

Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

중력자료 해석을 위한 자료 처리 및 응용

서기원*

극지연구소 지구시스템연구부, 406-840, 인천광역시 연수구 송도동 7-50

Data Reductions of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Gravity Solutions and Their Applications

Ki-Weon Seo*

Division of Polar Earth System Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

Abstract: Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), launched in April, 2002, makes it possible to monitor Earth's mass redistribution with its time-varying gravity observation. GRACE provides monthly gravity solutions as coefficients of spherical harmonics, and thus ones need to convert the gravity spectrum to gravity grids (or mass grids) via the spherical harmonics. GRACE gravity solutions, however, include spatial alias error as well as noise, which requires to suppress in order to enhance signal to noise ratio. In this study, we present the GRACE data processing procedures and introduce some applications of time-varying gravity, which are studies of terrestrial water storage changes, Antarctic and Greenland ice melting, and sea level rise. Satellite missions such as GRACE will continue up to early 2020, and they are expected to be an essential resource to understand the global climate changes.

Keywords: GRACE, gravity, climate change

요약: 2002년 4월에 발사된 Gravity Recovery and Climate Experiment(GRACE) 위성의 중력시간변화 측정을 통해, 기후 및 환경 변화에 의한 지구 내 질량 재배치 연구가 가능해 졌다. GRACE 중력 자료는 구면조화 함수의 계수인 중력 스펙트럼 형태로 제공이 되며, 이를 구면조화 함수를 이용하여 원하는 지역의 중력 변화 또는 질량 변화로 환산을 해야 한다. 하지만, GRACE 중력 자료는 측정 잡음 이외에도 공간적인 알리아스 에러가 존재하여, 질량 재배치 효과를 확인하기 위해서는 중력 스펙트럼의 처리 과정이 필요하다. 이 연구에서는 GRACE 자료를 처리하는 가장 일반적인 방법을 소개하고, 처리된 중력 자료를 이용한 연구 사례를 소개하였다. GRACE 중력 자료를 이용하여 광범위한 지구과학 연구가 진행 중이지만, 그 중 가장 활발한 연구 분야인 육지의 물수지 연구, 빙하 변화 연구 그리고 해수면 상승 연구 등을 중심으로 소개하였다. GRACE 위성과 유사한 인공위성 중력 관측 사업이 2020년까지 계획되어 있으며, 향후 수십년간 추적된 인공위성 중력 자료는 지구 환경 변화 연구에 핵심적인 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: GRACE, 중력, 기후변화

서론

2002년 4월에 발사된 Gravity Recovery and Climate Experiment(GRACE)위성은 전 지구 중력 스펙트럼을 한 달 간격으로 측정하고 있다. 측정된 중력장의 평균값은 전체 지구 중력의 약 99%를 차지

하는 지체구조에 의한 중력 효과가 반영되며, 평균 중력장을 뺀 잔여 성분은 중력의 시간변화를 나타낸다. 이는 지구의 질량이 시공간적으로 고정되어 있지 않고 여러 가지 현상에 의해서 재배치되고 있음을 의미한다. 지구 질량의 재배치는 지각권, 대기권, 수권 그리고 빙권 등 지구과학에서 연구하는 거의 모든 영역에서 발생한다. 대표적으로 2004년 수마트라-안다만 대지진을 유발시킨 단층대에서의 중력 변화(Han et al., 2006), 육지에서의 물수지 변화(Seo et al., 2006), 해수면 상승(Cazenave et al., 2008), 극지

*Corresponding author: seo.kiweon@kopri.re.kr
Tel: +82-32-260-6389
Fax: +82-32-260-6218

방 빙하 유실(Velicogna and Wahr, 2006) 등이다. GRACE 위성 사업은 2007년에 종료될 예정이었으나, 위성의 상태가 매우 양호하고 관련 연구 성과의 중요성이 반영되어 현재까지도 성공적으로 중력 자료를 제공하고 있다. 특히, 2016년에 GRACE와 동일한 위성을 발사할 계획이 수립되었으며, 2020년경에는 현재 GRACE 위성보다 한 단계 진보된 후속 위성을 발사할 계획이 논의 중이다. 따라서, 지구중력장 변화 자료가 2000년 초반부터 길게는 2020년 후반까지 연속적으로 측정됨으로써 측지학을 포함한 지구과학 전반에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

광역적인 중력 자료는 그동안 전통적인 지구물리학 또는 측지학의 영역으로 해석되어 왔다. 하지만, 중력의 시간 변화량을 포함하는 GRACE 중력 자료는 지구물리 측지학을 기초로 기후현상 및 기타 지구과학 전 분야로 활용되고 있다. 실제로, 미국 지구물리학회(AGU)를 비롯한 국제 학술대회에서는 측지학과 기후관련 분야의 연합 세션이 지속적으로 개최가 되는 등 측지학이 여타 지구과학 현상을 이해하는 매우 중요한 도구로 인식되고 있는 상황이다. 하지만, 국내 학계에서는 측지학을 중심으로 하는 다학제간 연구가 매우 제한적으로 이루어지고 있다. 따라서, 이 논문에서는 중력의 시간 변화량을 위한 자료 처리 과정, 그리고 처리된 자료를 다양한 관점에서 해석하는 사례를 소개하고자 한다.

GRACE 자료

GRACE는 고도 약 500 km, 경사각 89도의 극궤도 위성인데, 두 개의 쌍둥이 위성이 약 200 km 간격으로 떨어져 있다. 지구 질량 이상에 의한 중력변화는 인공위성 간의 거리와 거리 변화량을 변동시키게 되는데, 마이크로 파장대의 간섭계를 이용하여 이 변화량을 측정함으로써 지구 중력장을 측정할 수 있다 (Tapley et al., 2004). 중력변화 이외에 위성 궤도상의 마찰 등에 의한 효과에 기인한 궤도 변화는 위성 내부의 가속도계를 통하여 보정이 가능하다. 그 이외에도 GPS, Star Camera 등의 관측값이 이용된다. 측정된 관측값들은 한 달 단위로 묶여 중력장의 스펙트럼으로 구해진다. 현재 CSR(Center for Space Research, University of Texas at Austin, USA), JPL(Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA), GFZ(Geo Forschungs Zentrum, Germany)에서 측정 자료를 처리하여 중력 스펙트럼

으로 계산을 한 후 NASA의 누리집(<http://podaac.jpl.nasa.gov>)을 통해 제공되고 있다. 중력 스펙트럼은 구면조화 함수의 계수로 표현이 된다. 한 달 간격으로 제공되는 구면조화 함수의 계수의 평균값을 뺀 시간에서의 중력 잔여 성분은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\Delta C_{lm}^d = C_{lm}^d - E[C_{lm}^T]_{T=1,P}, \quad \Delta S_{lm}^d = S_{lm}^d - E[S_{lm}^T]_{T=1,P} \quad (1)$$

C_{lm}^d, S_{lm}^d 은 각각 구면조화 함수의 코사인, 사인 항이며, E 는 평균값을 의미한다. l, m 은 구면조화 함수의 degree와 order이며 각각 중력 스펙트럼의 파수와 방향성을 나타낸다. 이렇게 구해진 구면조화 함수의 잔여 성분을 이용하여 지오이드의 변화 성분(ΔN)을 구면조화 함수를 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta N = R_m \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) (\Delta C_{lm}^d \cos(m\phi) + \Delta S_{lm}^d \sin(m\phi)) \quad (2)$$

여기서, R_m 은 지구의 평균 반지름, \tilde{P}_{lm} 은 정규화된 Associated Legendre Polynomial, θ, ϕ 는 각각 위도와 경도이다. 중력(또는 지오이드)의 시간변화는 주로 물의 이동에 의해 발생하기 때문에, 일반적으로 식 (2)는 물의 두께(Δh)로 다시 계산이 가능하다 (Wahr et al., 1998).

$$\Delta h = \frac{R_m \rho_w R_m}{3} \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^l \tilde{P}_{lm}(\cos \theta) \frac{2l+1}{1+k_l} (\Delta C_{lm}^d \cos(m\phi) + \Delta S_{lm}^d \sin(m\phi)) \quad (3)$$

ρ_w 은 물의 평균 밀도, k_l 은 load Love number이며, 지표면에 발생하는 질량 재배치에 의한 지각의 수직 변위를 고려하기 위함이다.

식 (1)-(3)을 이용하여, 2007년 9월의 지오이드와 물의 변화량을 CSR 중력 자료를 이용하여 Fig. 1에 도시를 하였다. 왼편은 지오이드의 변화를 mm 단위로 표현한 것이고, 오른편은 물의 두께 변화를 역시 mm 단위로 나타낸 것이다. 먼저, 물의 두께의 경우 지오이드에 비해 고주파 성분이 강하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 지오이드와 물의 두께 변화량 모두 남북 방향의 경향성이 선명하게 보인다. 이러한 경향성은 GRACE 위성이 측정 한계에 따른 공간적인 אלי아스 에러이다(Seo et al., 2008). GRACE 위성은 중력변화 신호를 궤도상에서 제한적으로 측정을 하기 때문에

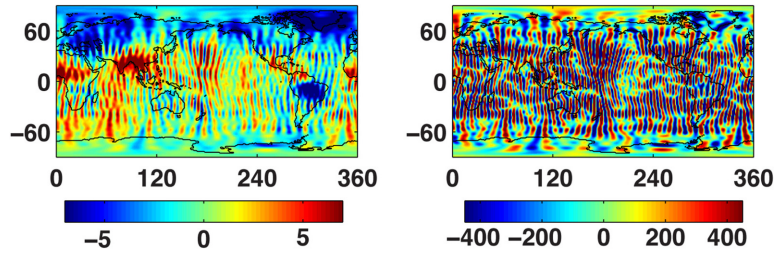


Fig. 1. Geoid (left panel) and water thickness (right panel) variations at Sep. 2007 from GRACE monthly gravity solutions. Units are mm of geoid and mm of water.

지구 중력의 전체 변화를 동시에 관측할 수 없다. 이는 실제 지구 중력의 변화는 GRACE 위성이 궤도상에서 중력을 측정하는 동안에 다른 지역에서도 지속적으로 변화를 하기 때문이다. 특히, 이러한 문제는 조석신호나 대기, 해양의 경우처럼 상대적으로 빠르게 변화하는 신호에서는 그 에러가 더욱 커지게 된다. 따라서, 실제 GRACE 중력 자료에서는 대기, 해양 그리고 조석 모델을 이용하여 그 신호를 사전에 제거시키는 과정이 필요하다. 대기와 해양의 경우 Atmospheric Ocean de Aliasing(AOD) 모델을 이용하며, 해양 조석의 경우 FES2004 모델을 사용한다. 사용된 모델들이 완벽히 신호를 제거시키게 된다면, Fig. 1에서 보여지는 것과 같은 남북 방향의 경향성은 보여지지 않지만, 모델의 가지고 있는 에러에 의해 잔여 신호가 남게 되고 이 잔여 신호가 공간적인 알리아스를 생성시킨다. 알리아스 에러 이외에도 GRACE 위성 관측시 발생하는 잡음 역시 포함이 된다.

GRACE 자료 처리

공간적인 알리아스와 잡음을 포함하고 있는 GRACE 중력자료는 Fig. 1과 같이 지구물리적인 신호보다 매우 크기 때문에 여러 가지 후처리 과정이 요구가 된다. 제 3장부터는 GRACE 위성 자료의 후처리 과정을 알아보려고 한다.

GRACE가 제공하는 중력 스펙트럼은 degree 2항부터 제공된다. degree 0항 ΔC_{00} 은 지구의 평균 중력에 관한 항으로, 지구 질량이 보존되기 때문에 무시 가능하다. degree 1항(ΔC_{10} , ΔC_{11} , ΔC_{12})은 지구의 무게 중심 변화에 의한 중력 변화이다. 지구의 무게 중심은 계절적으로 그 변위가 크게 발생을 하게 되지만(Blewiit et al, 2001), GRACE 처럼 두 위성간의 궤도 변화를 관측하면서 중력을 측정할 경우 무게

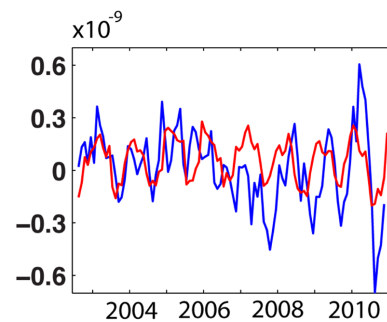


Fig. 2. Time series of observed by GRACE (blue line) and SLR (red line).

중심에 의한 변화를 측정할 수 없다. degree 1항을 GRACE 이외의 관측자료와 모델 자료를 이용하여 GRACE 중력 자료에 추가할 수 있는데(Swenson et al, 2008), 측정되는 degree 1항의 오차 역시 매우 커서 광범위하게 사용되고 있지 않다. 이러한 배경에서, 이 연구에서는 GRACE가 측정하지 못하는 degree 0와 degree 1 항은 고려하지 않았다.

GRACE가 측정하는 중력 자료 중에서 degree 2항이 가장 저주파에 해당한다. 하지만, degree 2항 중 ΔC_{20} 항은 반일 주기 조석신호에 의한 알리아스 에러가 심각하게 영향을 주고 있음이 밝혀졌다(Seo et al., 2008). Fig. 2는 GRACE가 측정한 ΔC_{20} 와 Satellite Laser Ranging(SLR)(Cheng and Tapley, 2004)로 측정한 ΔC_{20} 의 값을 비교한 것이다. 붉은색의 SLR을 이용한 ΔC_{20} 는 계절적인 신호가 강하게 나타나는 반면, 파란색의 GRACE를 이용한 ΔC_{20} 는 붉은색과는 다르게 계절적 신호가 약하고, 신호의 연간 변화가 강하게 나타난다. 실제, ΔC_{20} 처럼 저주파의 중력 변화는 위성의 고도가 높은 SLR이 정확하게 측정을 하고 있음이 알려져 왔다(Cheng and Tapley, 2004). 그러므로, SLR과 GRACE ΔC_{20} 의 차이는 바로, GRACE에 포함된 장주기 알리아싱에 의

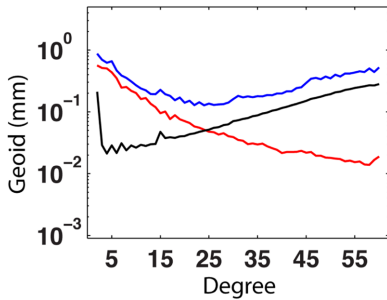


Fig. 3. RMS degree amplitudes of GRACE time varying gravity components (blue line), its formal error (black) and synthetic gravity calculated from numerical models.

한 에러이며 특히, ΔC_{20} 가 다른 구면조화 함수 성분에 비해 많은 에러가 포함하고 있기 때문이다(Seo et al., 2008). 따라서, GRACE 중력자료를 처리할 때 ΔC_{20} 의 값은 SLR ΔC_{20} 을 사용한다.

남북 방향의 방향성을 가지는 알리아스 에러

GRACE 자료의 전처리 과정에서, 육지 물의 재배치에 기인한 중력신호만을 해석하기 위해 AOD와 조석 모델을 이용하여 대기와 해양 그리고 조석 신호를 사전에 제거한다. 만약 사용된 지구물리 모델들이 완벽하여 그 신호를 모두 성공적으로 제거한다면, 전처리 과정이 끝난 GRACE 자료는 물의 재배치에 의한 중력 신호와 측정기기의 잡음에 의한 에러만 남게 된다. 하지만, 실제 사용되는 지구물리 모델들은 대기와 해양에서의 질량 재배치를 완벽하게 표현할 수 없으므로, 잔여 신호에 의한 알리아스 에러가 발생한다. 특히, GRACE 위성은 위도 방향으로는 조밀하게 측정을 하지만, 경도 방향으로는 측정 간격이 크기 때문에 남북 방향의 줄무늬를 가지는 알리아스 에러가 관찰이 된다(Fig. 1). GRACE 알리아스 에러를 이해하기 위해, 각 degree에서의 중력 spectrum의 크기를 지오이드 단위로 Fig. 3에 표현하였다. 파란색은 GRACE가 실제로 관측한 2004년 1월부터 2009년 12월 사이의 중력 spectrum의 root mean squared(RMS) 값이다. Degree 15, 30, 45 부근에서 중력 spectrum의 값이 주위보다 큼을 알 수가 있으며 이는 공간적으로 발생하는 알리아스 에러이다(Seo et al., 2008). 반면, 수치 모델 등을 통하여 계산된 중력변화의 예상 신호는 붉은색과 같은 spectrum을 보이며, GRACE 관측치들로부터 계산된 잡음은 검은색의 spectrum을 나타낸다. 따라서, 파란선의 경우처

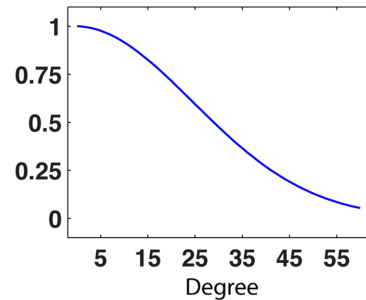


Fig. 4. Shape of Gaussian filter which drops the amplitude a half at 400 km radius.

럼 degree가 증가하면서 그 spectrum이 증가 하는 것은 실제 신호가 아니라, GRACE 위성의 공간적인 측정 한계에 의한 알리아스 에러와 잡음의 영향이다.

알리아스 에러의 경우는 남북 방향의 줄무늬 형태의 공간적인 양상을 보이는 반면 GRACE위성의 잡음은 같은 위도 상에서 경도방향으로 같은 크기를 보이고 또한 고위도로 갈수록 인공위성의 측정이 조밀해지면서 잡음이 줄어드는 특징이 있다. 알리아스 에러의 이해가 부족했던 GRACE 관련 연구 초기에는 고주파 영역에서 발생하는 에러를 기기의 잡음에 의한 효과로만 판단을 하여 단순히 공간적으로 등방성인 저주파 통과 필터를 개발하여 고주파 영역대의 잡음을 제거하였다. 가장 대표적으로 사용되는 저주파 필터는 Gaussian 필터로 고주파(높은 degree)의 중력 spectrum을 감쇄시키고 저주파(낮은 degree)를 통과시킨다. 이때, 주어진 degree내에서 모든 order 값들을 일정하게 유지시켜 공간적으로 등방성임을 가정하게 된다. Fig. 4는 Gaussian 필터의 한 예로, 진폭이 1/2로 떨어지는 곳이 중심으로부터 300 km인 경우에 해당한다.

공간적인 알리아스 에러의 가장 큰 특징은, order가 같을 경우, 짝수와 홀수 degree의 패턴이 서로 반대로 나타난다. Fig. 5a의 검은 선은 order가 15일 경우 degree의 변화에 따른 중력 계수의 변화를 보여주고 있는데, 짝수 degree와 홀수 degree가 서로 교대로 변화를 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특징은 실제 순산 모델링을 통해 지구물리 신호가 아닌 위성 궤도의 공명에 의한 공간적인 알리아스 에러임이 밝혀졌다(Seo et al., 2008). 따라서, 공간적으로 관련성이 있는 알리아스 에러를 감쇄시키기 위해 짝수와 홀수 degree의 계수들을 따로 분리시키고, 그 계수들을 다항식으로 근사를 시켜 근사된 값들을 제거시키

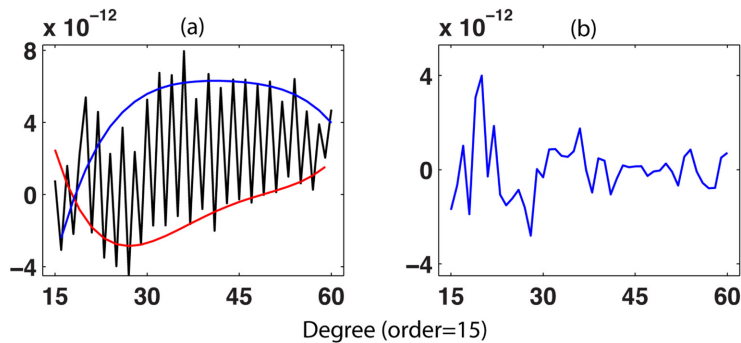


Fig. 5. (a) Variations of cosine terms in spherical harmonic coefficients representing GRACE gravity time varying solutions. There exist a correlated pattern between odd and even degrees at order equals 15. Blue and red lines are 4th order polynomial fit to the odd and even degree coefficients. (b) Residual spherical harmonic cosine coefficients after removing the alias in (a).

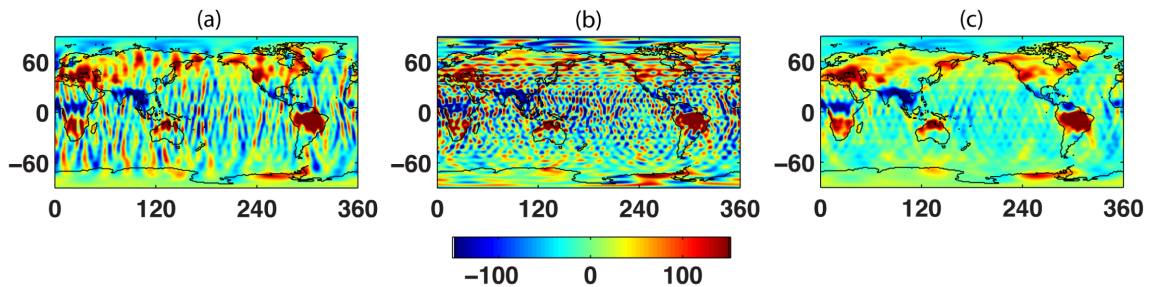


Fig. 6. Water thickness variations after different filters applied. (a) is after removing the spatial alias, (b) is using the 300 km Gaussian filter and (c) is after applying both Gaussian filter the and alias reduction. Unit is mm of water.

는 방법이 사용되고 있다(Swenson and Wahr, 2006). Fig. 5a에서 붉은색과 파란색은 각각 홀수와 짝수 degree 계수들의 변화를 4차 다항식으로 근사를 시킨 결과이다. 전반적으로 알리아싱 에러의 공간적인 양상을 잘 표현하고 있다. 좀 더 정확한 근사를 위해 다항식의 차수를 높이거나 degree의 간격을 2개 이상으로 나누어서 근사를 하는 방법이 있다. Fig. 5b는 다항식으로 근사된 계수값을 뺀 잔여 계수 값이다. 짝수와 홀수 degree값들이 교대로 보여주는 공간적인 양상이 성공적으로 제거가 되었다. 하지만, Fig. 5b가 보여주는 것은 실제 신호에 의한 중력 계수의 값과 다항식 근사값의 오차 값 등이 포함된 것이며, 또한 다항식으로 근사를 시키는 과정에서 실제 중력 신호 값 역시 제거가 되기 때문에, 향후 알리아싱 에러를 감쇄시키는 좀 더 많은 연구의 필요성이 있다. 중력계수중 order가 8 이상인 경우 알리아싱 에러가 신호보다 많이 포함되었다고 여겨지며, 따라서 order가 8보다 작은 경우는 알리아싱 에러를 제거시키지 않는다.

Gaussian 필터를 이용해도 역시 고주파 영역에서의 알리아싱 에러를 감쇄시킬 수 있다. 하지만, Gaussian 필터는 등방성의 성질을 가지고 있기 때문에, 알리아싱 에러가 많이 포함된 order 성분을 감쇄시키기 위해서 상대적으로 알리아싱이 적게 포함된 중력 계수까지 과도한 필터링을 요구하기 때문에 Gaussian 필터만으로 적절히 알리아싱 에러를 제거시킬 수 없다. 현재, GRACE의 알리아싱 에러와 잡음을 줄이기 위해, 우선 다항식 근사를 이용하여 알리아싱 에러를 제거한 후, 잡음 감소를 위한 Gaussian 필터를 순차적으로 적용한다. Fig. 6은 GRACE자료로부터 2007년 9월달의 지구 질량 재배치(주로 물에 의한)를 나타낸 그림이다. Fig. 6a는 진폭이 중심에서 300 km 지점에서 1/2로 감소되는 Gaussian 필터를 이용해서 고주파 영역의 알리아싱과 에러를 제거시켰을 경우, Fig. 6b는 다항차 근사식을 통해 알리아싱 에러만을 제거시킨 경우, 그리고 Fig. 6c는 알리아싱 에러를 먼저 제거하고, 300 km Gaussian 필터를 추가로 적용시킨 경우이다. Fig. 6a와 6b의 경우 각각 남북 방

향의 줄무늬를 비롯한 에러가 많이 포함되어 지구물리 신호 해석이 어렵다. 하지만, Fig. 6c는 고주파 영역의 잡음이 충분히 제거되어 지구 질량의 변화가 확인이 가능하다. 하지만, 각각의 연구 목적에 맞게 알리아스 에러를 제거시키기 위한 다항식을 order 8 보다 더 큰 경우에만 적용을 시키거나, 300 km Gaussian 필터와 다른 필터를 이용할 수도 있다.

GRACE 자료의 활용 및 해석

광역적 규모의 물수지 연구

광역적 규모의 육지 물수지 변화는 기후 및 환경 변화를 이해하는 중요한 인자중의 하나이다. 광역적 규모의 토양수 및 지하수의 변화는 몇몇 지역의 경우(예를 들어, 미국의 High Plain 대수층) 지하수와 토양수 등의 측정을 통해서 관측이 되고 있으나, 대부분의 경우는 실측이 이루어지고 있지 않고, 수치 모델 등을 적용하고 있는 상황이다. GRACE가 측정하는 중력변화의 경우 물의 재배치에 의한 효과가 대부분이며, 따라서 2002년 이후부터는 GRACE를 이용하여 물수지 변화의 연구가 새롭게 진행이 되고 있다. 초기 물수지 변화 연구는 GRACE 자료를 이용하여 육지 물의 양의 변화를 측정하고, 수치 모델과 비교하는 연구가 주를 이루었으나, 현재에는 GRACE가 측정한 물수지 값과 다른 자료들을 융합하여 그동안 알려지지 않았던 새로운 수리화적인 자료를 만들어 내고 있다(Seo et al., 2009). 이번 연구에서는 각 대륙별 대표적인 4개 분지에서 GRACE가 측정한 물수지 변화를 제시하고자 한다. Fig. 7은 아마존(남아메리카), 메콩(아시아), 콩고(아프리카), 유콘(북아메리카)강 분지의 위치를 나타낸다. 각 분지에서 GRACE 자료로부터 추출한 물수지 변화는 Fig. 8에 제시되었다. 이전 장에서 기술했듯이 알리아스 에러는 order 8 이상부터 제거를 시켰고, 300 km Gaussian 필터를 적용하였다. 아마존과 콩고 분지의 경우 연간 물수지 진폭이 약 200 mm 가량 변화하며, 아마존은 2003년 이후로 물수지가 증가하고 있는 반면, 콩고의 경우는 반대로 감소하고 있음을 알 수 있다. 메콩 분지의 경우 아마존이나 콩고 분지보다는 연간 진폭이 작으나, 우기때 급격히 물수지가 증가하고 있음을 알 수 있다. 유콘 분지의 경우 알래스카 지역의 빙하 지대를 포함하고 있어 빙하의 유실에 의한 영년변화가 확인된다(Tamisica et al., 2006). Fig. 8의 시계열에서

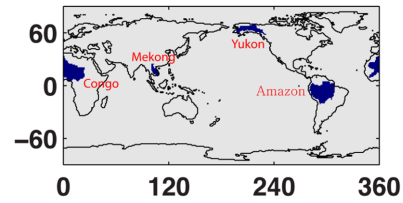


Fig. 7. Geographical location of four basins, Amazon, Congo, Mekong and Yukon.

알 수 있듯이 GRACE가 관측하는 광역적 규모의 물수지 변화는 분지의 지형적/기후적 특징이 잘 반영이 되며, GRACE 위성을 통한 장기 관측이 필요하다.

남극과 그린랜드의 빙하 유실

육지 물수지 변화 이외에, GRACE 위성을 활용한 대표적인 응용 분야는 남극과 그린랜드의 빙하 유실 연구이다(Velicogna and Wahr, 2006). 상대적으로 작은 규모의 빙하의 mass balance는 InSAR(Rignot and Thomas, 2002)를 비롯한 원격탐사 방법이나 실측 자료를 통하여 수행되어져 왔다. 하지만, 남극이나 그린랜드와 같은 대륙규모의 빙하 mass balance는 GRACE를 이용한 중력 변화를 관측함으로써 보다 직접적으로 파악이 된다. 남극과 그린랜드의 mass balance 연구는 기본적으로 광역적인 규모에서 분지의 물수지 연구와 다르지 않다. 하지만, 고위도 지방의 mass balance을 이해하기 위해서는 얼음의 질량 변화에 의한 중력 효과 이외에도 지각의 융기에 의한 추가적인 중력 효과를 보정해야 얼음에 의한 mass balance을 이해할 수 있다. 마지막 빙하기 이후에 고위도 육지에 쌓여 있던 빙하가 바다로 유입되면서, 빙하가 있었던 육지에서는 지각 평형을 이루기 위해 지각 융기가 진행되고 있다. 지각 융기에 의한 신호를 제거하기 위해 GIA(Glacial Isostatic Adjustment) 모델(Paulson et al., 2007)을 이용하여 그 신호를 제거시킨다. Fig. 9는 GIA 모델이 예측한 지각 융기 효과를 물의 두께 단위로 환산한 결과이다. 빙하에 의한 지각 융기 현상이 가장 두드러지는 곳은 캐나다 동북부, 스칸디나비아 반도, 서남극 지역이다.

남극과 그린랜드 지역의 mass balance 연구를 위해 알리아스 에러와 잡음을 제거하는 동안, 신호의 공간적인 해상도가 낮아지면서, 얼음에 의한 신호가 바다쪽으로 넓게 분포되는 leakage 에러가 발생하게 된다. 바다쪽으로 잃어버리는 leakage 에러를 보정하기 위해, 그린랜드와 남극에서 구한 질량 변화 값에

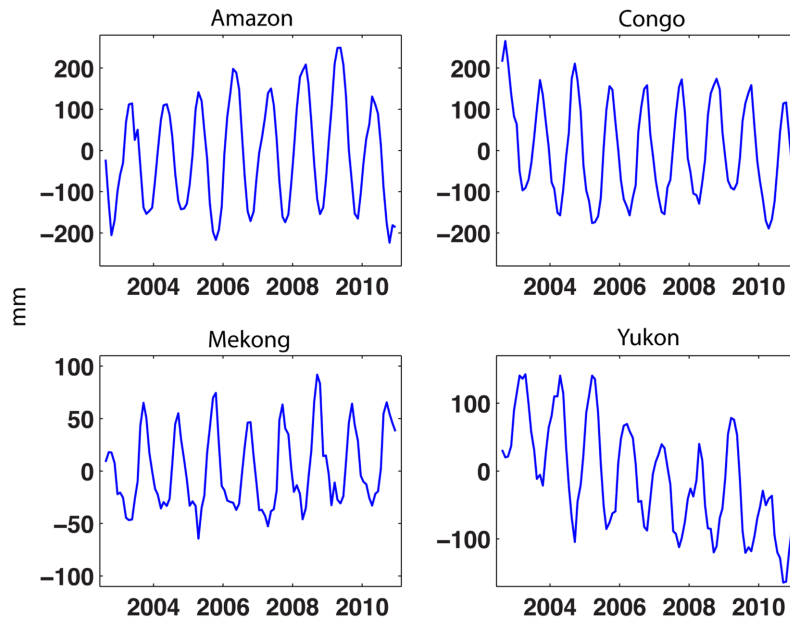


Fig. 8. Water thickness variations observed by GRACE at the four basins.

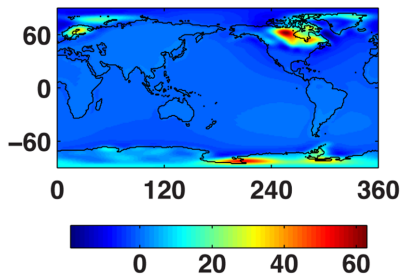


Fig. 9. Vertical displacement due to the Glacial Isostatic Adjustment (GIA) and it is converted to equivalent of water thickness (Paulson et al., 2007).

일정 값(scale factor)을 곱하는 추가적인 작업이 필요하다. Scale factor는 가상된 신호를 남극과 그린랜드에 부여를 하고 그 신호가 알리아스 에러와 잡음 제거시 얼마만큼 감소가 되는지 계산하는 방법으로 구할 수 있다. 현재 알려진 그린랜드와 남극에 적용되는 scale factor는 각각 2와 1.6이다(Velicogna, 2009). Fig. 10은 남극과 그린랜드의 빙하질량 변화량을 보여준다. 파란색은 알리아스 에러를 제거한 후 Gaussian 필터를 적용시켜 잡음을 줄인 자료로부터 얻어진 빙하의 질량 변화 신호이며, 붉은색은 scale factor까지 고려된 결과이다. 특히, 그린랜드의 경우 scale factor의 영향이 매우 큰데, 이는 대부분의 빙하 유실 신호가 그린랜드의 경우 해안선을 중심으로 이

루어지기 때문에, GRACE 자료 처리 후 leakage 에러에 의한 손실이 크기 때문이다. 얻어진 영년 변화 신호를 분석하면, 남극과 그린랜드의 빙하 유실은 각각 매년 약 0.54 mm와 0.67 mm의 해수면 상승효과가 있다.

해수면 변화

지구 온난화에 의한 환경변화 현상 중 해수면 상승은 사회, 경제적인 중요성으로 인해 특히 많은 주목을 받고 있는 분야이다. 해수면 변화는 육지의 빙하나 지하수 등등이 바다로 유입되어 발생하는 해수의 질량 변화(Eustatic sea level change)와 해수의 온도 및 온도의 변화에 의한 부피 변화(Steric sea level change)로 나누어진다. 조석계나 레이더 고도계를 이용하여 측정하는 해수면 변화는 질량변화와 부피변화가 모두 포함된 전체적인 해수면 변화이다. 중력 측정 등과 같은 방법으로 해수 질량 변화에 의한 효과만을 얻어내면, 전체 해수면을 상승 시키는 요인 중 질량 변화와 부피 변화를 분리시킬 수 있으며, 이를 통하여 해수면 상승의 원인을 분석하고 예측을 할 수 있다. 또한, 바다 전체의 열용량(heat content)까지도 계산이 가능해지므로, 중력 측정을 통한 전 지구 해수의 질량 변화 관측은 중요한 연구 주제이다. GRACE 이전에는 해수면 전체의 질량 변화를 관측

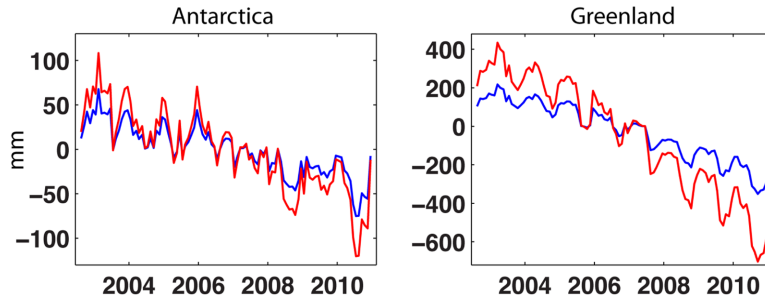


Fig. 10. Ice mass melting signal at Antarctica and Greenland observed by GRACE. Red lines are after applying scale factors to blue lines.

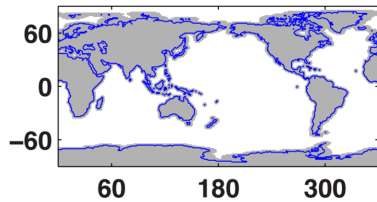


Fig. 11. Ocean averaging kernel that ignores ocean area within 300km from coasts (Chambers, 2009).

하는 것은 불가능하였고, 다만 전체 해수면 변화에서 관측 가능한 해수 염도 및 온도 자료를 이용하여 부피 팽창에 의한 효과를 제거한 후 질량 변화를 간접적으로 유추하는 정도였다(Ishii et al., 2006).

GRACE를 이용한 해수면 변화 연구는 GRACE를 이용한 다른 연구와 다른 자료 처리 방법이 필요하다. 해수면 전체의 면적은 육지의 분지들에 비해 그 규모가 매우 크기 때문에, 특별한 자료 처리 과정이 필요 없이 알리아스 에러나 잡음 등이 평균값을 구하는 과정에서 충분히 제거가 된다. 하지만, 바다의 중력 신호는 육지보다 매우 작기 때문에, 육지로 부터의 leakage 에러가 매우 중요한 문제가 된다. 육지 leakage 에러를 최소화시키기 위해 Fig. 11과 같이 해안선으로부터 300 km 이내의 지역은 제외를 시키고 나머지 부분에서 바다의 질량을 구하는 방법이 사용되고 있다(Chambers, 2009). 하지만, 이러한 경험적인 방법보다는 육지와 해양 수치 모델을 이용한 새로운 접근 방법이 시도되고 있다(Seo et al., 2011). 또한, GIA 효과에 의해 해저면이 평균 0.30 mm 씩 매년 침강하고 있으며, 이는 해수의 효과로 환산하면 2.00 mm가 된다(Cazenave et al., 2008). 따라서 매년 2.00 mm의 해수면 상승분을 GRACE 자료에 추가를 하여야 한다. Fig. 12의 붉은 선은 Fig. 11에서 제시된 영역을 이용하여 계산된 해수의 질량 변화를 나

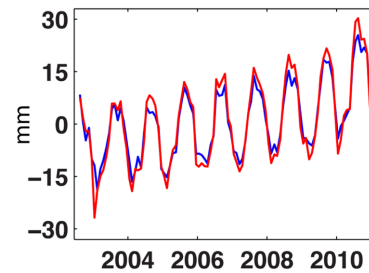


Fig. 12. Global mean sea level variations from GRACE. Red line is using the 300 km ocean averaging kernel and blue line is using entire ocean region.

타낸 것이다. 해안선 부근의 모든 바다까지 고려할 경우는 파란 선으로 제시하여 leakage 에러의 문제점을 보여주었다. GRACE를 이용하여 계산된 평균 해수면 상승(Fig. 12의 붉은 선)은 매년 약 2.42 mm이다. 이전 장에서 GRACE가 측정된 그린란드와 남극의 빙하 유실에 의한 해수면 상승효과는 각각 0.67, 0.54 mm였다. 따라서 그린란드와 남극에 의한 해수면 상승효과(1.21 mm)를 제거하면 나머지는 1.21 mm가 된다. 이는 육지 지하수나 작은 빙하들에 의한 해수면 상승효과이다. 작은 빙하들에 의한 해수면 상승효과는 약 1.1 mm로 알려져 있다(Meier et al., 2007).

결론

이 논문에서는 2002년 4월에 발사된 GRACE 위성이 제공하는 중력의 시간변화를 이용한 대표적인 연구 분야들을 소개하고 그 자료들을 처리하는 방법을 제시하였다. 이 연구에서 제시된 분야 이외에도 지진학, 우주과학, 해양 물리학 분야 등에서 폭넓게 GRACE 자료가 활용되고 있으므로, GRACE는 GPS

의 등장과 더불어 급격히 발전하는 현대 측지학의 대표적인 연구 성과이다. 따라서, 향후 수십년간 측지학을 기반으로 하는 지구과학 연구가 계속적으로 수행될 것으로 예상되며, 수십년간 축적된 중력 자료는 지구 환경변화를 이해하는 핵심적인 자료로 활용될 것이다. 국내 지구과학계도 이러한 세계적인 추세에 맞추어서 우주 측지 분야에 많은 전문 인력 및 재원이 확보되길 기대한다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소 연구사업(PE11070)의 지원을 받아서 이루어졌습니다.

참고문헌

- Blewitt, G., Lavallee, D., Clarke, P., and Nurutdinov, K., 2001, A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294, 2342-2345.
- Cazenave, A., Dominh, K., Guinehut, S., Berthier, E., Llovel, W., Ramillien, G., Ablain, M., and Lanicol, G., 2008, Sea level budget over 2003-2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Global and Planetary Change*, 65, 83-88, doi:10.1016/j.gloplacha.2008.10.004.
- Chambers, D., 2009, Calculating trends from GRACE in the presence of large changes in continental ice storage and ocean mass. *Geophysical Journal International*, 176, 415-419.
- Cheng, M. and Tapley, B.D., 2004, Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years. *Journal of Geophysical Research*, 109, B09402, doi:10.1029/2004JB003028.
- Han, S.-C., Shum, C., Bevis, M., and Ji, C., 2006, Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, 313, 658-662, doi:10.1126/science.1128661.
- Ishii, M., Kimoto, M., Sakamoto, K., and Iwasaki, S., 2006, Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *Journal of Oceanography*, 62, 155-170.
- Meier, M.F., Dyurgerov, M.B., Rick, U.K., O'Neel, S., Pfeffer, W.T., Anderson, R.S., Anderson, S.P., and Glazovsky, A.F., 2007, Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, 317, 1064-1067, doi:10.1126/science.114306.
- Paulson, A., Zhong, S., and Wahr, J., 2007, Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. *Geophysical Journal International*, 2007, 171, 497-508.
- Rignot, E. and Thomas, R.H., 2002, Mass balance of polar ice sheets. *Science*, 297, 1502-1506, doi:10.1126/science.1073888.
- Seo, K.-W., Wilson, C.R., Famiglietti, J.S., Chen, J.L., and Rodell, M., 2006, Terrestrial water mass load changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, 42, W04517, doi:10.1029/2005WR004255.
- Seo, K.-W., Wilson, C.R., Chen, J.L., and Waliser, D., 2008, GRACE's spatial aliasing error. *Geophysical Journal International*, 172, 41-48.
- Seo, K.-W., Waliser, D.E., Tian, B., Famiglietti, J., and Syed, T., 2009, Evaluation of global land-to-ocean fresh water discharge and evapotranspiration using space-based observations. 373, 508-515.
- Seo, K.-W., Wilson, C.R., Chen, J., Park, N.-W., and Lee, C.-K., Global and Arctic mean sea level variations observed by GRACE with the optimum ocean kernel. In preparation.
- Swenson, S. and Wahr, J., 2006, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285.
- 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, doi:10.1029/2007JB005338.
- Tamisiea, M.E., Leuliette, E.W., Davis, J.L., and Mitrovica, J.X., 2005, Constraining hydrological and cryospheric mass flux in southeastern Alaska using space-based gravity measurements. *Geophysical Research Letters*, 32, L20501, doi:10.1029/2005GL023961.
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., and Reigber C., 2004, The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letter*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.
- Velicogna, I. and Wahr, J., 2006, Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004. *Nature*, 443, 329-331, doi:10.1038/nature05168.
- Velicogna, I., 2009, Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.
- 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, B12, 30205-30229.

2011년 6월 24일 접수
2011년 7월 28일 수정원고 접수
2011년 8월 18일 채택