

GRACE 자료를 이용한 동아시아의 중력특성

유상훈* · 민경덕

연세대학교 지구시스템과학과

Gravity Characteristics on the Eastern Asia by using GRACE Data

Sang Hoon Yu* and Kyung Duck Min

Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Geoid undulation and gravity anomaly were calculated from GRACE satellite data on the eastern Asia including Korean peninsula. Geoid undulation varies from -60m in the China to 60m toward the Pacific Ocean across the Korean Peninsula. Calculated gravity anomalies are in the range of -60 and 60 mgal except the subduction zone showing -100 mgal. High positive values are observed at Mt. Baekdu, Kaema highland and Taebaek mountains, and low values at Ulleung, Japan and Yamato basins in the East sea. We removed regional components below the spherical harmonic degree of 10 from gravity anomaly to get the residual anomaly for crust components. Residual gravity anomaly shows high anomalies at the northern mountainous area and Kyungsang basin in the Korean Peninsula. And low anomalies appears at the western Korea bay basin, Kunsan basin, Cheju basin, and Ulleung basin in the marine. Anomalies separated by the spherical harmonic degree as well as the residual anomalies are useful for the study of large crustal structure about geologic scale and depth distribution and for the survey of natural resources.

Key words : geoid undulation, gravity anomaly, GRACE, residual anomaly

GRACE 위성자료를 이용하여 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 지오이드와 중력 이상을 계산하였다. 지오이드의 기복은 중국 내륙에서 한반도를 거쳐 태평양쪽으로 갈수록 음에서 양으로 -60 m에서 60 m로의 변화가 나타난다. 중력 이상은 섭입대에서의 특징적인 -100 mgal 이하의 저이상대를 제외하면 전체적으로 -60~60 mgal의 분포를 보이며, 북한 지역의 백두산과 개마고원, 남한지역의 태백산맥에서 고이상이, 동해의 울릉분지, 일본분지, 야마토 분지에서 저이상이 관찰된다. 지각 성분만을 고려하기 위한 방법으로 구면조화분석시 degree 10이하의 광역성분을 제거하여 잔여이상을 계산하였다. 계산된 잔여이상에서 한반도 육상 북부 산간 지역과 경상분지 일대에서 고이상이 보이고, 한반도 주변 해상지역의 서한만 분지와 남한 군산분지, 제주분지, 울릉분지 등지에서 저이상대가 관찰된다. 육상지역과 해상지역에서 계산된 잔여이상과 degree별 분리된 이상대의 분포는 지하 지질 규모 및 심도별 분포와 관련하여 대규모 지구구조를 규명하거나, 나아가 지하자원 탐사에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : GRACE, 지오이드, 중력 이상, 잔여이상

1. 연구 배경

뉴턴의 만유인력으로부터 유도되는 지구의 중력장에 관한 연구는 오래 전부터 이루어져 왔다. 지구는 완전한 구형체도 아니고, 스스로 자전을 하며, 내부의 밀도 분포가 균일하지 않기 때문에 지구의 중력은 지역에 따라 차이가 나며, 이 차이를 측정함으로써 다양한 지

구 정보를 파악할 수 있다. 1970년대 이후 인공위성 기술의 발달로 자료 분포의 연속성과 균질성이 뛰어나고 광역적인 지구정보 획득이 가능하게 되었으며, 이로부터 최근 들어 정밀도가 크게 향상된 지오이드와 중력 이상을 구할 수 있게 되었다.

인공위성을 이용한 지구 관측은 여러 가지 이유로 인해 매우 중요한 자료로 인식되고 있다. 우선 일반적

*Corresponding author: ysh@yonsei.ac.kr

인 원격탐사의 장점과 마찬가지로 물리적 또는 정치적으로 접근이 어려운 지역의 탐사라든지, 주기적이고 장기적인 관측이 필요한 경우에 매우 유용하다. 더구나 인공위성에 의한 관측은 다른 저고도 관측에 비해 동일한 조건하에서 이루어지므로 서로 다른 저고도 탐사 결과를 통합할 때 나타나는 오차가 없음을 물론, 이를 제거하는데 매우 유용하게 사용된다.

GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)는 세계 최첨단 지구 관측위성으로 지구 중력장과 자기장 자료 등 현대 지구과학 연구에 필요한 초정밀 자료를 지상으로 보내주고 있으며, 이 자료의 분석을 통하여 과학자들의 가장 큰 관심사 중의 하나인 지구 내핵 및 외핵의 움직임, 지구 자극의 변화와 그로 인해 발생할 수 있는 지구 환경 변화 등의 분석과 예측, 그리고 광역의 지하구조 모델링을 가능하게 하고 있다.

본 연구에서는 GRACE로부터 획득된 고정밀의 중력자료를 이용하여 한반도를 포함하는 인근 아시아 지역에서의 지구물리학적 연구를 수행함으로써, 국토분단의 현실로 인해 그동안 이루어지지 못했던 북한지역을 포함한 한반도 전체의 지체구조 및 심부 지하지질구조에서 기인하는 중력이상의 특성을 파악하고, 최근 공개된 전지구적 지형모델 2'×2' global topography (Smith와 Sandwell, 1997)를 이용하여 Free-air 중력 이상과 지형과의 관계를 살펴보았다.

2. 연구 자료

전지구적인 중력자료와 시간에 따른 중력의 변화를 획득하기 위한 목적으로 개발된 GRACE는 2002년 3월 17일에 발사되어 inclination 89°로 최초에는 500 km로, 2003년 중반에는 485 km의 궤도를 돌고 있다. GRACE는 쌍둥이 위성으로 두 위성의 궤도정보로부터 지구중력의 long-wavelength part를 측정하고, 진행하는 두 위성간 거리의 변화를 관측하여 중력의 medium 및 short-wavelength를 측정한다. 위성간 220 km의 거리를 두고 운행하며, 사다리꼴모양의 각각의 위성에는 자세 제어를 위한 2대의 STAR 카메라와 GPS 수신기가 장착되어 있다. 본 연구에 사용된 GGM01C 모델은 2002년 4월부터 11월까지 111일간에 걸쳐 GRACE로부터 수집되어 생성된 GGM01S의 업그레이드 모델로서, 여기에는 기존의 다른 위성의 궤도정보자료, 육상 중력자료, 고도위성의 해수면 고도자료들이 병합되어있다. 본 연구에서는 연구지역의 중력이상과 지형과의 관계를 살펴보기 위하여 Geosat GM(Geodetic Mission),

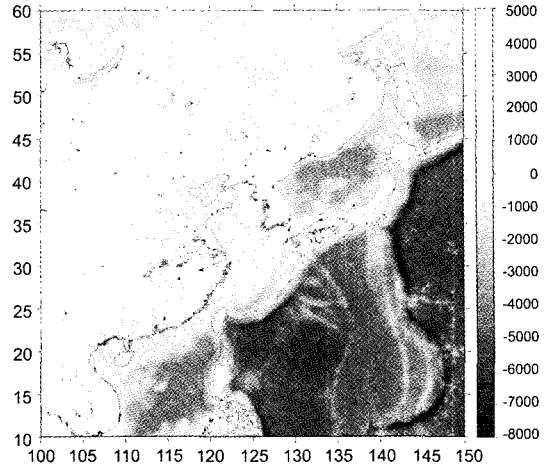


Fig. 1. Topographic map of the study area (From Smith and Sandwell, 1997).

Geosat ERM(Exact Repeat Mission), ERS1 등 인공위성 레이더 고도계 자료와 depth sounding 자료가 병합되어 유도된 2'×2' global topography data를 사용하였다(Smith와 Sandwell, 1997; Fig. 1).

3. 연구 방법

GGM01C 모델은 global geopotential 모델로서, 구면조화분석(spherical harmonic analysis)에서 degree와 order의 최대치수가 200까지 계산된 것으로 지표면에서의 공간 해상도는 약 100 km로, 20297개의 cosine함수와 sine함수의 계수로 되어 있다. 지표면에서의 임의의 한 점 $P(\gamma, \phi, \lambda)$ 에서 Earth's gravitational potential U 는 spherical harmonic expansion에서 degree와 order의 합으로 표현이 가능하다 (Heiskanen & Moritz, 1967).

$$U(r, \phi, \lambda) = \frac{GM}{R} \left[\frac{R}{r} \bar{C}_{00} + \sum_{l=1}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \bar{P}_{lm}(\sin\phi) (\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \tag{1}$$

- r, ϕ, λ - spherical geocentric coordinates로서 계산점의 반경, 여위도 및 경도
- R - 평균 지구반경
- GM - 중력상수와 지구질량의 곱
- l, m - spherical harmonic의 degree, order
- \bar{P}_{lm} - fully normalized Legendre functions
- $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ - Stoke's coefficients (fully normalized)
- \bar{C}_{00} 는 1에 가까우며, 좌표의 중심이 지구중심과 일

치한다면 degree가 1인 spherical harmonic coefficients $\bar{C}_{10}, \bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}$ 은 지구중심좌표계와 관련이 있으며 그 값은 0이고, $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$ 은 지구자전축과 관련이 있다. disturbing potential $T(r, \phi, \lambda)$ 는 gravitational potential $U(R, \phi, \lambda)$ 와 ellipsoidal ‘normal’ potential $V(r, \phi)$ 의 차로 구할 수 있다. 즉, 지표면($r=R$)에서 disturbing potential은

$$T(R, \phi, \lambda) = U(R, \phi, \lambda) - V(R, \phi) \quad (2)$$

$$T(R, \phi, \lambda) = \frac{GM}{R} \left[\bar{C}'_{00} + \sum_{l=1}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin\phi) (\bar{C}'_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (3)$$

이며, 여기서 $\bar{C}' = \bar{C} - \bar{C}^{ell}$ 이며 T 는 지오이드 기준이다. 또한 \bar{C}'_{00} 는 0에 가깝다.

지오이드 기복 N 은 등포텐셜면 $U(R, \phi, \lambda) = const.$ 으로, 일반적으로 평균해수면과 회전타원체 사이의 거리로 정의된다. Bruns 공식에 의해 지오이드는

$$N = \frac{T}{\gamma} \quad (4)$$

γ - 지구타원체면상에서의 정규중력(‘normal’ gravity)이다. 이로부터

$$N(R, \phi, \lambda) = \frac{R^2}{GM} \cdot T(R, \phi, \lambda) \quad (5)$$

$$N(R, \phi, \lambda) = R \left[\bar{C}'_{00} + \sum_{l=1}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin\phi) (\bar{C}'_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (6)$$

로 정의된다. Gravity disturbance δg 는 disturbing potential의 음의 수직미분 즉, $\delta g = -\frac{\partial T}{\partial r}$ 로 정의되며, 이는 P 점에서의 gravity와 ‘normal’ gravity의 차이이다. $r=P$ 이고 지오이드면에서의 gravity disturbance는

$$\delta g(R, \phi, \lambda) = \frac{GM}{R^2} \left[\bar{C}'_{00} + \sum_{l=1}^{l_{max}} (l+1) \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin\phi) (\bar{C}'_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (7)$$

이다. 지오이드면에서의 P 점에서의 gravity와 이에 대응하는 지구타원체에서의 Q 점에서의 ‘normal’ gravity의 차를 gravity anomaly Δg 라 부르며,

$$\Delta g = \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r} T \quad (8)$$

지오이드에서

$$\Delta g(R, \phi, \lambda) = \frac{GM}{R^2} \left[-\bar{C}'_{00} + \sum_{l=2}^{l_{max}} (l-1) \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin\phi) (\bar{C}'_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (9)$$

그러므로

$$\Delta g = \delta g - \frac{2}{R} T \quad (10)$$

로 표현된다.

4. 연구 결과

한반도와 인근지역의 지질학적, 지구물리학적 연구를 수행하기 위하여 100°~150°E, 10°~60°N의 광역적인 연구지역을 설정하고, GGM01C 모델에서 구면조화분석을 통한 지오이드와 중력이상을 계산하고, 신호

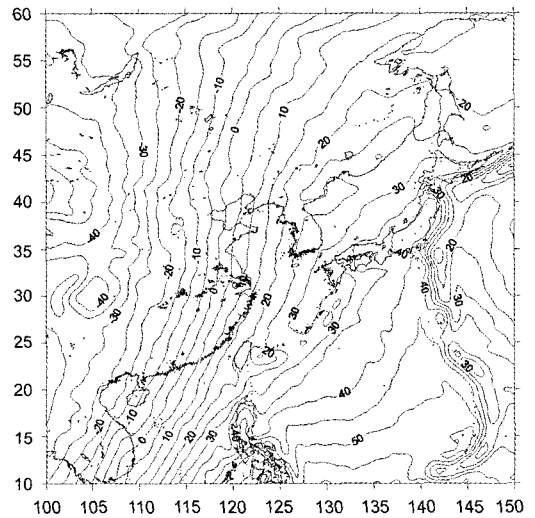


Fig. 2. Geoid undulations calculated from GGM01C model up to degree and order of 200, referred to WGS84. Contour interval is 5 meters.

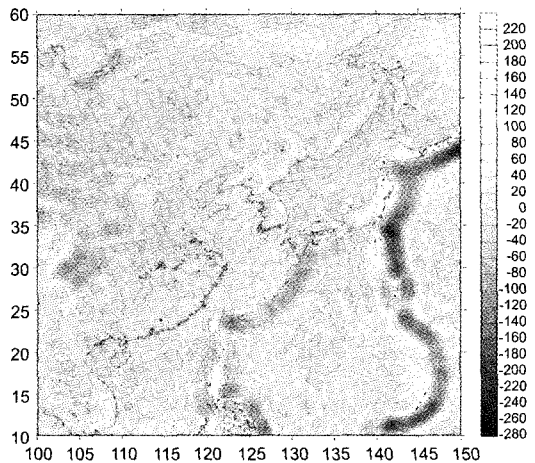


Fig. 3. Calculated gravity anomalies from GGM01C model up to degree and order of 200, referred to WGS84. Contour interval is 20 mgals.

의 주파수대역을 달리하여 중력이상을 추출, 스펙트럼과 공간해상도와와의 관계를 고찰 하였으며, 최종적으로 지구의 심부 즉, 맨틀과 핵으로부터 기인한다고 판단되는 장파장성분의 중력효과를 제거하여 지각 성분의 잔여이상을 계산하였다.

GGM01C 모델에서 WGS84 지구타원체 기준으로 산출된 지오이드의 기복은 중국 내륙에서 한반도를 거쳐 태평양쪽으로 갈수록 -60 m에서 60 m으로 변화가 나타나며, 유라시아판과 태평양판, 필리핀판이 만나는 섭입대를 따라 복잡한 지오이드의 변화가 관찰된다. 한반도를 포함한 인근 주변지역의 경우, 10~30 m의 분포를 보이며, 북서방향에서 남동방향으로 서서히 증가

하는 경향을 보인다(Fig. 2).

GGM01C 모델의 조화함수로부터 최대 degree인 200까지 경위도 0.5° 간격으로 WGS84 지구타원체 기준으로 중력이상을 구하였다. 전체적으로 중력이상은 -60~60 mgal의 분포를 보이고 있으나, 부분적으로 판과 판이 만나는 섭입대에서 -100 mgal 이하의 저이상을 특징적으로 보여준다. 연구지역내 한반도의 경우 북한지역의 백두산과 개마고원, 남한지역의 태백산맥에서 고이상을 보이며, 동해의 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토분지에서 저이상이 관찰된다(Fig. 3). 전체적으로 중력이상은 연구지역의 지형의 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. 하지만 이러한 중력이상에는 지각

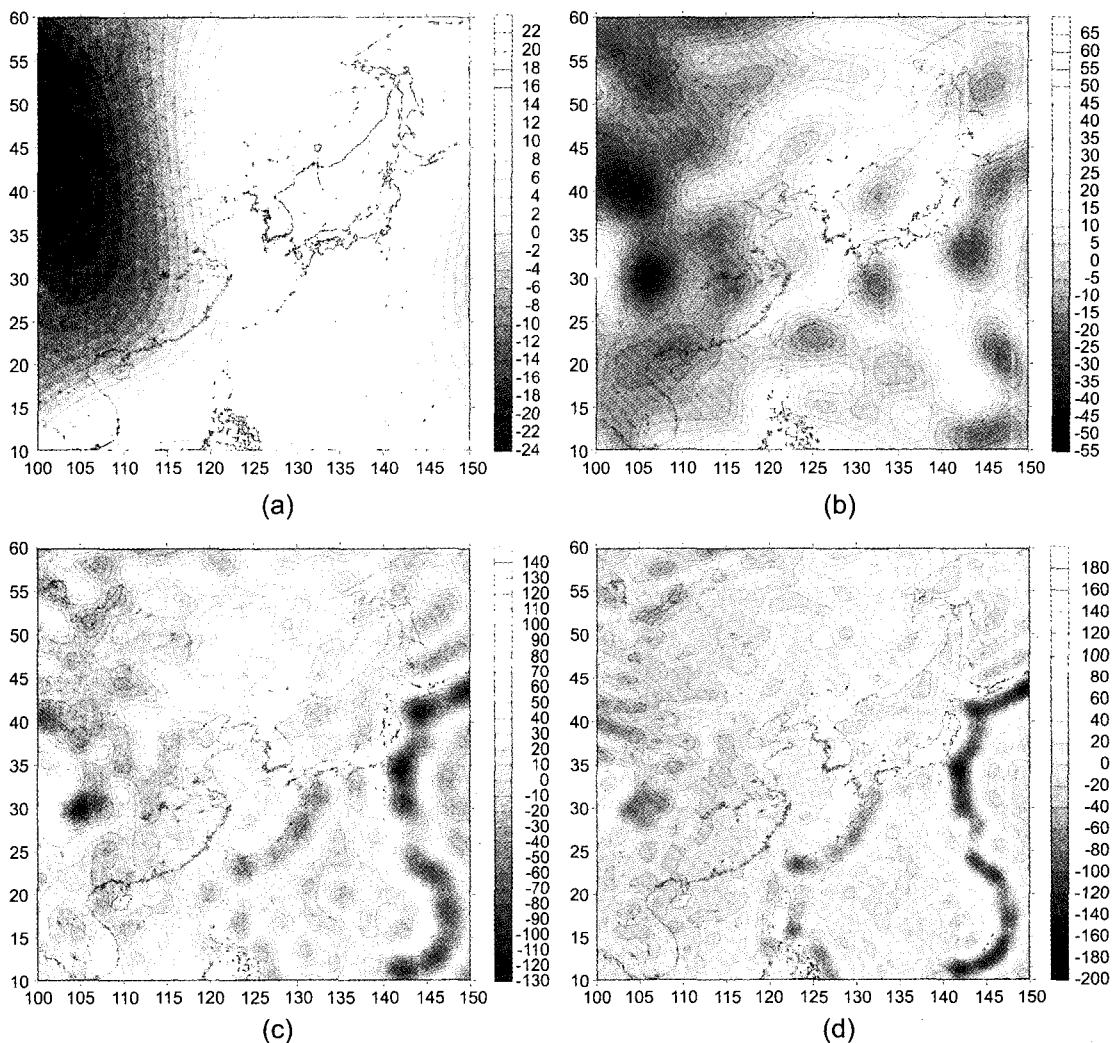


Fig. 4. Geographical distribution of gravity anomalies in the study area with different spectral resolution by using 10(a), 50(b), 100(c), and 150(d) degrees, respectively.

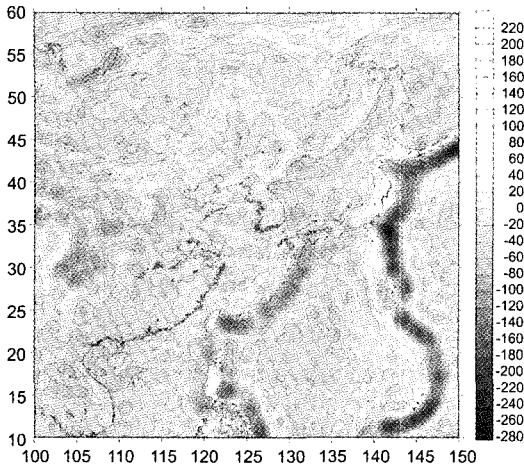


Fig. 5. Residual anomaly obtained after subtraction of the regional effects in Fig. 4(a) from the calculated gravity anomalies in Fig. 3.

성분 외에도 이론상 지구중심까지의 모든 질량에 대한 중력효과가 포함되어 있고, 이들은 지각성분보다 파장이 길다. 따라서 본 연구에서는 깊이에 따른 중력효과를 고려하기 위하여 10, 50, 100, 150의 degree를 달리하여 구면조화분석을 실시하고, 중력이상을 산출, 비교하였다. degree가 10일 때의 중력이상에서는 보이지 않던 고주파 성분들이 degree가 높아질수록 서서히 지형의 특성이 반영되어 나타남이 관찰된다(Fig. 4). 해양지역의 경우 Fig. 3에서 황해 군산분지와 남해 제주분지에서 보이지 않던 이상대가 degree 100까지의 Fig. 4(c)에서 나타나고 다시 degree 200까지의 Fig. 4(d)에서는 보이지 않는다. 또한 Fig. 3에서 흑산분지 일대에서 나타나는 이상대는 Fig. 4(c)에서는 보이지 않다가 Fig. 4(d)에서 다시 나타난다. 이와 같은 현상은 degree를 신호의 개념에 비추어 볼때 낮은 degree는 저주파를, 높은 degree는 고주파의 특성을 반영하여 깊이에 따른 이상대의 분포를 지시한다. 특히 흑산분지에서 보이는 주변지역보다 높은 이상치는 그리 깊지 않은 지각내에서 밀도가 높은 물질의 존재를 암시한다. Kim(1996)은 지하 심부, 즉 지구의 맨틀과 핵으로부터 오는 장파장의 중력효과를 제거하기 위한 방법으로 degree 10이하의 광역성분을 제거한 바, 이를 본 연구에서도 적용하기 위하여 Fig. 3의 중력이상에서 Fig. 4(a)의 광역성분을 제거하고 잔여이상을 계산하였다. 계산된 잔여이상은 기존의 중력이상과 0.94의 상관관계를 보이며 크게 달라진 것은 없으나, 전체적으로 낮아진 중력이상이 육안으로 확인되며, 특히 한반도 육상 북부 산간 지역과 경상분지 일대에서 고이상의 영역이 좁아

져 주변지역과 더욱 쉽게 구별된다. 해양지역의 경우 북한 황해지역의 서한만 분지와 우리나라 군산분지, 제주분지, 울릉분지 등지에서 이상대가 관찰된다(Fig. 5).

5. 결론 및 토의

한반도를 포함하는 동아시아 지역에서 GRACE로부터 약 4개월간 획득된 자료를 이용하여 지구물리학적 연구를 수행하였다. 구면조화분석을 통하여 계산, 추출된 지오이드의 기복은 전체적으로 -60~60 m까지의 분포를 보이고, 한반도를 포함한 인근 주변지역의 경우 10~30 m의 분포를 보이고 있으며, 북서방향에서 남동방향으로 서서히 증가하는 경향을 보인다. 또한 중력이상은 섭입대에서의 특징적인 지이상대를 제외하면 전체적으로 -60~60 mgal의 분포를 보이고, 육상지역에서는 백두산, 개마고원 및 태백산맥에서 고이상이, 해양지역의 경우 황해의 흑산분지에서 고이상이, 동해의 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토분지에서 지 이상이 관찰된다. 깊이에 따른 중력효과를 파악하고자 degree를 달리하여 중력이상을 산출한 결과, 낮은 degree에서 보이지 않던 고주파 성분들이 degree가 높아질수록 서서히 지형의 특성이 반영되어 나타났다. 특히 황해의 군산분지와 제주분지와는 달리 높은 degree에서 나타나는 흑산분지에서의 고이상은 낮은 심도내에서의 고밀도 물질의 부존을 지시한다. 지각 성분만을 고려하기위한 방법으로 degree 10의 광역성분을 제거하여 잔여이상을 계산하였다. 계산된 잔여이상은 기존의 중력이상과 0.94의 상관관계를 보이며, 이상값이 전체적으로 낮아졌다. 한반도 육상 북부 산간 지역과 경상분지 일대에서 고이상의 영역이 좁아져 주변지역과 더욱 쉽게 구별되고, 황해지역의 서한만 분지와 군산분지, 제주분지, 울릉분지 등지에서 이상대가 관찰된다. 육상지역과 해상지역에서 계산된 잔여이상과 degree별 분리된 이상대의 분포는 지하 지질 규모 및 심도별 분포와 관련하여 대규모 지구구조를 규명하거나, 나아가 지하자원 탐사에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

인공위성으로부터 획득된 지구정보는 해상도에 있어서는 항공탐사나 육상, 해상탐사 같은 지고도탐사의 결과에 비해 떨어지나, 물리적 또는 정치적으로 접근이 용이하지 못한 지역의 탐사라든지, 주기적이고 장기적인 관측이 필요한 경우에 매우 유용하다. 따라서 인공위성을 통해 획득된 지구정보자료와 현장조사를 통해 얻어진 지구정보자료를 GIS DB로 구축하고 통합적으

로 관리하는 지구정보 활용계획을 수립하고 관리한다면, 추후 우리나라의 종합적 지구환경 시스템 관리에 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

Heiskanen W. A. and Moritz H., 1967, Physical geodesy, W. H. Freeman and company.

Kim J. W., 1996, Spectral correlation of satellite and airborne geopotential field measurements for lithospheric analysis, Ph.D. Dissertation, Dept. of Geological Sciences, The Ohio State University, p. 171.

Smith W. H. F and Sandwell D. T., 1997, Global seafloor topography from satellite altimetry and ship soundings, Science, v. 277, p. 1957-1962.

2004년 12월 15일 원고접수, 2005년 6월 8일 게재승인.