였으며 지형보정량에 의한 지오이드효과는 평균적으로 볼 때는 거의 영향을 끼치지 않지만 국부적으로는 지형의 차이에 의하여 최소 - 6 cm에서 최대 15 cm의 분포를 보이고 있어 센티미터 수준의 정확도를 확보하기 위해서는 지형보정과 이에 의한 지오이드효과를 고려해 주어야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 잔여중력이상에 대한 잔여지오이드의 계산은 스토크스 적분의 FFT 기법을 이용하여 수행하였는데 Multi band 기법을 적용하여 계산하였으며 circular convolution 효과를 피하기 위해 100% zero-padding을 적용하였다. 잔여지오이드고의 계산결과 최소 -4.06 m에서 최대 2.12 m의 분포를 보이고 있다.

표 4는 앞에서 계산된 결과들을 이용하여 최종적으로 구한 정밀중력지오이드고의 분포이다. 계산결과 최소 9.24 m에서 최대 33.52 m의 분포를 보이고 있으며, 전체 평균값은 23.18 m로 나타났다. 이렇게 구해진 정밀중력지오이드고를 이용하여 GRS80 타원체를 기준으로 한 한반도 일원의 지오이드모델인 KOGGDM33을 구축하였다. KOGGDM33을 등고선도로 표현하면 그림 7과 같다. 그림 7에서 지오이드고의 변화를 살펴보면 용암포의 17.2 m에서 영종도의 22.7 m, 대한해협의 30.0 m내외에 이르기까지 북서에서 남동으로 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

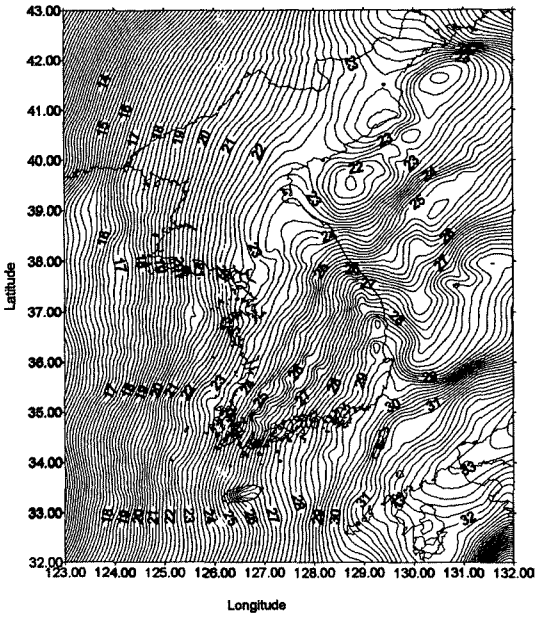

그림 7. Contour map of KOGGDM33 referred to GRS 80 (Contour interval=0.2 m)

한 KOGGDM33의 정밀도를 평가하고자 GPS/Leveling에 의한 기하학적인 지오이드와 비교하였다. GPS 데이터는 51개의 수준점에서 GPS측량을 실시한 천문대 자료를 이용하였으며,[1] KOGGDM33의 중력지오이드와 GPS/Leveling에 의한 지오이드의 교차를 구하여 정밀도를 평가하였다. 표 5는 51개의 수준점에서의 계산된 교차를 분석한 것이다.

표 5. Difference analyses between KOGGDM33 and GPS/Leveling geoid (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean	S.D.
Geoidal heights differences	-1.055	0.915	-0.009	0.459

표 6. Statistics of GTOPO30 and KODEM33 in and around Korean peninsula (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean
GTOPO30	-40	2,565	-
KODEM33	-38.50	2,429.71	180.33

표 5에서 보는 것과 같이 51개 수준점에서의 교차의 분포는 최소 -1.055 m에서 최대 0.915 m까지의 분포를 보이고 있으며 교차의 평균값은 KOGGDM33의 중력 지오이드가 GPS/Leveling에 의한 지오이드보다 0.009 m 작은 것으로 나타났으며 표준편차는 0.459 m를 보이고 있다.

4.2 한반도 수치표고모델(DEM) 구성결과

GTOPO30은 전세계에 대하여 30"×30" 격자구조를 갖는 수치표고모델이므로 한반도 일원의 연구대상지역의 표고를 추출하여 3'×3' 수치표고모델(KODEM33)로 재구성하였다. Kriging 방법에 의하여 보간을 실시하였으며, 수치표고모델의 해석결과는 표 6과 같다.

한반도 일원에서의 GTOPO30 해석결과 표고의 최소

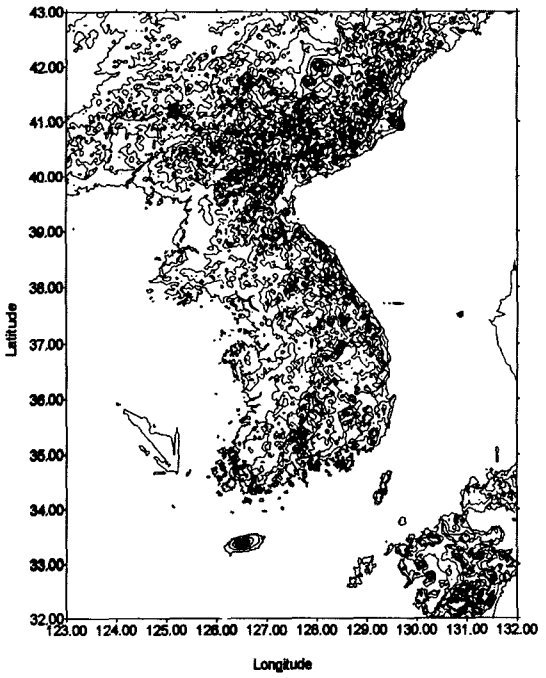

그림 8. Topography contour map of KODEM33 (Contour interval=200 m)

값은 -40 m에서 최대 2,565 m의 분포를 보였으며, KODEM33의 해석결과 한반도 일원의 표고는 최소 -38.50 m에서부터 최대 2,429.71 m, 평균표고는 180.33 m로 나타났다. GTOPO30과 KODEM33을 살펴보면 백두산 천지 및 궤상봉 주변과 개마고원 일대에서 2,000 m를 넘어 가장 높은 지역으로 나타나고 있다. 또 태백산맥 일대와 지리산 주변, 제주도의 한라산 주변의 표고가 대략 1,000 m내외에서 2,000 m 가까운 것으로 나타나 높은 지역임을 표시하고 있으나 한반도의 대부분 지역은 표고가 200 m를 넘지 않는 것으로 나타났다. KODEM33을 등고선 간격 200 m의 등고선도로 표시하면 그림 8과 같다. 그림 8에서 도서지방의 표고값에 따라 보간의 영향으로 일부 해상지역에서 잘못된 등고선을 보이고 있으나 전체적으로 양호하며 등고선이 불규칙하고 조밀하여 표고수치를 나타내지 못하는 아쉬움을 남겼다.

4.3 베셀지오이드 계산결과

좌표변환을 통하여 계산된 한반도 일원에서의 동경원점계 베셀타원체 기준의 지오이드모델을 분석한 결과는 표 7과 같고 이를 등고선도로 표현하면 그림 9와 같다.

표 7에서 보는 바와 같이 한반도 일원에서의 베셀지오이드고의 분포는 최소 -116.14 m에서부터 최대 -13.52 m까지의 분포를 보이고 있으며 전체 평균은 -63.94 m의 값을 보이고 있다. 그림 7에서 베셀지오이드의 분포를 살펴보면 용암포에서 -91.8 m, 영종도에서 -68.7 m, 대한해협에서 -39.0 m 내외의 분포를 보이고 있으며 위도 38°N을 기준으로 할 때 북한지역에서는 -92 m에서 -68 m까지 북서에서 남동으로 증가하면서 약 24 m 내외의 분포를 보이고 있으며, 남한지역에서는 -68 m에서 -29 m까지의 약 39 m 내외의 분포를 보이며 남동방향으로 증가하고 있어 전체적인 지오이드면의 변화양상은 GRS80 타원체에서의 변화와 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한 두 타원체상에서 지오이드고의 차이를 통해 타원체의 이격을 살펴보면 신의주 부근 용암포에서 109.0 m의 이격을 보이고 있고, 영종도에서는 91.4 m, 대한해

표 7. Tokyo datum geoidal heights of KOBGDM33 referred to Bessel ellipsoid (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean
Geoidal heights	-116.14	-13.52	-63.94

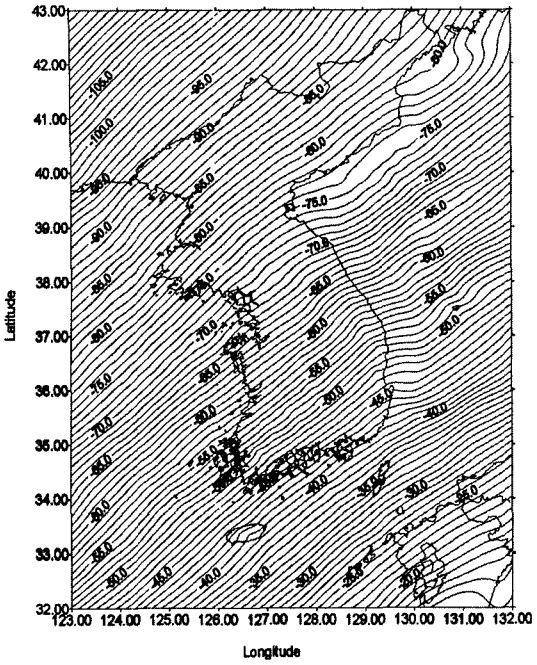

그림 9. Contour map of KOBGDM33 referred to Bessel ellipsoid (Contour interval=1.0 m)

협 부근에서는 69.0 m의 이격을 보여 한반도에서의 이격량은 약 40 m 편차의 분포를 보이고 있으며, 베셀타원체의 기준원점에서 멀어질수록 이격량이 증가하는 모습을 보이고 있다.

4.4 KOBGDM33과 천문측지 지오이드와의 비교

본 연구에서 개발된 동경원점계의 베셀타원체를 기준으로 하는 KOBGDM33의 정밀도를 평가하고자 3.4에서 계산된 천문측지 지오이드와 비교하였다. 39점의 천문측량점에서 계산된 천문측지지오이드와 KOBGDM33과의 교차는 표 8과 같고 이를 분석한 결과는 표 9와 같다.

표 9에서 볼 수 있는 바와 같이 KOBGDM33과 천문측지 지오이드와의 교차는 최소 -2.468 m에서 최대 6.338 m의 분포를 보였으며, 교차의 평균값은 2.227 m, 표준편차는 2.447 m의 비교적 큰 값을 나타냈다. 이를 자세히 살펴보면 북위 37°선 이북지역에서 약 4~6 m의 큰 차이를 나타내고 있으며 북위 37°선 이남지역에서는 약 0~3 m의 분포를 보이고 있다. 이는 먼저 천문측량 성과의 질에 대한 심도있는 검증과 분석이 필요하다

표 8. Computation results of geoidal differences with astro-geodetic geoid

Latitude	Longitude	XAI	ETA	astro gd.	Differen.
37.32565	126.5927	11.687	-11.888	-61.80	5.7209
37.37513	126.2107	8.371	9.357	-63.67	5.7320
37.41295	127.4514	11.052	-3.346	-60.44	4.2842
37.34061	127.0552	5.971	2.284	-61.62	4.2967
32.29293	130.5320	-12.542	5.606	-48.95	2.7734
37.15034	126.3541	13.467	12.024	-61.45	6.0276
37.14450	126.0620	7.002	10.742	-62.60	6.3379
34.58254	128.1212	4.674	-4.105	-44.15	-2.4682
34.58032	126.4347	11.990	-7.761	-50.56	-0.3582
36.52584	128.3253	12.631	-9.274	-53.78	0.7889
36.34473	127.2517	10.230	-14.228	-55.85	2.9251
37.23487	127.3142	8.200	-12.985	-59.66	4.5272
35.43515	126.3827	9.424	-10.812	-54.27	2.0782
35.21328	126.3059	11.706	-12.321	-53.07	2.2117
35.13140	128.3648	12.576	-9.804	-43.71	0.6586
36.11316	126.5301	11.665	-12.152	-55.63	4.7372
35.58311	128.1955	11.459	-12.379	-49.32	-0.7219
36.22523	128.4309	11.664	-15.022	-50.25	1.7017
37.02442	127.1037	8.893	-13.852	-58.93	4.8157
37.26419	129.1104	17.188	-2.020	-54.78	0.7848
37.45557	128.5103	17.950	-3.331	-57.55	1.7780
36.21084	128.0646	10.339	-12.301	-52.29	1.5216
36.22081	129.2338	10.256	-2.900	-47.61	-0.2369
36.57011	129.2506	13.104	-0.452	-51.12	-1.2855

표 8. Continued

Latitude	Longitude	XAI	ETA	astro gd.	Differen.
36.45155	126.2960	11.345	-14.255	-59.43	4.2604
36.46402	126.5543	14.175	-13.339	-58.34	4.1593
35.56488	127.0718	10.590	-15.085	-53.62	0.5560
37.12475	127.0405	11.487	-14.071	-60.04	4.5275
36.06010	127.3344	12.804	-14.100	-52.86	3.5460
37.16232	127.0322	8.751	-13.754	-60.36	4.4846
35.16470	129.1509	7.396	4.034	-41.14	-0.0736
35.14441	126.5229	10.958	-15.497	-51.19	2.6644
35.35017	128.0941	12.915	-5.869	-47.74	-0.3699
35.55509	129.2613	13.552	-5.157	-44.62	-1.4491
37.02544	127.5435	11.850	-17.141	-56.76	5.2077
37.32111	128.1057	12.559	-12.316	-58.45	2.3737
34.38416	126.3159	12.473	-12.798	-50.13	-0.7814
35.17262	127.3153	7.274	-12.677	-48.74	1.2586
34.41044	127.1515	9.566	-10.320	-47.05	-2.1545

표 9. Difference analyses between KOBGDM33 and astro-geodetic geoid (unit : meter)

Figure	Minimum	Maximum	Mean	S.D.
Geoidal heights differences	-2.468	6.338	2.227	2.447

는 것을 의미하며 다른 한편으로는 베셀지오이드 산출의 기준면으로 사용된 OSU91A 모델이나 EGM96과 같은 지오포텐셜모델이 북한 내륙지방에서도 과연 그 절대정확도(최대 ±1.0 m)를 만족하고 있나를 검증해 볼 필요를 나타내고 있다고 하겠다.

5. 결 론

연구결과 한반도 일원의 연구대상지역에 대한 GRS80 타원체 기준의 지오이드모델인 KOGGDM33과 동경원점계의 베셀타원체 기준의 지오이드모델인 KOBGDM 33을 구축할 수 있었으며 이와 별도로 한반도 일원의 수치표고모델인 KODEM33을 구축할 수 있었다. 또한 이 세 모델을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정밀지오이드고 계산에 있어서 센티미터 수준의 정확도를 확보하기 위해서는 지형보정과 이에 의한 지오이드효과를 계산해 주어야 하며, GRS80 타원체를 기준으로 FFT방법에 의하여 계산한 한반도 일원에서의 지오이드고의 변화는 용암포의 17.2 m에서 영종도의 22.7 m, 대한해협의 30.0 m내외에 이르기까지 북서에서 남동으로 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. KOGGDM33의 정밀도는 GPS/Leveling지오이드와 비교하였을 때 표준편차 0.459 m로 나타났다.

2. 한반도 일원에서의 베셀지오이드고의 분포는 용암포에서 -91.8 m, 영종도에서 -68.7 m, 대한해협에서 -39.0 m 내외의 분포를 보이며 북서에서 남동방향으로 증가하고 있어 전체적인 지오이드면의 변화양상은 GRS80 타원체에서의 변화와 비슷한 경향을 보이고 있다. KOBGDM33의 정밀도는 천문측지 지오이드와 비교하였을 때 2.447 m의 큰 표준편차값을 보였으며 이는 천문측량 성과의 질 및 기준 지오포텐셜 모델에 대한 검증이 필요하다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

3. 지오이드고의 차이를 통해 살펴본 두 타원체의 이격은 신의주 부근 용암포에서 109.0 m, 영종도에서는 91.4 m, 대한해협 부근에서는 69.0 m의 차이를 보여 한반도에서의 이격량은 약 40 m의 편차를 보이고 있으며 베셀타원체의 기준원점에서 멀어질수록 이격량이 증가하는 모습을 보이고 있다.

4. 좌표변환을 위해 구축한 한반도 수치표고모델인 KODEM33을 해석하여 한반도 일원에서의 표고값은 최소 -38.50 m에서부터 최대 2,429.71 m의 분포를 보이고 있으며, 평균표고는 180.33 m임을 추가로 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제

연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이석배, "FFT에 의한 한반도 일원에서의 정밀지오이드 결정", 성균관대학교 대학원 박사학위 논문, 1996.
2. 이석배, 최재화, "지형보정효과를 고려한 한반도 일원에서의 정밀 중력지오이드", 대한토목학회 논문집, 제17권 제III-6호, 1996. 11., 619-628.
3. 이석배, 윤홍식, 최재화, "FFT에 의한 한반도 일원에서의 중력지오이드 결정", 한국측지학회지, 제14권 제1호, 1996, 49-58.
4. 이석배, 윤홍식, 최재화, "지형보정효과가 지오이드에 미치는 영향에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집 제3권, 1996, 117-120.
5. 조규전, 이영진, "우리나라의 천문측지 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권, 제2호, 1991, 1-8.
6. 이영진, "한국측지좌표계와 지구중심좌표계의 재정립에 관한 연구(I),(II)" 1996-7, 국립지리원
7. Marsh J.G. et al., "The GEM-T2 gravitational model", NASA Technical Memorandum 100746, NASA/GSFC, 1989.
8. Rapp R.H. and N.K. Pavlis, "The Development and Analysis of Geopotential Coffecient Models to Spherical Harmonic Degree 360", J. Geophys.res., 95(1990), B13 (21885-21911).
9. Lemoine F.G., E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, R.H. Rapp, et. al., "The Development of the NASA GSFC and DMA Joint Geopotential Model, Inernational Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar 96)", September 30-October 5, 1996, 146.
10. Tziavos I.N., "Numerical Considerations of FFT Methods in Gravity Field Modelling", Hannover Univ. Nr. 188(ISSN 0174-1454), 1993.
11. Sideris M.G., "FFT geoid computation in Canada", Bulletin Information N.77, IGES Bulletin N.4, IAG, 37-52.
12. Sideris M.G., "Geoid Determination by FFT Techniques", International School for the Determination and Use of the Geoid, Milan, October 10-15, 1994.
13. Yecai Li, "User's Guide TOPOGEOP", Department of Geomatics Engineering the University of Calgary, July, 1993
14. Sideris M.G. and Yecai Li, "Improved Geoid Determination for Levelling by GPS", Sixth Int. Geodetic Symposium on Satallite Positioning, Columbus, OH, March 17-20, 1992.
15. Milbert D.G., "Improvement of a high resolution geoid height model in the United States by GPS height on NAVD 88 benchmarks", Bulletin Information N.77, IGES Bulletin N.4, IAG, 13-36.
16. Yun Hong-Sic, Choi, Yun-Soo, Lee Suk-Bae, "Precise Geoid Determination in Korean Peninsula", Inernational Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996 (GraGeoMar96), Tokyo, September 30-October 5, 1996, 182.