

OSU89B 에 의한 한반도 일원의 지오이드에 대한 연구

A Study on the Geoid in and around the Korean Peninsula by analysing OSU89B

최 광 선*

Choi Kwang-Sun

요 약

OSU89B 를 이용하여 한반도 일원의 지오이드와 수직선편차에 대하여 연구 하였다. 한반도 일원에서 지오이드는 GRS1980 지구타원체에 비해 +3m~+35m 범위의 변화를 나타내며, 전반적으로 서에서 동으로 높아져 감이 특징적이다.

수직선편차는 ξ 가 $-8.9''\sim 8.0''$, η 가 $-13.1''\sim 9.0''$ 의 범위의 변화를 보이며 전반적으로 서편경향이 특징적이다.

ABSTRACT

OSU89B is analysed for study about the geoidal undulation and the vertical deflection in and around the Korean Peninsula.

Geoidal undulations vary from 3m to 35m in this area referred to GRS1980 ellipsoid.

ξ values vary from $-8.9''$ to $8.0''$ and η values vary from $-13.1''$ to $9.0''$. High westward deflection is a distinctive feature in and around the Korean peninsula.

I. 서 론

지구 표면상의 임의의 점의 위치를 정밀하게 기술하기 위해서는 정확한 지구의 형상과 크기를 알아야 한다.

각종 측지학적 작업의 기준이 되는 지구의 형상은 지오이드(geoid)이며, 이는 중력 방향에 직각인 일종의 등중력포텐셜면(equi-gravity potential surface)으로, 물리적인 지구의 형상을 나타내고 있다.

지오이드와 가장 유사한 기하학적인 지구의 형상을 지구타원체(Earth ellipsoid)라 하며, 측지학에서는 각 지역의 지오이드면에 가장 적절한 지구타원체를 설정하여 그 지역의 측지 기준면인 준지구타원체로 이용하고 있다.

지형의 기복과 지구내부 물질의 밀도 및 구조

* 부산대학교 사범대학 지구과학과 교수

의 불균일 때문에 지오이드면의 기복이 야기되며, 이에 의해 지오이드면과 지구타원체면의 높이 차이인 지오이드높이(geoidal height)와 지구타원체면의 수직선과 지오이드면의 수직선의 사이각인 수직선편차(vertical deflection)가 나타난다.^{1),2)}

지오이드의 높이와 수직선편차에 대한 연구는 Stokes(1849)와 Vening Meinez(1928)에 의해 지표면의 중력자료를 이용하여 구좌표계에서 지오이드높이와 수직선편차를 계산할 수 있는 이론이 개발된 이래 주로 중력자료의 분석에 의하여 행하여지고 있다.^{1),3),4)}

그러나 Stokes 방정식과 Vening Meinez 방정식에 사용되는 Stokes 함수의 수렴 속도가 늦기 때문에 일부 지역의 지오이드와 수직선편차의 연구에도 지구 전체의 중력자료를 이용해야 되는 문제점과 계산상의 어려운 점이 있다. 따라서 측지학과 관련된 세계의 유수 기관에서는 19

00년대 초부터 지속적으로 각종 중력자료를 수집하여 왔으며, 작금에는 이를 이용한 연구 및 새로운 이론 개발이 매우 활발히 진행되고 있다. 1), 2), 3), 4), 5), 6), 7)

우리 나라에서는 Kim(1979)⁸⁾, 최광선(1986)⁹⁾, 권병두·김현수(1987)¹⁰⁾, 문홍근(1987)¹¹⁾ 및 정애영(1989)¹²⁾ 등이 중력 자료를 이용하여 우리나라 일부 지역의 지오이드높이나 수직선편차에 대하여 연구하였으나, 이들의 연구는 연구 지역 주위에 제한된 중력자료만을 이용한 일종의 상대 지오이드높이와 상대 수직력편차에 대한 연구이다.

한편 미국 OSU(Ohio State Univ.)의 Dept. of Geotectic Science and Surveying에서는 1970년대부터 전세계의 육상측정중력자료, 선상측정중력자료, 인공위성자료 해석에 의한 중력자료 및 지구물리학적 해석에 의한 중력자료 등을 입수하여 구조화분석(spherical harmonic analysis)을 한 뒤, 다른 global geopotential model 및 지형 자료들과 비교, 조정하여 최적화시킨 구조화계수(harmonic coefficients)들로 이루어진 중력자료를 발표하고 있으며 새로운 중력자료가 입수될마다 이를 갱신하고 있다. 13), 14), 15)

OSU89B는 상기 중력자료에 의해 계산된 지구 전체의 30'×30' 지역의 평균 고도 이상(free air anomaly) 자료를 구조화분석하여 구한 360 degree 까지의 총 65339 개의 cosine 과 sine 의 구조화 계수이다.

본 연구에서는 OSU89B 자료를 이용하여 한반도 일원의 지오이드 및 수직선편차를 계산하였으며 이들과 중력이상 및 지형과의 관계를 비교 분석하였다.

II. 이론적 배경

지구의 중력장에 의해 지구 주위에는 무수히 많은 등중력포텐셜면이 야기되며, 이 중에서 지구의 형상에 가장 적합한 등중력포텐셜면을 지오이드라 정의하고, GRS1980(Geodetic Reference System 1980)¹⁶⁾에서는 지오이드의 포텐셜

W_0 의 값을

$$W_0 = (6,236,686 \pm 2) \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad \dots\dots(1)$$

으로 정의하고 있다.

그러나 지역에 따라 실제 지오이드면상의 포텐셜 W 와 W_0 사이에는 미소한 포텐셜 차이 δW

$$W_0 = W + \delta W \quad \dots\dots(2)$$

가 나타난다.

지오이드의 기록에 의해 지구타원체면상의 포텐셜(normal gravity potential) U 와 지오이드면상의 중력포텐셜 W 사이에 포텐셜이상(anomalous potential) T 가 나타나며(Fig. 1),

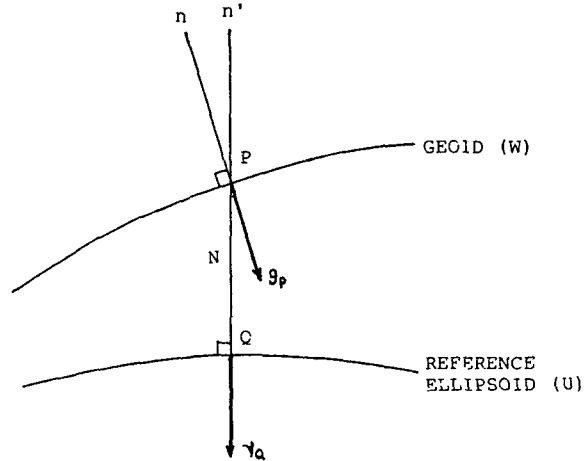


Fig 1. Geoid and reference ellipsoid

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z) \quad \dots\dots(3)$$

이에 의한 지구타원체와 지오이드의 높이차이 N 을 지오이드높이라 한다.

따라서 T 와 N 사이의 관계는 다음과 같으며

$$T = \gamma N \quad \dots\dots(4)$$

γ : 정규 중력

지오이드높이 N 은 다음과 같이 포텐셜이상 T 로 표현된다.

$$N = \frac{T}{\gamma} \quad \dots\dots(5)$$

이것이 지오이드높이 N 과 포텐셜이상 T 의 관계를 나타내는 Bruns 식이다.^{1), 5)} 또한 중력 이상 Δg 를 포텐셜 이상 T 로 표현하면 다음과 같다.^{1), 6)}

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r}T \quad \dots\dots(6)$$

한편 수직선 편차 ϵ 는 미소거리 dS 와 미소지오이드높이 dN 을 고려하면 (Fig. 2) 다음과 같으며,

$$\epsilon = -\frac{dN}{dS} \quad \dots\dots(7)$$

통상 남북방향성분 ξ 와 동서방향성분 η 로 나누어서 나타내고 있다.

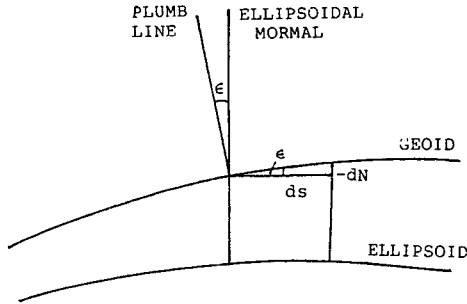


Fig 2. The relation between the geoidal undulation and the deflection of the vertical

이들을 포텐셜이상 T 로 나타내면 ξ 와 η 는 각각 다음과 같이 표현된다. ^{1), 6)}

$$\xi = -\frac{dN}{dS_\phi} = -\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad \dots\dots(8)$$

$$\eta = -\frac{dN}{dS_\lambda} = -\frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \lambda}$$

한편 지구의 중력 포텐셜 W 를 구조화급수 (spherical harmonic series)로 표현하면 ^{1), 4), 5),}

⁶⁾ 다음과 같으며,

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \right] \quad \dots\dots(9)$$

r, θ, λ : 계산할 지점의 극 중심 좌표

GM : 지심 인력 상수

a : scaling parameter, 지구 적도 반경 이용

C, S : fully normalized potential coefficients

P_n^m : fully normalized associated Legendre functions.

식 (9)의 우변의 첫째항은 정규중력포텐셜 U 와 같으므로,

$$U = \frac{GM}{r} \quad \dots\dots(10)$$

식 (9)에서 이 항을 제거하면 식 (3)에 의해 다음과 같이 포텐셜이상 T 를 나타내는 식이 된다. ^{1), 6), 14)}

$$T(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \right] \quad \dots\dots(11)$$

따라서 식 (5)와 식 (6), (8)에서 지오이드높이 N 과 중력이상 Δg 및 수직선편차 ξ 와 η 는 각각 다음과 같이 구조화급수로 표현되며,

$$N = \frac{GM}{\gamma r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \right] \quad \dots\dots(12)$$

$$\Delta g = -\frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \right] \quad \dots\dots(13)$$

$$\xi = \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \right] \quad \dots\dots(14)$$

$$\eta = \frac{1}{r \cos \phi} \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n m (-C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m \right]$$

이들을 이용하여 OSU89B의 중력포텐셜계수 C 와 S 에서 지오이드높이 N 과 중력이상 Δg 및 수직선편차 ξ 와 η 를 구할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 OSU89B를 이용하여 타원보정을 한 후, ^{6), 7), 8)} 위도 31°N에서 45°N까지, 경도 120°E에서 135°E까지 범위의 한반도 일원의 지역에서 경도 및 위도 간격 각각 15' 간격으로 지오이드높이와 중력이상 및 수직선편차를 계산하였다.

본 계산시 필요한 fully normalized associated Legendre function과 그 미분치의 계산은 Colombo(1981)¹⁹⁾의 subroutine LEGFDN을 이용하였다.

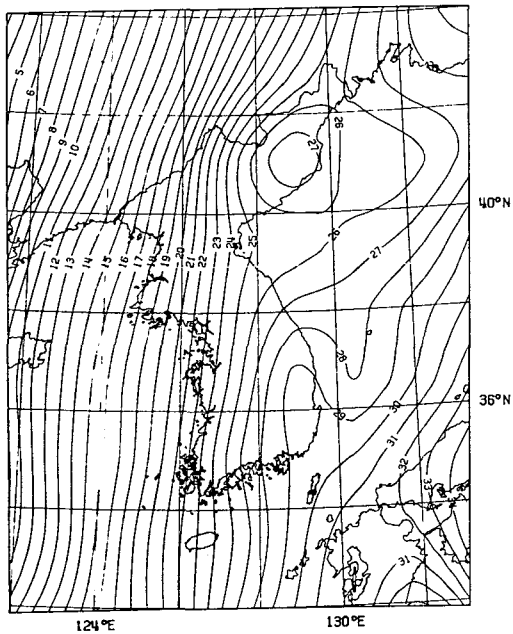


Fig 3. Geoidal undulations in and around the Korean peninsula from OSU89B referred GRS 1980 ellipsoid. Contour interval=1 meter.

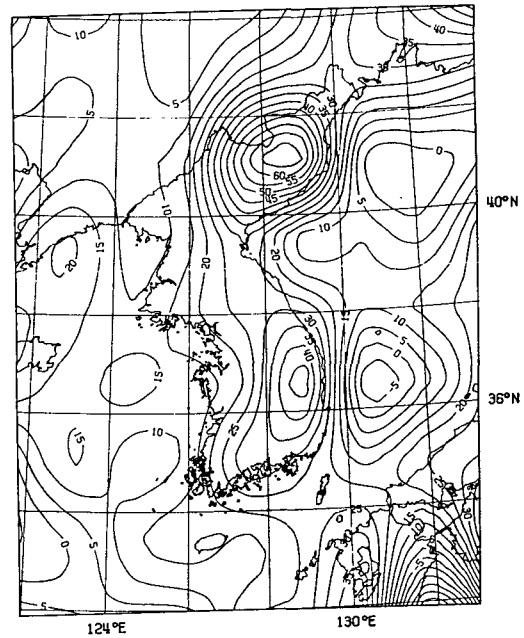


Fig 5. Variations of the free air anomaly in and around the Korean peninsula from OSU89B. Contour interval=5mgals.

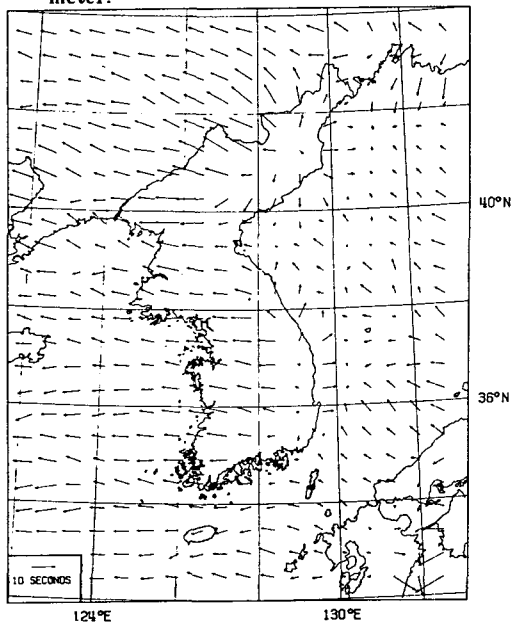


Fig 4. Variations of the vertical deflection in and around the Korean peninsula from OSU89B.

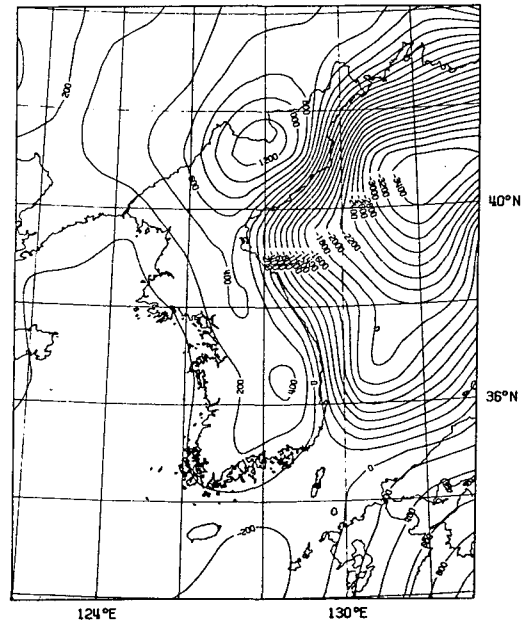


Fig 6. 30'x30' running average topographic map in and around the Korean peninsula. Contour interval=200 meters.

Fig. 3이 본 연구에 의해 GRS1980 지구타원체와 비교한 1m 간격의 지오이드높이이며, Fig. 8는 수직선편차 ξ 와 η 를 합성한 것으로 화살표의 길이가 수직선편차의 크기를 나타내며, 편차의 방향은 화살표 방향이다. Fig. 5는 OSU 89B에 의해 역계산한 5 mgal 간격의 고도 이상도이며, Fig. 6은 일본 동경대학 해양연구소에서 입수한 5'×5' 간격의 지형자료를 이용하여 계산한 30'×30' 지역의 이동평균 지형도로써 등고선 간격은 200m이다.

Fig. 5의 고도이상도와 Fig. 6의 지형도를 비교하여보면 매우 잘 대비되고 있으며, 이는 Bouguer 효과 때문에 지형의 기록에 민감한 특성을 갖는 고도이상의 특징으로, 이로써 OSU 89B의 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

우리나라 지역에서의 수직선편차의 변화는 남북성분인 ξ 값이 $-8.9''\sim 8.0''$ 의 범위이며, 동서성분인 η 값이 $-13.1''\sim 9.0''$ 범위이다.

Fig. 4의 수직선편차에 의하면 전반적으로서 편 경향이 강하며, 수직선편차와 지오이드가 미분관계인 식(7)을 고려할 때 우리나라 일원에서의 지오이드가 남북 방향을 축으로 서에서 동으로 증가됨을 유추할 수 있다. 이와 Fig. 6의 지형도와 비교하여 보면 저지 지역에서의 편차의 수렴과 고지 지역에서의 편차의 발산이 잘 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이로써 수직선편차가 지형의 영향에 민감함을 알 수 있다.

Fig. 3의 우리나라 일원의 지오이드의 변화도에 의하면 전반적으로 남북을 축으로 서에서 동으로 증가하고 있으며, 그 높이는 GRS1980 지구타원체에 비해 최저 3m에서 최고 35m의 범위에서 변화하고 있다. 남한내륙에서는 서해안의 22m에서 동해안의 29m까지 7m 정도의 변화폭이 나타나며, 함경북도 일원 및 동해 일부 지역에서의 교란은 Fig. 5의 고도이상도와 Fig. 6의 지형도를 고려하여볼 때 이 지역의 지형에 의한 영향임을 알 수 있다.

OSU89B 자료가 30'×30' 평균 중력자료를 이용하였음을 고려하여 볼 때 이상의 결과들은 우리나라 일원의 거시적인 변화를 나타냄을 알 수 있으며, Rapp(1986)¹⁴⁾에 의하면 지오이드의 경

우 수십 cm의 오차가 있다.

한편 최광선⁹⁾에 의하면 우리나라 육상지역에서 2200여 점의 중력 측정이 이루어졌으나 측정 밀도가 작으며(50km²/점), 대부분 저지대인 도로망을 따라 측정된 것으로 우리나라의 지형적 특성을 나타내기에는 미흡한 편이다. 따라서 좀더 정밀한 지오이드의 변화를 연구하기 위해서는 우리나라 및 주변 지역에서 좀 더 많은 중력 측정이 이루어져야 할 것이며, 특히 중력 자료가 전무한 서해 및 북한 지역의 중력자료가 선결되어야 할 것이다.

IV. 결 론

1. OSU89B 해석에 의한 우리나라 일원에서의 지오이드, 수직선편차 및 고도이상과 지형 자료가 서로 잘 대비되고 있으며, 이로써 이 자료가 우리나라 일원의 거시적인 중력의 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.
2. 우리나라 일원에서의 지오이드는 전반적으로 남북을 축으로 서에서 동으로의 증가 추세이며, 높이의 변화는 GRS1980 지구타원체에 비해 최저 3m에서 최고 35m의 범위이다.
3. 우리나라 일원에서 수직선 편차의 변화는 ξ 가 $-8.9''\sim 8.0''$, η 는 $-13.1''\sim 9.0''$ 의 범위이며 전반적으로서 편 경향이 강하다.
4. 우리나라 일원에서 좀 더 정밀한 측지학적 연구를 위하여 더 많은 중력 측정이 이루어져야 한다.

감사의 말

본 연구는 1988년도 대학교수 국비 해외파유 연구계획에 의한 문교부의 지원에 의해 수행된 것으로, 연구비 지원에 감사한다.

참고문헌

1. Heiskanen, W. A. and Moritz, H., 1987, Physical Geodesy, W. H. Freeman and Co.
2. 萩原幸男, 1978, 地球重力論, 共立出版.
3. Heiskanen, W. A. and Vening Meinesz, F. A., 1958, The Earth and Its Gravity Field, McG-

- row-Hill Book Co.
4. Dragomir, V.C., Ghitau, D.N., Mihailescu, M.S. and Rotaru, M.G., 1982, Theory of the Earth's Shape, Elsevier S.P.Co.
 5. Molodenskii, M.S., Eremeev, V.F. and Yurkina, M.I., 1962, Methods for Study of the External Gravitational Field and Figure of the Earth, Israel Program for Scientific Translations Ltd.
 6. Moritz, H., 1980, Advanced Physical Geodesy, Abacus Press.
 7. Vanicek, P and Krakiwsky, E.J., 1982, Geodesy: The Concepts, North-Holland Pub. Co.
 8. Kim, S.K., 1979, Geodetic and Geophysical Analyses of Gravity Data in Korea, Jour. Korean Inst. Mining Geol., Vol.12, pp.17-28.
 9. 최광선, 1986, 한반도 남부의 중력에 대한 연구, 서울대학교 대학원 박사 학위 논문.
 10. 권병두, 김현수 1987, 한반도 남부 지역의 수직선편차와 지오이드 높이, 한국지구과학회지, 제 8 권 1 호, pp.43-51.
 11. 문홍근, 1987, 제주도 지역의 수직선편차와 지오이드, 부산대학교 교육대학원 석사학위 논문
 12. 정애영, 1989, 원통좌표계를 이용한 한반도 남부의 상대지오이드, 부산대학교 교육대학원 석사학위 논문
 13. Rapp, R.H., 1980, The Earth's Gravity Field to Degree and Order 180 Using Seasat Altimeter Data, Terrestrial Gravity Data, and Other Data, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, OSU, Report NO. 322.
 14. Rapp, R.H., 1986, Global Geopotential Solutions, Lecture Notes in Earth Sciences No. 7, Springer-Verlag, pp.365-415.
 15. Kim, J.H. and Rapp, R.H., 1990, Major Data Sets and Files in the Area of Gravimetric and Altimeter Research, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, OSU.
 16. 國立天文臺, 1991, 理科年表, 丸善株式會社
 17. Rapp, R.H., 1981, Ellipsoidal Corrections for Geoid Undulation Computations, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, OSU, Report No.308.
 18. Cruz, J.Y., 1986, Ellipsoidal Corrections to Potential Coefficients Obtained from Gravity Anomaly Data on the Ellipsoid, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, OSU, Report No.371.
 19. Colombo, O.L., 1981, Numerical Methods for Harmonic Analysis on the Sphere, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, OSU, Report No. 310.