

구면캡 조화분석을 이용한 남한 및 그 주변지역의 중력이상 통합에 관한 연구

황종선^{1,2*} · 김형래³ · 김창환⁴ · 유상훈⁵

¹나사고다드우주항공센터, ²세종대학교 지구정보연구소, ³공주대학교 지질환경과학과,

⁴한국해양연구원 독도전문연구사업단, ⁵한국석유공사 석유기술연구원

The Study on Integration of Gravities Anomaly in South Korea and Its Vicinities by Using Spherical Cap Harmonic Analysis

Jong Sun Hwang^{1,2*}, Hyung Rae Kim³, Chang Hwan Kim⁴ and Sang Hoon You⁵

¹Planetary Geodynamics Branch, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771 U.S.A.

²Research Institute of Geoinformatics and Geophysics, Sejong University, Seoul, Korea

³Dept. of Geoenvironmental Sciences, Kongju Univ, Korea

⁴Dokdo Research Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Korea

⁵Technical Support & Evaluation Dept., Petroleum Technology Institute, Korea National Oil Corporation, Anyang, Korea

The gravity anomalies that observed by ground and shipborne survey and calculated from GRACE satellite are combined by using spherical cap harmonic analysis (SCHA). In this study, ground gravity data from Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource(KIGAM) and shipborne gravity data from National Ocean Research Institute(NORI) and Korea Ocean Research and Development institute(KORDI) were used. L-2 level GRACE Gravity Model (GGM02C) was also used for satellite gravity anomaly. The ground and shipborne surveyed data were combined and gridded using Krigging method with 0.05 degree interval and GRACE data were also gridded using the same method with 0.05 degree to harmonize with the resolution of SCHA that has coefficient up to 80. Generalized Minimal Residual(GMRES) inversion method was implemented for calculating the coefficients of SCHA using the gridded ground and satellite gravity anomalies that had 0 km and 50 km altitude, respectively. The results of inversion method showed good correlation of 0.950 and 0.995 with original ground and satellite data. The gravity anomaly using SCHA satisfies Laplace's equation, therefore, using these SCHA coefficients, gravity anomaly can be calculated at any altitude. In this study, gravity anomaly was calculated from 10 km to 60 km altitude and each altitude, very stable results were shown. The ground and shipborne gravity data that have higher resolution and satellite data in long wavelength are harmonized well with SCHA coefficients and successfully applied in South Korea area. If more continuous survey and multi-altitude surveyed data like airborne data available, more precise gravity anomaly can be acquired using SCHA method.

Key words : South Korea, GRACE, Spherical cap harmonic analysis, Gravity, Data integration

육상 및 해상에서 측정된 중력자료와 GRACE 인공위성으로부터 계산된 중력자료를 구면캡 조화분석(Spherical Cap Harmonic Analysis; SCHA)을 이용하여 통합하였다. 중력자료는 한국지질자원연구원에서 측정된 육상중력과 한국해양연구원과 국립해양조사원에서 측정된 해상자료를 이용하였으며, GRACE 인공위성 자료로는 구면조화함수의 계수형태로 되어있는 L-2 level 자료를 이용하여 중력이상값을 계산하였다. 0.05도 간격으로 격자화 된 중력자료의 해상도와 구면캡 조화계수의 해상도를 일치시키기 위하여 조화계수를 order 80까지 설정하였으며 Generalized Minimal Residual (GMRES) 역산방법을 이용하여 구면캡 조화계수를 계산하였다. 이 계수로부터 다시 중력이상을 구한 결과 육상 및 해상자료와 0.950, 그리고 GRACE 인공위성 자료와 0.995의 매우 높은 상관관계를 보여주어 본 연구의 방법이 매우 잘 적용 되었음을 알 수 있었다. 구면캡 조화분석의 적용으로 중력자료의 특성인 라플라스 방정식을 만족함으로써, 측정된 고도 이외에 다른 고도에서도 중력값을 계산할 수 있으며, 본 연구에서는 10 km에서 60 km고도까지 중력이상을

*Corresponding author: estwing@naver.com

계산하였다. 각 고도에서 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있었으며, 인공위성 자료의 특성인 우수한 저주파성분과 육상 및 해상에서 측정된 자료의 상세한 고주파 성분이 매우 잘 융합되어 있는 것을 볼 수 있었다. 본 연구의 방법을 이용하여 여러가지 고도의 자료를 한꺼번에 통합할 수 있으므로 항공중력 등의 자료가 추가될 경우, 더욱더 상세하고 안정적인 중력이상값을 계산 할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 남한, 그레이스 인공위성, 구면캡 조화분석, 중력, 자료통합

1. 서 론

기존의 중력계를 이용한 육상 및 해상 중력 측정에서 항공기나 인공위성에 의한 측정이 가능해 지면서 여러 가지 고도에서 측정된 자료를 통합하여 서로의 장점만을 살릴 수 있는 자료통합 방법의 필요성이 대두되었다. 육상이나 해상에서 직접 측정된 중력 이상은 매우 높은 해상도를 가지나 측선잡음이라던가 각 측선간의 시간적 차이, 그리고 해상의 경우 파도에 의한 영향 등으로 균일하고 안정된 자료를 얻기 어렵다 (Park *et al.*, 1999). 인공위성으로부터 구해진 자료의 경우에는 1년 이상의 시간을 가지고 측정하며 위성의 고도나 자세 등이 잘 보정되어 있으므로 우수한 장주기 성분을 가지고 있으나 대개 지표에서 500-600km 떨어져 있으므로 지표의 상세한 정보를 얻기에는 어려움이 있다. 이러한 두 자료의 장점만을 취하여 통합하는 방법으로 You *et al.*(2001)는 동해 부근에서의 파수영역(wavenumber domain)에서 인공위성의 자료와 육상 및 선상 자료의 통합을 연구한 바 있으나 이 연구에서는 중력의 기본적인 이론인 라플라스 방정식(Laplace equation)에 대한 고려 없이 수행된 한계를 가지고 있었다. Choi *et al.*(1997, 2006)는 전지구적 모델과 GPS를 이용하여 한반도의 지오이드를 계산하고 중력에 관한 연구를 수행하였으나 이 연구들에서는 두 자료의 통합에 대한 연구는 이루어지지 못하였다. 전지구적 모델의 경우, 모든 중력 자료를 이용하여 만든 EGM96 model이 있으나 이 역시 공간해상도가 한반도 주변에 적용하기에는 어려움이 있다.

지역적인 자료를 바탕으로 라플라스 방정식을 만족시키는 방법 중에 하나는 지구 표면을 평면으로 가정하고 계산하는 직각조화분석(Rectangular Harmonic Analysis; RHA)가 있으나 지역이 매우 작은 지역이 아니면 연구지역 바깥으로 갈수록 오차가 증가하는 단점이 있다(Alldrede, 1981; Marlin *et al.*, 1996).

구면캡 조화분석은 처음 Haines(1985, 1988)에 의해 자력 이상을 계산하는 방법으로 제시되었으며 이 방법은 기존의 구면조화함수가 전지구적인 자료만을 다

룰 수 있는데 반해 지역적 자료만을 가지고도 라플라스 방정식을 만족시키므로 여러 고도의 자료를 한꺼번에 통합할 수 있을 뿐 더러 계산된 계수를 가지고 다른 고도에서의 중력값 역시 추출할 수 있는 장점이 있다. 중력이상을 계산하는 방법으로는 Jiancheng *et al.*(1995)에 의해 처음 중국지역에 적용되었으며 이후 Santis *et al.*(1997)에 의해 발전되었다.

본 연구에서는 Santis *et al.*(1997)에 의한 알고리즘을 바탕으로 육상이나 해상에서 직접 측정된 중력 이상과 인공위성에서 구해진 중력값을 이상적으로 융합하면서 라플라스 방정식 역시 만족시키는 결과를 도출할 수 있는 구면캡 조화분석을 이용하여 한반도 부근의 중력이상 자료를 통합하였다.

2. 이 론

구면캡 조화분석에 의한 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$T(r, \theta, \phi) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^k \left(\frac{a_e}{r} \right)^{n_k(m)} [C_{n_k, m} \cos(m\phi) + S_{n_k, m} \sin(m\phi)] P_{n_k, m}(\cos\theta) \quad (1)$$

여기서 r , θ , ϕ 은 각각 지구중심으로의 거리, 캡 좌표계(cap reference system)에서의 위도, 경도이며(Fig. 1), μ 는 중력상수와 지구의 질량의 곱에 해당한다. a_e 는 지구의 반지름이며, n_k , m 은 구면조화함수의 degrees와 orders, k 는 경계조건을 만족하는 실수의 order의 지수이며, $C_{n_k, m}$, $S_{n_k, m}$ 은 구면캡 조화분석의 계수, $P_{n_k, m}(\cos\theta)$ 은 부 르장드르(associated Legendre functions) 함수이다(Santis *et al.*, 1997). 구면캡 조화분석을 적용하기 위해서는 우선 기존의 위경도 좌표계를 Fig. 1과 같은 캡의 모양을 하는 좌표계로 변환시킨 후, 이 캡의 크기에 따라 실수로 나타나는 degree와 정수의 형태인 order를 계산하여 이에 따른 계수값을 구하게 된다. 일반적인 구면조화함수의 경우에는 지구 전체에 적용하므로 degree와 order가 정수의 형태로 나타나나

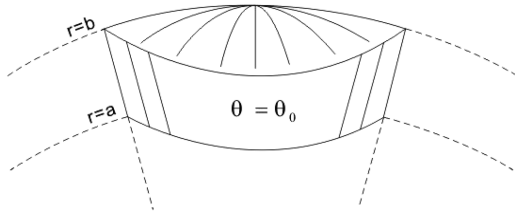


Fig. 1. Spherical cap of half-angle θ_0 . Data may be distributed over surface $r=a$ (surface data) or between surface $r=a$ and $r=b$ (satellite data)(Haines, 1998).

본 연구에서는 일부 지역에 적용하는 방법이므로

degree가 실수의 형태로 나타나게 된다(Haines, 1985). 위 식은 일반적인 포텐셜에 대한 식이므로 이를 중력 이상값에 적용하기 위해서는 다음과 같은 식이 사용된다. 중력 이상값은 포텐셜과 다음과 같은 관계를 가지므로(Heiskanen and Moritz, 1967).

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

이 되며, 위 두식을 이용하여 각각 육상이나 선상에서 측정된 자료 G_{ground} 와 인공위성으로부터 얻어진 중력 자료 $G_{\text{satellite}}$ 를 이용하여 구면캡 조화분석의 계수를 구

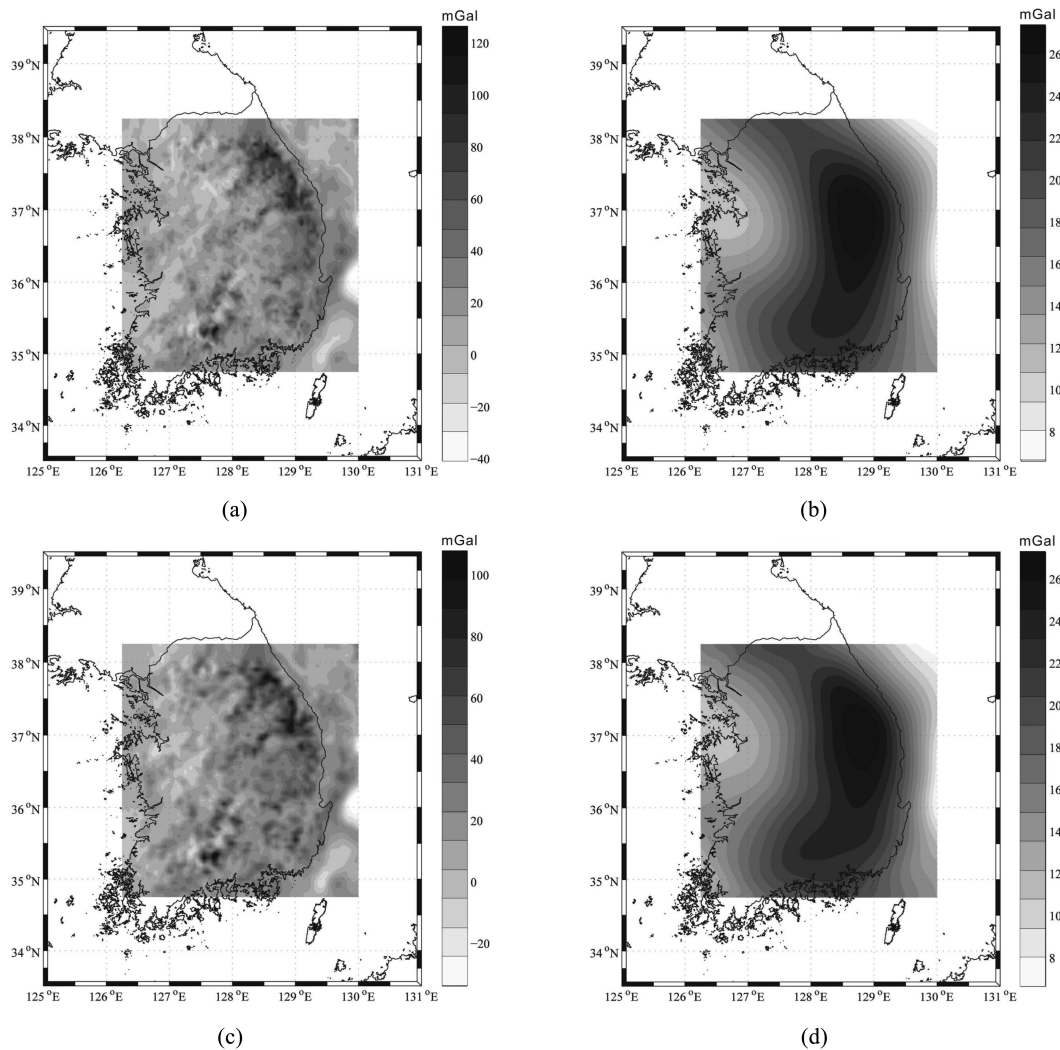


Fig. 2. (a) Free-air gravity anomaly that observed by ground and shipborne gravimeter, (b) Free-air gravity anomaly calculated from GRACE GGM02C model at 50 km altitude, (c) Free-air gravity anomaly calculated from SCHA coefficients at (c) 0 km, and (d) 50 km.

하는 식은 다음과 같다. P 를 구면캡 조화분석의 계수라고 하면, 이로부터 중력이상과의 관계는

$$\begin{bmatrix} G_{ground} \\ G_{satellite} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ground}^r \\ H_{satellite}^r \end{bmatrix} P + e \quad (3)$$

과 같이 표현될 수 있고, 여기서 e 는 에러에 해당한다 (Schmitz and Cain, 1983) 측정된 중력값은 지구중심 방향의 중력 성분이므로 행렬 H^r 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$H_{ij}^r : \begin{cases} \frac{\mu}{r_i^2} [n_k(m)-1] \cos(m\phi_i) P_{n_k,m}(\cos\theta_i) \left(\frac{a_e}{r_i}\right)^{n_k(m)} & (P_j = C_{n_k,m}) \\ \frac{\mu}{r_i^2} [n_k(m)-1] \sin(m\phi_i) P_{n_k,m}(\cos\theta_i) \left(\frac{a_e}{r_i}\right)^{n_k(m)} & (P_j = S_{n_k,m}) \end{cases} \quad (4)$$

위 (3), (4)식으로부터 육상 및 해상 자료와 인공위성 자료를 통합하여 하나의 구면캡 조화계수로 나타낼 수 있다.

3. 자 료

본 연구에서 사용된 육상 중력 자료는 한국지질자원 연구원에서 측정한 남한 지역의 부계 중력 이상 (Bouguer gravity anomaly)을 사용하였으며 해상 중력 자료로는 국립해양조사원과 한국해양연구소에서 측정된 후리어 중력이상(Free-air gravity anomaly)을 사용하였다. 육상 부계 중력이상은 지형보정과 부계 보정 후, 다시 후리어 중력이상으로 변환되어 해상 중력이상과 같이 격자화 처리 되었다(Fig. 2(a)). 인공위성 자료로는 GRACE로부터 관측된 Level-2 지오폠펌셜 자료인 GGM02C 중력이상(Tapley *et al.*, 2005)을 사용하여 한반도 일원에서의 중력이상을 계산하였다(Fig. 2(b)). GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)는 전 지구 중력장과 시간변이에 따른 중력장의 변화를 탐사하기 위한 목적으로 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)와 독일 DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)의 공동 프로젝트로 개발된 지구관측 위성으로 2002년 3월에 발사되었다. GRACE는 쌍둥이 위성으로 두 위성의 궤도정보로부터 지구중력의 장과장 성분을 측정하고, 진행되는 두 위성간 거리의 변화를 관측하여 중력의 중·장과장 성분 측정한다(Dunn *et al.*, 2003). 지구의 공간적, 시간적 중력 장의 변화는 GRACE 두 위성의 궤도에 각각 다른 영향을 끼치며, 이 차이는

두 위성간의 거리의 차이를 가져온다, 이 차이는 바로 두 위성간의 K-band의 마이크로파를 주고받는 시간의 차이를 만들며, 이 마이크로파의 위상(phase)차이로서 표현된다(Bettadpur, 2004).

Level-2 자료는 전처리과정에 의해 조정되고 검증된 Level-1로부터 유도된 1개월 단위의 지구 중력장을 구면조화계수(spherical harmonic coefficient)형태로 공개한 자료이다. 이는 GRACE 궤도관측에 의해 측정된 지구 전체에 대한 평균중력이상(mean gravity anomaly)을 구면조화분석(spherical harmonic analysis)하여 계산한 정규화된(fully normalized)중력 포텐셜(potential)계수로서 sine과 cosine의 계수들로 이루어져 있다(Rapp and Cruz, 1986).

4. 자료처리

육상 및 해상에서 측정된 중력자료와 인공위성으로부터 추출된 중력 자료를 통합하기 위하여 먼저 파수영역(wavenumber domain)에서 두 자료를 비교 분석하였다. GGM02C 자료는 구면조화함수의 계수로 구성되어 있으므로 어느 고도에서나 중력 값을 계산하는 것이 가능하나 너무 높은 고도자료를 사용하는 경우, 매우 긴 파장을 가진 성분만이 나타나므로 본 연구에서와 같이 자료 통합을 위해서는 지상에서 측정된 자료와 잘 융합될 수 있는 인공위성자료의 고도를 찾는 것이 필요하다. 기본적으로 인공위성 자료는 저주파 영역의 성분만을 가지고 있으므로 육상 및 해상측정자료를

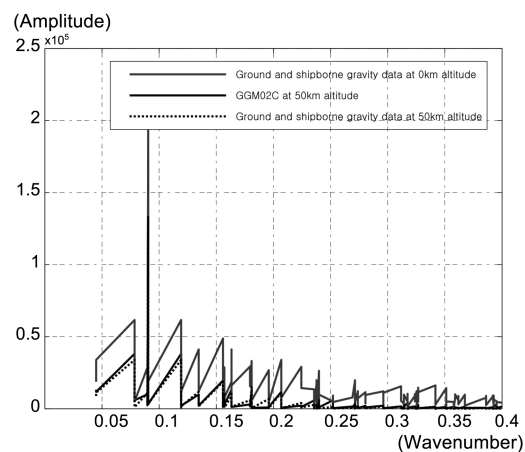


Fig. 3. Amplitude spectrum from ground and shipborne free-air gravity anomaly at 0 km altitude(gray-line), ground and shipborne free-air gravity anomaly 50 km altitude(dot-line) and GGM02C model at 50 km altitude(black-line).

Fast Fourier Transform(FFT)를 이용하여 상향 연속 필터를 적용하여 인공위성 자료와 비슷한 저주파 성분을 가지는 고도를 구하였다. Fig. 3은 자료들을 파수 영역으로 변환한 후, 각 파수에 대한 크기(amplitude)를 구한 것으로 검은색 실선은 GRACE 위성으로부터 추출된 50 km 고도에서의 중력이상의 파워 스펙트럼이며 점선으로 표시된 것이 육상 및 해상에서 측정된 중력 이상을 파수 영역에서 상향연속필터(Upward continuation filter)를 사용한 결과로서 50 km의 고도에서 두 자료가 각 파수에서 서로 비슷한 크기를 보이는 것을 알 수 있으며, 이 그림을 이용하여 육상 및 해상에서 측정된 중력자료의 고도는 0 km로 인공위성에서 측정된 중력 자료는 50 km에서의 자료를 이용하여 식(3), (4)을 통해 역산을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 자료들은 0.05도 간격으로 그리딩 되어 있으므로 이를 km로 환산하면 약 5.5 km정도라고 볼 수 있다. 구면캡 조화분석에서의 해상도는 다음과 같이 계산되며

$$L_{min} \approx 2\theta_0 R/k \quad (5)$$

여기서 L_{min} 은 최소의 길이를 갖는 파장이며 θ_0 는 캡의 크기, R 은 지구반지름, 그리고 k 는 구면캡 조화분석의 계수(order)를 나타낸다. 본 연구에서는 캡의 크기로 2도를 사용하고 계수를 80까지 계산하였으므로 구면캡 조화분석의 해상도는 약 5.5 km가 되어 원 자료의 해상도와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 계수를 구하기 위하여 역산(inversion)이 사용되었으며 역산의 방법으로는 역산법의 하나인 Generalized Minimal Residual(GMRES) 법을 이용하여 연속적으로 계산된 구면캡 조화분석의 계수가 0.000001 mgal 이하의 차이를 가질 때까지 계산하였다.

5. 결 과

Table 1은 각각의 자료와 구면캡 조화분석을 이용하여 모델링한 자료와 원 자료의 최대(Max), 최소(Min), 평균(Mean), 표준편차(SD) 그리고 각 자료간의 상관계수(CC)를 나타낸 것이다. 육상 및 해상 중력자료의 경

우 최소, 최대값은 각각 -40.762, 138.307 mGal로 나타나며 인공위성 자료의 경우 각각 6.595, 28.691 mGal의 값을 가진다. 이 두 자료를 식(3)과 (4)를 이용, 역산을 통해 구면캡 조화분석의 계수를 계산하고 이로부터 다시 지표면과 50 km 고도에서의 중력이상값을 계산한 결과 최소, 최대값은 지표면에서 각각 -33.903, 117.028 mGal로 나타나며 50 km 고도에서 각각 6.595, 28.691 mGal의 값을 가진다(Fig. 2(c), (d)). 원 자료와 구면캡 조화분석의 계수로부터 계산된 중력이상의 상관계수는 지표면에서 0.950, 50 km 고도에서 0.995로 본 연구의 결과가 실제 측정된 중력값을 매우 잘 반영하고 있으며 저주파 성분이 많은 인공위성 자료와 고주파 성분이 많은 지표에서 측정된 육상 및 해상자료 모두 잘 만족시키며 두 자료를 하나의 모델을 가지고 나타낼 수 있다는 것을 보여주고 있다. 지표면 고도에서의 모델링이 50 km 고도에서의 모델링보다 덜 정확한 것은 지표면에서는 지형의 영향을 많이 받아 중력이상값의 변화가 크기 때문이며 또한 본 연구에서 사용된 구면캡 조화분석의 해상도 이상의 고주파를 가진 성분의 영향에 기인한다. 구면캡 조화분석을 사용하여 계산한 계수의 경우, 라플라스 방정식을 만족하므로 관측된 고도가 아닌 다른 고도에서도 중력이상을 계산할 수 있는데 본 연구에서는 10 km에서 60 km까지 중력을 계산하였다(Fig. 4). 기본적으로 고도가 높아질수록 값이 작아지며 저주파 성분이 우세하게 나오며 역산을 적용한 고도(0, 50 km)에서 뿐만 아니라 다른 고도에서도 안정된 결과를 나타낸다. 연구지역 내 한반도의 경우 태백산맥과 소백산맥 등 고도가 높은 지역에서 고이상을 보이며, 동해안을 지나면서 점점 저이상대를 보인다. 즉, 전체적으로 중력이상은 연구지역의 지형의 특성을 잘 반영하고 있는데 이것은 본 연구에서 사용된 중력자료가 후리에어 중력으로 지오이드면 위에 존재하는 밀도를 고려하지 않았기 때문이다. 10 km 고도에서 중력이상은 -11.571에서 63.376 mGal의 값을 가지며 고도가 올라갈수록 값이 급속히 감소하여 60 km 고도에서 19.783에서 25.3072 mGal의 값을 가진다. 10 km 고도에서는 설악산과 오대산 이 위치하는 태백산맥 지

Table 1. Statistical Comparison of Input Data(Fig. 1(a) and (b)) and Output Data(Fig. 1(c) and (d)).

| Data | (Min, Max) | Mean | SD | CC |
|--------------------------------------|--------------------|--------|--------|-------|
| Ground and shipborne gravity anomaly | (-40.762, 138.307) | 24.756 | 21.959 | 0.950 |
| SCHA model at 0km altitude | (-33.903, 117.028) | 24.801 | 19.652 | |
| GGM02C model at 50 km altitude | (6.595, 28.691) | 19.084 | 4.957 | 0.995 |
| SCHA model at 50 km altitude | (6.633, 28.667) | 19.100 | 4.965 | |

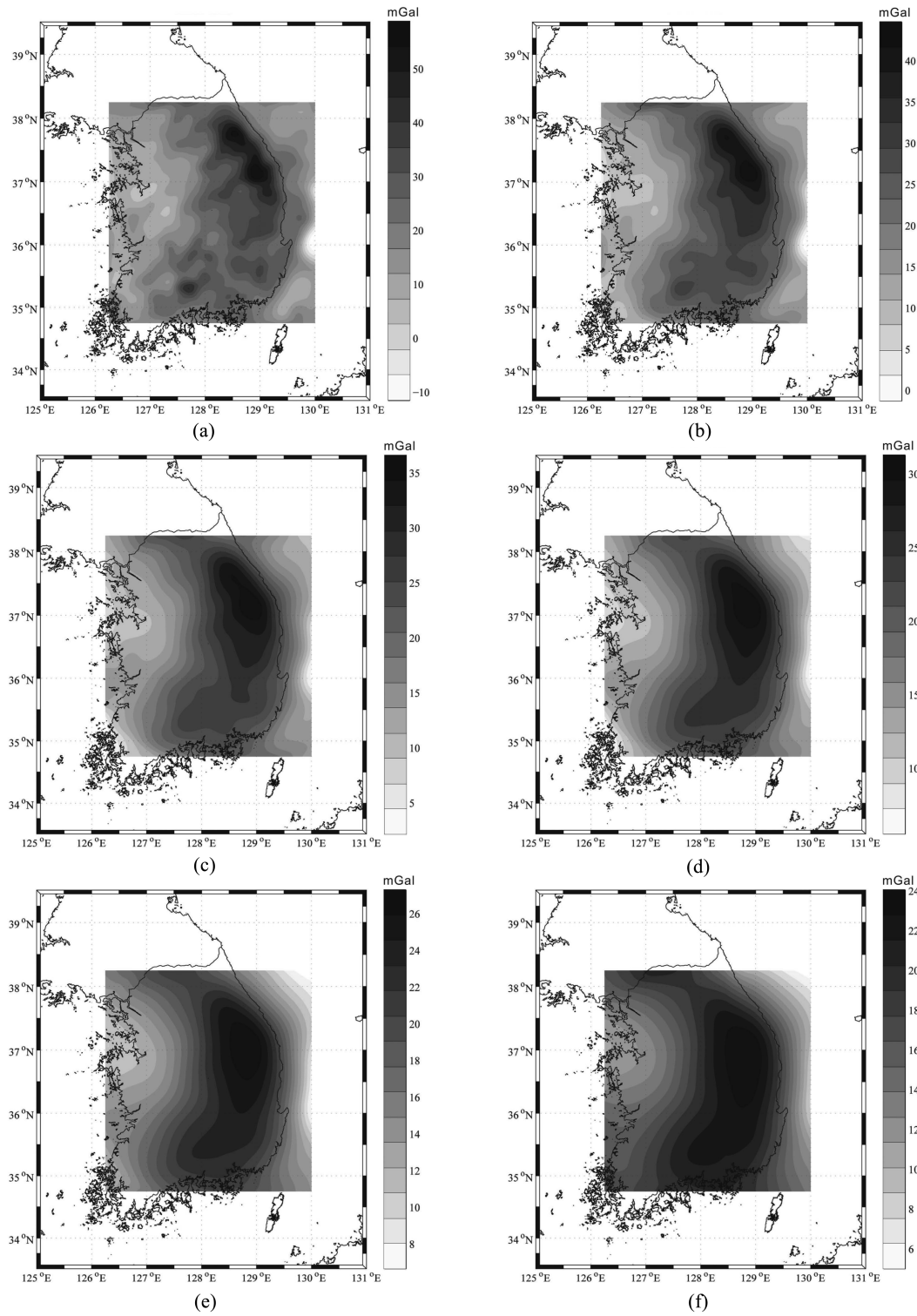


Fig. 4. Free-air gravity anomaly calculated from SCHa coefficients at (a) 10 km, (b) 20 km, (c) 30 km, (d) 40 km, (e) 50 km, and (f) 60 km altitude

역과 그 남쪽의 지리산이 위치하는 소백산맥이 뚜렷이 관찰되나 고도가 높아질수록 점점 영향이 적어지고 고주파 성분이 감소하여 40 km 고도에서는 소백산맥에 의한 중력 이상은 거의 관찰되지 않는다.

6. 결론 및 토의

본 연구를 통하여 한반도 부근의 육상 및 해상에서 실측된 후리에어 중력값과 GRACE 인공위성으로부터 계산된 후리에어 중력을 구면캡 조화 분석을 통하여 통합하였다. 자료 통합을 위해서는 고주파성분인 지상에서 측정된 자료와 저주파 성분인 인공위성자료가 잘 융합될 수 있는 고도를 찾는 것이 필요하므로 파워스펙트럼 분석을 통하여 지표면 고도에서 육상 및 해상에서 측정된 중력자료를 사용하였고 50km 고도에서 인공위성 자료를 사용하여 구면캡 조화분석을 실시하였다. GMRES 역산법에 의해 구면캡 조화분석의 계수를 계산한 후, 다시 이 계수를 가지고 지표면과 50km 고도에서 중력값을 계산한 결과 매우 잘 일치하였으며 다른 고도에서의 중력값을 측정한 결과에서도 매우 안정적이며 신뢰할 수 있는 결과를 보여 주었다. 구면캡 조화분석의 적용으로 중자력 자료의 특성인 라플라스 방정식을 만족하게 됨으로써 측정된 고도 이외에 다른 고도에서도 중력값을 계산할 수 있게 되었다. 또한 본 연구에서 사용된 방법은 포텐셜 이론을 만족하는 자력의 경우에도 적용 가능하므로 주로 항공기를 이용하여 자력을 측정하는 한국의 경우, 지형 때문에 발생하는 항공기 고도차에 의한 영향을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 인공위성 자력자료와 통합함으로써 여러 다른 시기에 관측된 자력자료를 안정된 하나의 자료로 만드는 매우 유용할 것이다. 향후 실시될 항공중력의 경우, 항공기의 고도가 변하는 경우에도 본 연구에서 사용된 방법이 그대로 적용 가능하며, 본 연구의 결과와 함께 통합된다면 더욱더 정밀하고 안정된 중력 자료를 계산할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 이를 이용하여 한반도의 지구구조나 지질학적 연구에 사용할 경우, 대규모 지구구조를 규명하거나, 나아가 지하자원 탐사에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부분적으로 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-C00077(I00522)).

참고문헌

- Allredge, L.R. (1981) Rectangular harmonic analysis applied to the geomagnetic field, *J. Geophys. Res.*, v. 86, p. 3021-3026.
- Bettadpur, S. (2004) Level-2 Gravity Field Product User Handbook, GRACE Center for Space Research, University of Texas at Austin, p. 327-734.
- Choi, K.S., Kim, J.H., and Yang, C.S. (1997) PNU95 Geoid, *Korean Journal of Geophysical Research*, v. 25, p. 1-13.
- Choi, K.-S., Won, J.-H., and Shin, Y.-h. (2006) Precise Geoid model for Korea from gravity and GPS data, *Korean Journal of Geophysical Research*, v. 9, n. 3, p. 181-188.
- Dunn, C., Bertiger, W., Bar-Server, Y., Desai, S., Haines, B., Kuang, D., Franklin, G., Harris, L., Krüzinga, G., Mehan, T., Nandi, S., Nguyen, D., Rogstad, T., Thomas, J.B., Tien, J., Romans, L., Watkins, W., Wu, S.C., Bettadpur, S., and Kim, J. (2003) Instrument of GRACE: GPS augments gravity measurements, *GPS World*, v. 14, p. 16-28.
- Haines, G.V. (1985) Spherical cap harmonic analysis, *J. Geophys. Res.*, v. 90, p. 2583-2591.
- Haines, G.V. (1988) Computer program for spherical cap harmonic analysis of potential and general field, *Computer & Geoscience*, v. 14, n. 4, p. 413-447.
- Heiskanen W. A. and Moritz H. (1967) *Physical geodesy*, W. H. Freeman and company.
- Jiancheng L., Dingbo C., and Jinsheng N. (1995) Spherical cap harmonic expansion for local gravity field representation, *Manuscr Geod* 20, p. 265-277.
- Malin, S.R.C., Duagit, Z., and Baydemir, N. (1996) Rectangular harmonic analysis revisited, *J. Geophys. Res.*, v. 101, p. 28205-28209.
- Park, C.H., Kim, J.W., Huh, S., Won, J.S., Suk, B.C., and Yoo, H.S. (1999) High Resolution Gravity Mapping and its interpretation from both shipborne and satellite gravity data in the Ulleung Basin, *Journal of Korean geophysical society*, v. 2, p. 27-38.
- Rapp R. H. and Cruz, J. Y. (1986) 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.
- De Santis, A., and Torta, J.M. (1997) Spherical cap harmonic analysis: a comment on its proper use for local gravity field representation, *J. of Geodesy*, v. 71, p. 526-532.
- Schmitz, D.R., and Cain, J.C. (1983), *Geomagnetic spherical harmonic analyses: 1. Techniques*, *J. Geophys. Res.*, v. 88, p.1222-1228.
- Tapley, B., Ries, J., Bettadpur, S., Chambers, D., Cheng, M., Condi, F., Gunter, Z., Kang, B., Nagel, P., Pastor, R., Pekker, T., Poole, S., and Wang, F. (2005) GGM02- An improved Earth gravity field model from GRACE, *Journal of Geodesy*, DOI:10.1007/s00190-005-0480-z.
- You, S.-H., Hwang, J.S., Park, J.W., Min, K.D., and Park, C.-H. (2001) Integration of Shipborne and Satellite Gravity Data in the East Sea (Japan Sea), *Proceedings of international symposium on Remote Sensing*, p. 22-25.

2007년 10월 23일 원고접수, 2008년 3월 20일 게재승인.