

## 지구 평균 질량 변화를 포함한 GRACE 중력 모델 보정

서기원<sup>1,\*</sup> · 엄주영<sup>1</sup> · 권병두<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 사범대학 지구과학교육과, 151-742, 서울특별시 관악구 관악로 1

<sup>2</sup>서울대학교 해양연구소, 151-742, 서울특별시 관악구 관악로 1

### Refinement of GRACE Gravity Model Including Earth's Mean Mass Variations

Ki-Weon Seo<sup>1,\*</sup>, Jooyoung Eom<sup>1</sup>, and Byung-Doo Kwon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Abstract:** The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) has observed the Earth's mass redistribution mainly caused by the variations of groundwater, ice sheet, and sea level since its launch in April 2002. The global gravity model estimated by the GRACE observation is corrected by barometric pressure, and thus represents the change of Earth mass on the Earth's surface and below Earth's surface excluding air mass. However, the total air mass varies due to the water exchange between the Earth's surface and the atmosphere. As a result, the nominal GRACE gravity model should include the Earth's gravity spectrum associated with the total air mass variations, degree 0 and order 0 coefficients of spherical harmonics ( $C_{00}$ ). Because the water vapor content varies mainly on a seasonal time scale, a change of  $C_{00}$  ( $\delta C_{00}$ ) is particularly important to seasonal variations of sea level, and mass balance between northern and southern hemisphere. This result implies that  $\delta C_{00}$  coefficients should be accounted for the examination of continental scale mass change possibly associated with the climate variations.

Keywords: GRACE, mean mass variations, water vapor content

**요약:** GRACE는 2002년 발사된 이래로 지하수, 빙하, 해수면의 변동에 의한 지구의 질량 재배치를 관측해오고 있다. GRACE 관측으로부터 추정된 지구 중력 모델은 기압보정을 거쳐 대기 질량이 제거된 지구 표면과 그 하부의 질량 변화를 나타낸다. 그러나 대기 총 질량은 지표면과 대기 사이의 물 교환에 의해 변한다. 그 결과 GRACE 중력 모델은 구면 조화 함수의 계수 degree 0, order 0 ( $C_{00}$ )에 해당하는 총 대기 질량 변화에 관련된 중력 스펙트럼을 가져야 한다. 주로 계절적인 시간 척도 안에서 변하는 수증기 때문에  $C_{00}$ 의 변화( $\delta C_{00}$ )는 특히 해수면의 계절적 변동과 북반구와 남반구 사이의 질량 균형에 매우 중요하다. 이 결과는  $\delta C_{00}$ 가 기후변동과 관련된 대륙 규모의 질량 변화 연구에 꼭 고려되어야 함을 뜻한다.

주요어: GRACE, 평균 질량 변화, 수증기량

\*Corresponding author: seokiweon@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7779

Fax: +82-2-874-3289

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

2002년 4월 발사된 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 위성은 지구 중력 모델을 한 달 간격으로 제공하고 있다. 이 모델의 약 99%는 지체구조에 의한 중력 이상의 공간적 변화에 의한 것이며, 나머지 잔여 성분은 지구 표면의 질량 재배치

에 의한 중력의 시간 변화이다(Wahr et al., 1998). 지구 표면의 질량 재배치는 주로 대기압, 조석, 육상의 물수지, 해수면의 높이 그리고 극지방 빙하 변화 등에 의해 야기된다. GRACE 미션으로 인해 최초로 전지구적인 질량 변화에 의한 중력 측정이 가능해졌으며, 지난 10여 년간 기후 변화 연구에 많은 기여를 하였다(e.g., Chen et al., 2013).

GRACE가 제공하는 중력 모델은 구면 조화 함수의 계수로 표현이 된다. Center for Space Research (CSR)에서는 이 계수들의 degree와 order를 최대 60까지 사용하여 중력 모델을 구성하고 있다. 이는 GRACE를 이용하여 관측 가능한 중력 변화의 공간 해상도가 약 330 km임을 의미하며, 따라서 이와 연관된 질량 변화 연구 역시 매우 광역적인 규모에서 이루어져야 한다. 또한 큰 규모의 중력 변화는 낮은 degree의 구면 조화 함수의 계수에 의해 많은 영향을 받게 되는데, GRACE의 경우 degree 2 이상에 해당하는 중력 스펙트럼부터 관측이 가능하다. Degree 1의 계수( $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $S_{11}$ )들은 지구 질량 재배치에 의한 무게 중심의 위치를 표현하는 계수로서, GRACE처럼 두 개 위성간의 상대적인 거리 변화를 측정하여 중력 변화를 관측하는 방식에서는 그 값의 관측이 불가능하다. 따라서 이 계수들에 대한 값은 일반적으로 GRACE 관측 값과 기후 모델을 종합하여 간접적으로 추정하여 사용하고 있다(Swenson et al., 2008).

가장 낮은 구면 조화 함수 계수인  $C_{00}$ 는 지구의 평균 질량을 나타낼 때 사용된다. 일반적으로 지구 시스템은 닫혀(closed system) 있는 것으로 가정되며, 변하지 않는 지구 질량을 상징하고 있다. 따라서 시간에 대한  $C_{00}$ 의 변화량( $\delta C_{00}(t)$ )은 무시된다. 때문에 중력모델을 이용한 지구 질량 변화 관측은  $\delta C_{00}$ 를 제외한 degree 1부터 60까지의 구면 조화 함수의 계수를 사용하고 있다. 하지만 GRACE 원시 자료에 대한 전처리(pre-processing) 과정의 특성으로 인해  $\delta C_{00}$ 는 고려되어야 한다. 전처리 과정에서는 원시 자료에 포함된 대기질량에 의한 중력 변화 성분을 ECMWF의 모의 분석(operational analysis)을 이용하

여 제거한 후 중력모델을 계산한다(Flechtner et al., 2014). 이 과정에서 대기압 효과가 완벽히 제거된다면 GRACE 중력모델은 대기 효과 없이 지표면과 그 하부의 질량 변화만을 나타낼 수 있게 된다. 그러나 대기를 구성하는 여러 기체 요소들 중 지표면과 지속적으로 상호 교환되는 수증기의 영향도 함께 제거되기 때문에 수증기 이동에 의한 평균 질량 변화가 GRACE 중력모델에 포함되어야 한다. GRACE 자료를 이용한 지금까지의 연구들에서는 대기 성분이 제거된 후 지구 평균 질량 변화를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 GRACE 중력모델에 영향을 주는  $\delta C_{00}$  성분의 크기를 평가하고 지구 평균 질량 변화에 대한 기여도를 고찰하고자 한다.

## 자 료

### GRACE

CSR에서 제공되는 GRACE 중력 모델은 다음과 같은 구면 조화 함수의 계수인  $C_{lm}(t)$ ,  $S_{lm}(t)$ 로 표현된다.

$$N(\theta, \phi, t) = R \sum_{l=2}^{60} \sum_{m=1}^l \tilde{P}_{lm} [C_{lm}(t) \cos m\phi + S_{lm}(t) \sin m\phi] \quad (1)$$

이때  $N(\theta, \phi, t)$ 은 지오이드,  $R$ 는 지구 반경,  $\theta$ ,  $\phi$ 는 각각 여위도, 경도,  $\tilde{P}_{lm}(\cos\theta)$ 은 정규화된 버금 르장드르 다항식(normalized associated Legendre polynomial)이다. 시간  $t$ 는 2003년 1월부터 2013년 12월 동안 각 달(month)을 의미한다. 시간에 따라 변화하는 중력 성분을 분석하기 위해 11년간 평균 구면 조화 함수를 구하고, 그 값을 각 달의 구면 조화 함수에서 뺀 후, 잔여 구면 조화 함수의 계수,  $\delta C_{lm}(t)$ ,  $\delta S_{lm}(t)$ 를 구하면, 시간에 대한 지오이드의 변화,  $\delta N$ 을 구할 수 있다. 하지만 일반적으로 중력 변화 신호의 해석은 질량 변화를 확인하는 것이 주목적이기 때문에 식 (1)은 다음과 같이 질량 변화를 나타내는 함수로 변환하여 사용한다.

$$\delta\sigma(\theta, \phi, t) = \frac{R\rho}{3} \sum_{l=2}^{60} \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \frac{2l+1}{1+k_l} [\delta C_{lm}(t) \cos m\phi + \delta S_{lm}(t) \sin m\phi] \quad (2)$$

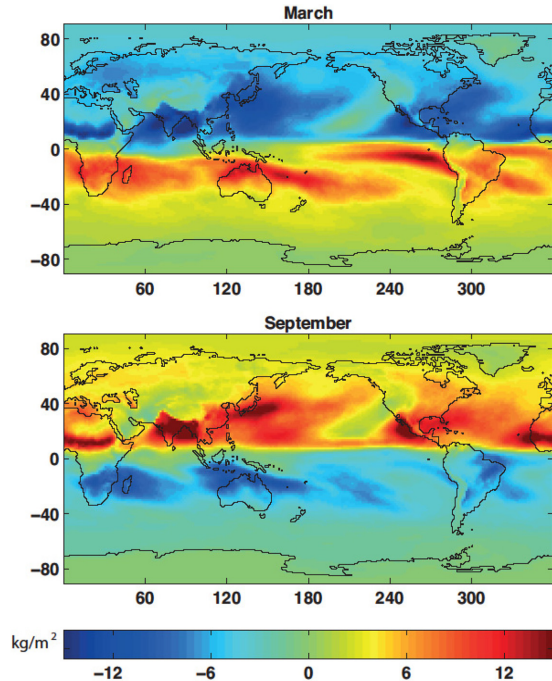
$\delta\sigma(\theta, \phi, t)$ 는 단위 면적당 질량(면밀도)의 변화(단위는  $\text{kg m}^{-3}$ )이며,  $\rho$ 는 지구의 평균 밀도,  $k_l$ 은 질량

하중에 의해 발생하는 지각 변형과 그에 따른 2차적인 중력 변화를 고려하기 위한 Love number이다.

식 (2)를 직접 사용하여 전체 지구의 질량 변화를 계산할 경우 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 낮아 해석이 매우 어렵다. 이는 GRACE 관측으로부터 얻어진  $C_{lm}$ ,  $S_{lm}$ 에 다양한 종류의 잡음들이 포함되어 있기 때문이다. 따라서 각각의 잡음 요소들을 먼저 제거할 필요가 있다. GRACE는 서편이동을 하면서 전지구(global)의 중력 변화를 탐지하는데, 동서 방향의 관측 간격이 남북 방향의 간격에 비해 매우 넓다. 때문에 빠르게 변화하는 중력의 시간변화가 왜곡되어 관측되는 알리아싱 에러(aliasing error)가 발생하고, 이 에러는 지구의 질량 변화 분포도상(spatial domain)에서 남북 방향의 띠무늬 형태로 나타나게 된다. 이 알리아싱 현상을 구면 조화 함수 영역(spherical domain)에서 관찰하면 단일 order의 홀수와 짝수 degree 계수들이 각각 따로 상관(correlated)되는 특이한 패턴을 이루고 있다. 이 에러를 제거하기 위해 order 12 이상의 구면 조화 함수 계수들을 홀수와 짝수 degree로 구분한 후, 3차 다항식으로 근사해 상관 관계 패턴을 제거하였다(Swenson and Wahr, 2006). 또한, GRACE 관측 시 포함되는 불규칙한 잡음은 가우시안(Gaussian) 필터를 구면 조화 함수와의 합성곱(convolution)을 통해 제거하였다.  $\delta C_{20}$ 는 지구 조석(solid tide)에 의한 알리아싱에 매우 취약하기 때문에, Satellite Laser Ranging 관측으로부터 얻어진 결과를 GRACE 관측치 대신 사용하였다(Cheng et al., 2013). Degree 1에 해당하는 계수( $\delta C_{10}$ ,  $\delta C_{11}$ ,  $\delta S_{11}$ )들은 GRACE를 통해 관측이 불가능하기 때문에 기후 모델을 추가로 사용하여 간접적으로 얻어진 자료를 사용하였다(Swenson et al., 2008). 마지막으로 후빙기 지각 융기에 의한 효과는 ICE-5G 모델을 이용하여 보정하였다(A et al., 2013). GRACE 자료처리에 관한 자세한 내용은 Seo (2011)에 기술되어 있다.

**ERA-Interim**

지구 표면의 평균 질량 증가(감소)는 대기 중의 수증기 질량 감소(증가)와 관련이 있기 때문에, 대기 중의 수증기량을 ERA-Interim 재분석장(reanalysis)을 이용하여 계산하였다(Simmons et al., 2007). Fig. 1은 2003-2013 동안 3월과 9월의 평균 연직 수증기 질량 변화이다. 3월과 9월의 평균 수증기량을 각각 계산하고, 이로부터 2003년부터 2013년 전체 기간의 평균값을 제거하여 그 변화량을 구하였다. 그 결과 대략적인 적도를 기준으로 남반구와 북반구의 계절



**Fig. 1.** Vertically integrated water vapor in March and September averaged from 2003 to 2013 after removing its mean values at each grid.

변화가 매우 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있다. 3월의 경우 북반구의 수증기량 감소와 남반구의 수증기량 증가의 크기가 서로 비슷하지만, 9월의 경우 북반구의 수증기량 증가가 남반구의 감소량 보다 매우 크다. 따라서 대기를 제외한 지구 평균 질량 역시 비슷한 계절적인 변동이 존재하리라 유추할 수 있다.

**결 과**

$\delta C_{00}$

ERA-Interim 재분석장의 총 수증기량(total column water)을 이용하여  $\delta C_{00}$ 를 계산하였다(Fig. 2a). Fig. 1에서 제시된 바와 같이 계절적 신호가 뚜렷이 관찰이 된다.  $\delta C_{00}$ 의 상대적 크기 비교를 위하여 낮은 차수의 띠조화함수(zonal harmonic) 계수인  $\delta C_{10}$ ,  $\delta C_{20}$ ,  $\delta C_{30}$ 도 Fig. 2b-d에 함께 도시하였다.  $\delta C_{10}$ 는 남반구와 북반구 질량 변화에 의해 지구 무게 중심이 자전축 방향을 따라 이동하는 현상을 나타내는 계수로서 지구 질량 변화를 설명하는 중력 모델에서 가장 중요한 성분 중 하나이다. 따라서  $\delta C_{00}$ 는  $\delta C_{10}$ 에 비해 상대적으로 그 효과가 작다. 그러나  $\delta C_{00}$ 는

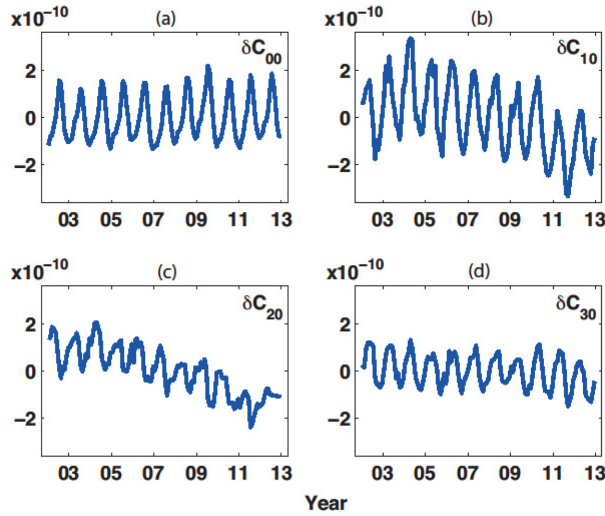


Fig. 2. Time-varying zonal harmonic coefficients.

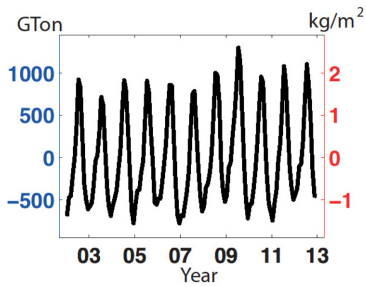


Fig. 3. Total mass change associated with  $\delta C_{00}$  and its surface mass density.

다른 zonal harmonic 계수인  $\delta C_{20}$ 와  $\delta C_{30}$ 에 비해 상대적으로 큰 진폭을 가지고 있으며, 특히 계절 변동에 있어서는 그 효과가 매우 뚜렷함을 확인할 수 있다.

**$\delta C_{00}$ 에 의한 지구 표면 질량 변화**

그동안 고려되지 않았던  $\delta C_{00}$  성분을 전지구 중력 변화 모델에 추가할 경우 지구 질량 재배치에 미치는 영향을 계산하였다. GRACE로부터 얻어지는 전지구 중력 모델은 대기 효과를 포함하지 않기 때문에, 지구 질량 변화 역시 대기 질량을 포함하지 않은 나머지 지구 질량 변화를 의미한다. Fig. 3은  $\delta C_{00}$ 에 의한 지구 총 질량의 변화를 도시한 것이다. 지표면과 대기의 질량 교환에 의해 계절적으로 약 1000 Gt의 지구 질량 변화가 발생하고 있다. 지구의 면적을 고려한 평균 질량의 변화는  $1\text{ m}^2$  당 약 2 kg 정도로

그 효과가 작지만 광역 규모의 분석에서는  $\delta C_{00}$ 에 의한 질량 변화의 영향을 반드시 고려해야만 한다.

광역 규모에서의  $\delta C_{00}$ 에 의한 질량 변화 효과를 확인하기 위해 대륙과 해양 그리고 북반구와 남반구의 지구 질량 재배치를 분석하였다.  $\delta C_{00}$ 의 경년변화나 선형변화 신호가 작기 때문에 우선적으로 계절변화 성분만 추출하였다. Fig. 4의 붉은색 선은  $\delta C_{00}$ 를 고려하여 대륙과 해양의 질량 변화에 대한 계절성분을 도출한 것이며, 푸른색 선은  $\delta C_{00}$ 를 고려하지 않았을 경우의 값이다. 대륙에서는 두 경우의 차이가 크지 않으나 해양에서는  $\delta C_{00}$ 가 계절 변화 신호에 적지 않은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 특히 해양 질량 변화의 차이는 6-8월 사이에 최대가 된다. 이는 향후 전지구 해수면의 계절 변화 연구에 있어서  $\delta C_{00}$ 에 의한 효과를 고려해야 보다 정확한 결과를 도출할 수 있음을 의미한다.

북반구와 남반구의 질량 변화 비교에서는  $\delta C_{00}$ 의 필요성이 더욱 확연히 드러난다(Fig. 5). Fig. 5a는  $\delta C_{00}$  보정을 하지 않았을 경우 북반구(붉은색)와 남반구(푸른색)의 계절적인 질량 변화를 보여준다. 북반구와 남반구의 질량 변화 위상은 정확히 반대이며, 이는 북반구의 질량 증가(감소)와 남반구 질량 감소(증가)가 즉각적으로 이루어짐을 뜻한다. 하지만  $\delta C_{00}$ 를 고려할 경우(Fig. 5b), 북반구와 남반구 사이의 질량 변화 양상은 Fig. 5a와 매우 다르다. 예를 들면 북반구 질량은 4월부터 9월 사이에 꾸준한 증가를 보이는 데 반해, 남반구에서는 4월부터 7월까지 질량

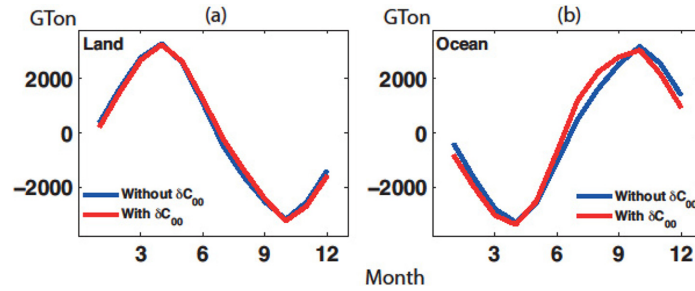


Fig. 4. Seasonal mass variations in land (a) and oceans (b) with and without  $\delta C_{00}$ .

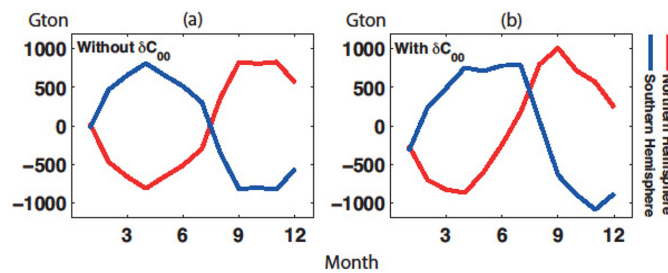


Fig. 5. Seasonal mass variations in Northern and Southern hemisphere with (a) and without (b)  $\delta C_{00}$ .

변화가 거의 일어나지 않는다. 반면 7월 이후에 남반구 질량이 급격히 감소를 하고 12월에 다시 증가를 시작한다. 또한 북반구의 질량 증가(감소)와 남반구의 질량 감소(증가)는 약 2개월의 위상 차이가 있다. 이러한 현상은 지구 평균 질량의 계절변동에 그 원인이 있으며, 향후 GRACE 중력 모델을 이용한 대륙 규모의 질량 변화 연구 시  $\delta C_{00}$  보정이 필요함을 시사한다.

### 토론 및 결론

지구는 닫힌계이므로 대기를 포함한 전체 지구 시스템의 질량의 변화는 없어야 한다. 하지만 대기 질량을 고려하지 않을 경우, 지구 전체의 평균 질량 변화가 발생한다. 특히, 지구 표면과 대기 사이에 이동하는 수증기는 대기의 질량 변화를 유발시키고 그에 따라 지구 표면에서의 질량 변화 원인이 된다. GRACE 중력 자료는 대기 질량이 제거된 잔여 중력 변화를 의미하며, 따라서 대기 질량의 효과로 인해 GRACE 중력모델에서 지구 전체 평균 질량의 변화를 포함시켜야 한다. 본 연구에서는 지구 중력 변화와 그와 연관된 질량 변화에 대한 선행 연구 사례에서 그동안 고려되지 않았던 지구 평균 질량의 변화 성분,  $\delta C_{00}$ 를 ERA-Interim 재분석장을 이용하여 계

산하고 이에 대한 효과를 고찰하였다.  $\delta C_{00}$ 는 계절 변동이 우세하며 경년 변화나 장기 선형 변화는 상대적으로 매우 작다. 또한  $\delta C_{00}$ 에 의한 전체 지구의 질량 변화는  $1\text{ m}^2$ 당 약  $2\text{ kg}$  정도로 다른 질량 변화 성분에 비해 매우 작지만, 광역 규모의 질량 변화 연구에는 반드시 고려해야 한다. 특히 남반구와 북반구의 계절적인 질량 재배치에는 매우 큰 영향을 보이고 있다.  $\delta C_{00}$ 가 포함된 GRACE 중력 모델의 이용은 향후 기후 변동과 관련된 대륙 규모의 질량 재배치나 해수면 변화 연구의 정확도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 한국 연구 재단(NRF-2013R1A1A2008368)의 지원을 받았습니다.

### References

A, G., Wahr, J., and Zhong, S., 2013, Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: An application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophysical Journal International*, 192, 557-572, doi:10.1093/gji/ggs030.

- Chen, J.L., Wilson, C.R., and Tapley, B.D., 2013, Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. *Nature Geoscience*, 6, 549-552.
- Cheng, M.K., Ries, J.C., and Tapley, B.D., 2013, Geocenter variations from analysis of SLR data. In Altamimi, Z. and Collilieux, X. (eds.), *Proceedings of reference frames for applications in geosciences*, International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Germany, 19-25.
- Flechtner, F., Dobsław, H., and Fagiolini, E., 2014, AOD1B product description document for product release 05. GFZ German Research Centre for Geosciences, GR-GFZ-AOD-0001, 11 p.
- Seo, K.-W., 2011, Data reductions of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) gravity solutions and their applications. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32, 586-594. (in Korean)
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., and Kobayashi, S., 2007, ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, 110, 25-35.
- Swenson, S. and Wahr, J., 2006, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letter*, 33, 8, L08402.
- Swenson, S., Chambers, D., and Wahr, J., 2008, Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *Journal of Geophysical Research*, 113, B08410.
- Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F., 1998, Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research*, 103, 30205-30229.

---

Manuscript received: October 13, 2014

Revised manuscript received: November 13, 2014

Manuscript accepted: November 13, 2014