

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측” 과제의 위탁연구 “해수면 상승 예측을 위한 후빙기 지각 융기 모델 검증” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2019. 8.

(본과제) 총괄연구책임자	:	이 원 상
위탁연구기관명	:	서울대학교
위탁연구책임자	:	서 기 원
위탁참여연구원	:	전 태 환
“	:	김 병 훈
“	:	염 국 현
“	:	김 재 승
“	:	엄 주 영

보고서 초록

위탁연구과제명	해수면 상승 예측을 위한 후빙기 지각 융기 모델 검증				
위탁연구책임자	서 기 원	해당단계 참여연구원수	6명	해당단계 연구비	80,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서 면수	34
<ol style="list-style-type: none"> 1. 2003-2013 사이 남극 빙하 감소는 연간 약 162Gton 이다. 특히, 남극 빙하 감소의 가속 신호가 관측되는데, 이는 서남극과 남극 반도의 빙하 유출량 증가에 의한 것이다. 2. 남극 빙하 감소의 가속 성분 중 강설량 감소에 의한 효과도 매우 중요함이 발견되었다. 3. 빙하 감소에 의한 해수면 변동은 지역적으로 상이 함을 해수면 방정식을 통해 예측되었다. 4. 지역적 해수면 변동 특성 역시 GRACE 관측값을 통해 확인되었으며, 해수면 방정식의 예측값과 매우 일치함을 확인하였다. 5. 특히, 해수면 방정식을 통한 해수면 예측값과 GRACE 관측값의 일치도는 GRACE 관측 자료 보정을 위한 후빙기 지각 반등 모델의 종류에 따라 매우 다름을 밝혀냈다. 이를 통해, 후빙기 지각 반등 모델의 검증이 가능함을 최초로 증명하였다. 6. 현재 사용 가능함 몇 개의 후빙기 지각 반등 모델중 Peliter가 2015년에 개발된 모델이 가장 최적의 모델이다. 7. 후빙기 지각 반등 모델은 특히 구면조화함수 디그리 2, 오더 1에 해당하는 지구 관성 모멘트 성분에 그 오차가 매우 크다. 이 성분은 해수면 변동 이해에 매우 중요한 중력 스펙트럼으로 후빙기 지각 반등 모델 선택에 따라 해수면의 지역적 변동 양상이 매우 다르게 예측되거나 관측될 수 있다. 8. 디그리 2, 오더 1에 해당되는 중력 스펙트럼을 해수면 방정식과 순산 모델링 기법을 이용하여 계산 할 수 있는 방법을 개발하여, 후빙기 지각 반등에 의한 오차를 보정 할 수 있었다. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	중력변화, 후빙기 지각 융기, 해수면 상승, 남극 빙하 손실, 해수면 방정식			
	영 어	Gravity change, Post Glacial Rebound, Sea level rise, Antarctic ice mass loss, Sea level equation			

요 약 문

I. 제 목 : 해수면 상승 예측을 위한 후빙기 지각 융기 모델 검증

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 가까운 미래 남극 빙하가 해수면 상승에 가장 큰 역할을 할 것으로 예상됨
- 남극 빙하 감소는 후빙기 지각 반등 효과의 보정을 통해 관측됨
- 정확한 남극 빙하 감소 관측을 위한 후빙기 지각 반등 모델의 검증 및 보정이 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극 중력장 변화를 통한 남극 질량 변화 관측
- 해수면 방정식 해 도출
- 후빙기 지각 반등 모델 보정 및 검증

IV. 연구개발결과

- 남극 빙상변화 관측
- 해수면 방정식을 이용한 후빙기 지각 반등 모델 검증
- 후빙기 지각 반등 모델중 지구 자전축 변동에 의한 효과 보정

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 빙하 감소에 의한 해수면 변동 예측

S U M M A R Y

I. Title : Assessment of Post Glacial Rebound in Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

○ It is projected that Antarctica would be the most significant contributor to sea level rise.

○ Ice mass loss in Antarctica can be evaluated after correction of the glacial isostatic adjustment (GIA) effect.

○ It is necessary to understand GIA effect to recover Antarctic ice mass loss correctly.

III. Contents and Extent of R&D

○ Observation of Antarctica mass variation from satellite gravity.

○ Solving sea level equation.

○ Validation and calibration of GIA models.

IV. R&D Results

○ Observation of Antarctic ice mass loss.

○ Validation of GIA models using sea level equation.

○ Calibration of polar motion effect in a GIA model.

V. Application Plans of R&D Results

○ Projection of sea level rise associated with Antarctic ice mass loss.

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술 개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 남극 빙상 질량수지 추정

3.2 후빙기 지각 반등 모델 검증

3.3 후빙기 지각 반등 모델 보정

제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 5 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제 6 장 참고문헌

제1장. 서론

남극 빙하 감소는 그린랜드와 고산지대 빙하 감소 다음 3번째로 해수면 상승의 원인이 되고 있다. 하지만, 최근 GRACE를 이용한 남극 중력 변화 연구에 의하면 남극 빙하 감소가 가속되고 있고 가까운 미래에 남극 빙하 감소가 해수면 상승에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예측된다. 남극 빙하 감소는 남극 대륙 중력장의 감소로 관측이 되는데, 후빙기 지각 반등에 의한 맨틀 상승으로 남극 대륙 중력장이 반대로 증가되는 효과가 있어 이를 보정하는 작업이 남극 빙하 관측을 위해 필수적이다. 따라서, 정확한 남극 빙하 감소와 그에 따른 해수면 상승을 이해하고 예측하기 위해서는 후빙기 지각 반등을 우선적으로 규명하고 그 효과를 남극 중력변화에 보정하는 과정이 필요하다. 이 연구에서는 먼저 후빙기 지각 반등 모델을 이용하여 남극 질량 수지를 관측하고(3.1절), 후빙기 지각 반등 모델을 검증하며(3.2절), 그리고 더 나아가 후빙기 지각 반등 모델의 보정까지 수행하여(3.3절), 정확한 남극 질량 변화와 해수면 변동을 규명하였다.



제2장. 국내외 기술개발 현황

후빙기 지각 반등은 지구 모델과 과거 빙하의 확장과 감소 이력에 의해 결정이 된다. 지구 모델의 경우 맨틀의 점탄성도에 대한 정확도가 떨어지며, 과거 빙하의 두께와 범위에 대한 제한적인 관측자료로 인해 후빙기 지각 반등 모델이 예측하는 후빙기 지각 반등 효과에 많은 오차가 존재한다. 현재 캐나다 토론토 대학을 비롯한 몇 개의 연구 기관에서 제한적으로 후빙기 지각 반등 모델을 구축하고 있는 상황이다. 국내의 경우 측지학에 대한 관심 부족으로 후빙기 지각 반등 연구가 거의 수행되고 있지 않고 있다. 따라서, 후빙기 지각 반등 모델을 검증하고 이를 보정하는 것은 국제적인 선도 연구로 해수면 변동 이해에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.



제3장. 연구개발수행 내용 및 결과

3.1절. 남극 빙상 질량수지 측정

3.1.1. 서론

지난 20여 년간 남극의 평균 얼음 질량 감소는 약 70 GTon/yr(Shepherd et al., 2012)로 그린란드(약 200 GTon/yr)의 1/3 수준에 불과하다. 하지만, 질량 감소가 매년 약 14.5 GTon/yr²(Rignot et al, 2011)로 가속되고 있음이 밝혀지고 있어 가까운 미래 해수면 상승에 가장 큰 역할을 할 것으로 예상된다. 이러한 예상은 남극 얼음 질량 감소가 전적으로 얼음 유출량(ice discharge, D)의 증가(빙하 이동 속도 증가 또는 지반선의 후퇴)에 의한 효과임을 가정한 것으로, 표면 질량 수지(surface mass balance, SMB)가 고려되지 않은 것이다. D는 영년 변화를 하기 때문에 현재의 증가분이 향후 수십 년간 지속적으로 남극 빙하 질량 감소에 영향을 미치게 된다. 반면, SMB는 빙하 표면에 축적되는 강설의 양에 의해 결정되며, 강설은 짧게는 계절적 변동 길게는 10년 이상 주기의 변동을 하기 때문에, 남극 빙하 감소와 그에 따른 해수면 상승 예측에 잡음 요소로 작용할 수 있다. 관측된 남극 빙하 손실의 가속 신호에는 D와 SMB의 효과가 모두 반영되어 있어서, SMB를 보정 하여 D의 증가분만을 추출하는 것이 중요하다. 인공위성을 통해 남극 질량 변화를 자세히 관측하기 시작한 지난 수십 년 동안 SMB가 감소하였다면, 관측되는 남극 얼음 질량 감소에서 D의 증가에 의한 효과는 예상보다 작을 것이며, SMB가 증가하였다면 반대로 D에 의한 질량 감소가 더 심각할 것이다. 이번 연구에서는 2003년부터 2013년까지 GRACE. 중력 위성이 관측한 남극 질량 변화를 분석하여 SMB와 D에 의한 질량 손실을 분리하였다. 서남극의 경우 남극 질량 손실이 점점 가속되는 곳으로 알려져 있는데, 이중 SMB가 약 50% 이상 기여하고 있음을 밝혀냈다. 장보고 기지가 있는 빅토리아 랜드 지역은 빙하 감소의 가속 신호가 뚜렷하지 않아, 서남극에 비해 상대적으로 빙하 손실에 의한 해수면 상승효과가 크지 않은 것으로 확인이 되었다.

3.1.2. 방법

남극의 질량 수지는 SMB와 D에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta M_{T_0}^T = \int_{T_0}^T SMB dt - \int_{T_0}^T D dt \quad (1.1)$$

이때, $\Delta M_{T_0}^T$ 은 T_0 와 T 시간 동안 질량 변화량이다. SMB는 표면 강설, 표면 녹음, 승화 등등과 같은 여러 현상에 의해 결정이 되지만, 남극의 경우는 강설에 의한 현상으로 근사할 수 있다. 따라서 관측된 M에서 SMB의 효과를 빼면 D에 의한 질량 감소량이 결정된다. 이번 연구에서는 SMB를 위해 ERA-Interim (Simmons et al., 2007)의 남극 강설 자료를 사용하였다. M은 GRACE 인공위성 관측을 통해 파악할 수 있는데, 남극의 경우 해안선 인근에서 발생하는 질량 감소가 육지 신호 누출 효과를 유발시켜 남극의 질량 변화를 저평가하게 만든다. 바다는 질량 변동이 육지에 비해 매우 작은 지역이기 때문에, 남극 해안의 큰 질량 변동이 인공위성 중력 자료의 저해상도로 인해 많은 부분 바다의 신호로 분석이 되어 실제 남극 질량 감소 신호를 정확히 규명하기 어렵다. 이를 극복하기 위해, 분지별(그림 1.1) 질량 변화 평균값을 forward modeling (FM) (Chen et al., 2013) 방법으로 계산하여 신호 누출 효과를 최소화하고, 각 분지별 질량 변화를 계산하였다.

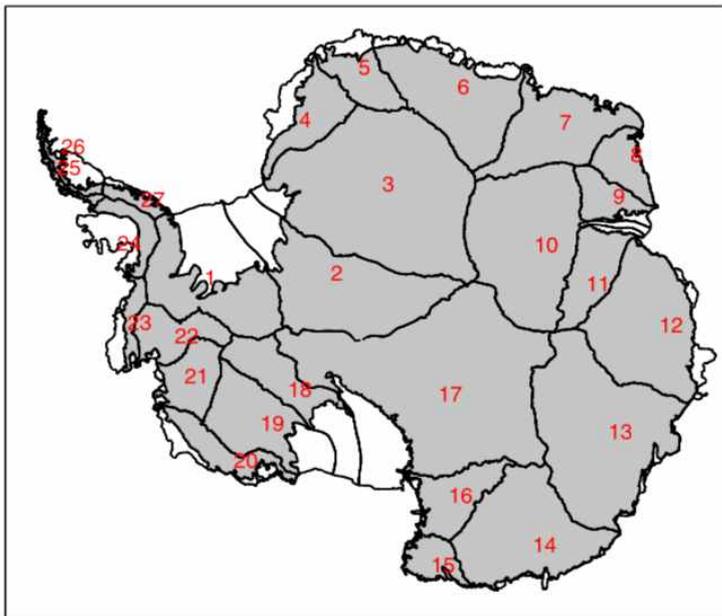


그림 1.1. 남극 분지

3.1.3. 결과

그림 1.2는 FM 방법을 통해 구한 남극 전체 질량 변화(a)와 각 분지별 연간 질량 변화율(b)이다. 2003~2013년 동안 남극은 평균 -162 GTon/yr의 질량 손실을 보여 준다. 특히, 서남극과 남극 반도에 질량 손실이 매우 큼을 알 수 있다. 동남극의 경우는 오히려 질량이 증가하고 있으며 장보고 기지가 있는 빅토리아 랜드의 경우는 질량 변동이 매우 작음을 알 수 있다.

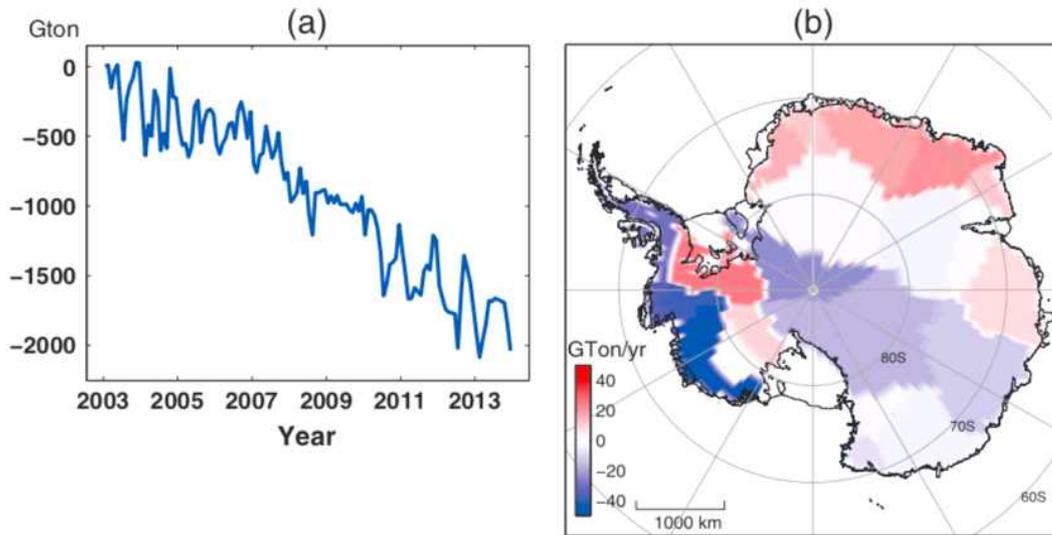


그림 1.2. (a) 남극 전체 빙하 감소량 (b) 각 분지별 감소율

그림 1.2에서 보여준 얼음 질량 변화의 선형 성분을 제거하고 난 후 잔여 성분을 분지별로 구분하여 그림 1.3(파란색)에 제시하였다.

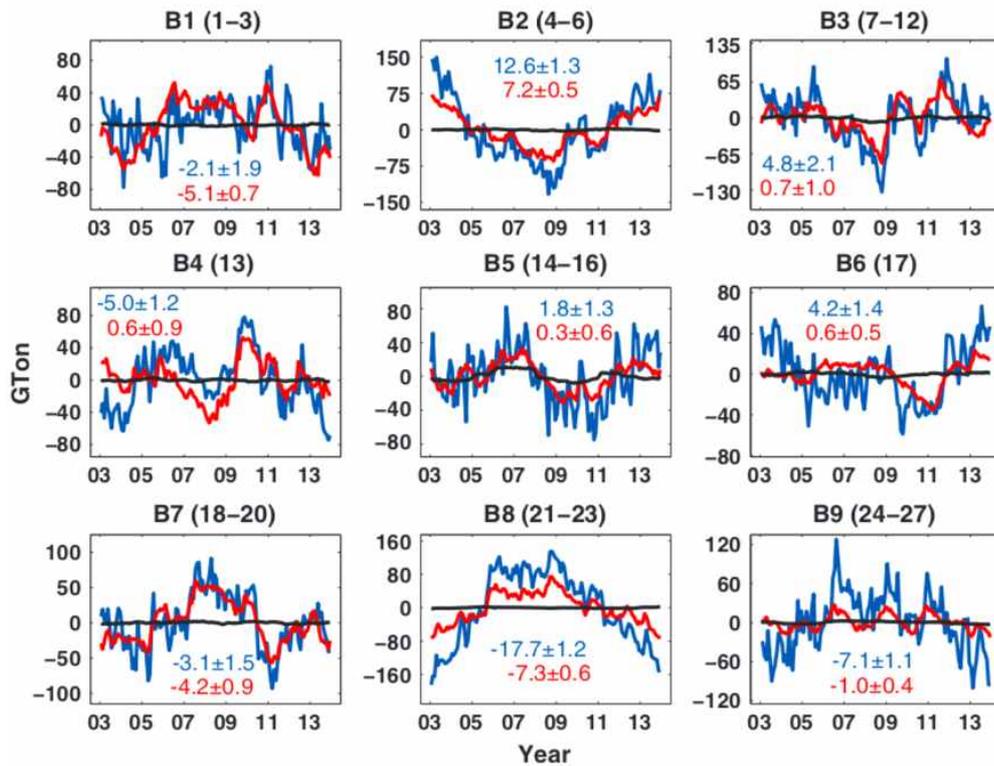


그림 1.3. 선형성분이 제거된 각 분지별 GRACE 관측값(파란색)과 SMB(빨간색)

음의 가속 성분을 보이는 분지(B1, B7, B8, B9)는 얼음 질량 감소가 가속되는 곳이다. 반면 양의 가속 성분을 보이는 분지(B2, B3, B6)는 얼음 질량이 증가하고 있음을 의미한다. 그렇지 않은 곳은 3~4년 주기의 경년 변동을 보여주고 있다. 서남극과 남극 반도는 음의 가속 성분을 보여주고 동남극은 반대로 양의 가속 성분을 보여준다. 빨간색은 SMB의 효과를 계산한 것으로 GRACE가 관측한 얼음 질량 변동과 유사한 신호를 보여주고 있다. 이를 통해, 남극 질량 변동의 선형 성분 이외에 감속 및 가속 그리고 경년 변화 성분은 SMB에 의해 크게 영향을 받고 있음이 확인된다.

GRACE 관측자료의 경우 SMB에서는 확인되지 않은 고주파 변동이 관측된다. 이는, 단순히 위성 자료의 관측 잡음일 수도 있으며, 또는 남극 대기압 변화에 의한 질량 변화 효과일 수도 있다. GRACE 관측자료에서 남극의 얼음 질량을 도출하기 위해서 남극 대기압에 의한 중력 변화 효과를 보정하는 작업을 하게 된다. 이 자료 처리 과정은 일반적으로 GRACE 자료를 제공하는 기관에서 일괄적으로 수행하게 되는데, 남극 대기압 자료의 부정확성에 의해 잔여 대기압 신호가 GRACE 자료에 포함될 수 있다. 비록 그 신호의 크기가 남극 빙하 변화에 비해 작을 것이라고 예상되나, 대기압 변동의 공간적인 특성상 남극 전체에 고루 영향을 미치기 때문에 남극 전체 얼음 수치 계산에 중요한 잡음 요소가 될 수 있다. 대기압 에러의 경우 공간적인 특성이 남극 대륙 규모이기 때문에, 해안선을 중심으로 감소하는 빙하 변화 신호와 뚜렷이 구분된다. 따라서 경험 직교 함수(EOF) 분석을 통해, 이러한 공간적 특성을 가지는 신호를 분리하는 것이 가능하다.

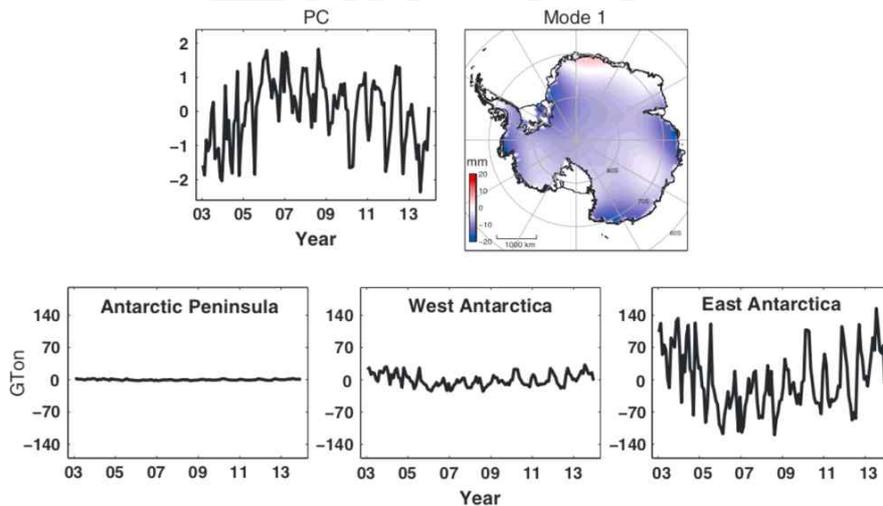


그림 1.4. EOF로 분리한 GRACE 관측자료의 대기압 에러 성분

그림 1.4는 GRACE 자료에서 SMB를 뺀 잔여 신호를 EOF 분석한 첫번째 모드이다. 고주파 성분과 음의 가속 성분이 모두 관측이 되며, 이러한 시간 변화를 가지는 신호의 공간 패턴이 남극 전체에 고루 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 대기압 에

러로 의심되는 이 성분은 특히 동남극에 가장 큰 영향을 주고 있음이 계산되었다. EOF로 구한 대기압 에러를 GRACE에서 제거 시킨 후 보정된 GRACE 남극 질량 변동과 SMB 변화를 새롭게 그림 1.5에 도시하였다. 그림 1.3과 달리, GRACE 관측값(파란색)이 SMB(빨간색)에 더 일치하고 있음을 알 수 있다.

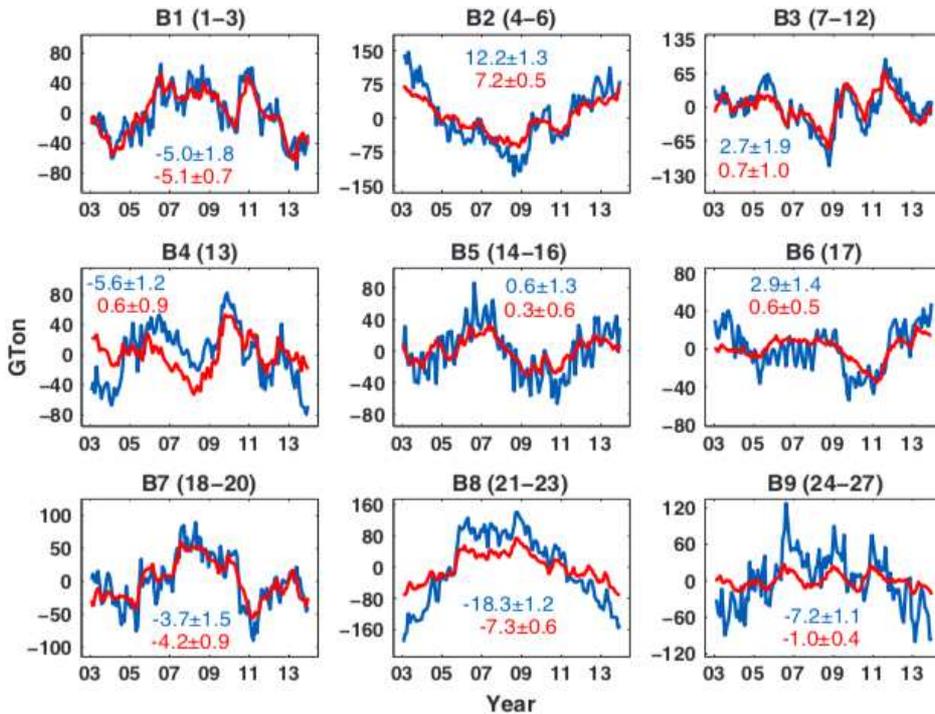


그림 1.5. 대기압 에러가 보정된 GRACE 자료(파란색)과 SMB(빨간색)

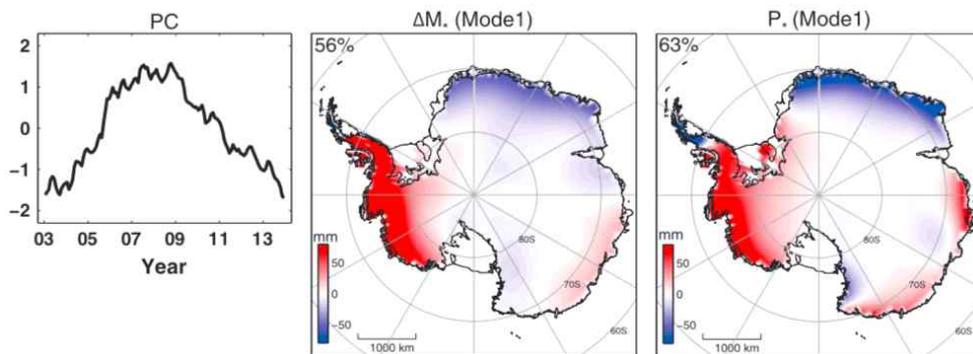


그림 1.6. GRACE 자료(ΔM_*)와 SMB(P_*)를 동시에 EOF 분석한 결과

남극 얼음 질량 변동과 SMB의 연관성은 EOF 분석을 GRACE 자료와 SMB를 동시에 적용해서도 확인이 가능하다. 그림 1.6은 GRACE가 측정한 남극 질량 변동과 SMB를 함께 EOF 분석한 것의 첫번째 모드이다. 첫번째 모드의 시간변동(PC)는 음의 가속 성분들 보여주며, 공간적인 분포는 GRACE 관측값과 SMB 모두 매우

유사한 형태를 보여주고 있다. 특히, 태평양 쪽의 남극 해안은 양의 이상, 대서양과 인도양 쪽의 남극 해안은 음의 이상을 보여주고 있음이 확인된다.

3.1.4. 결론

남극의 빙하 질량은 서남극과 남극 반도를 중심으로 빠르게 감소하고 있으며 특히 그 감소하는 속도가 가속되고 있음이 밝혀졌다. 하지만, 빙하 감소의 가속성분에는 SMB의 감소에 의한 효과가 포함되어 있어 D에 의한 빙하 감소와 구분이 되어야만 한다. 서남극의 경우 2003~2013년 동안 약 -26 GTon/yr^2 의 빙하 감소 가속이 관측되었는데, 이중 -14 GTon/yr^2 가 SMB의 효과이고 -12 GTon/yr^2 가 D에 의한 효과로 규명이 되었다. 이는 남극 빙하 감소의 속도가 예상보다 빠르지 않음을 의미하며, 가까운 미래 남극 빙하 감소와 해수면 상승 예측에 고려되어야만 한다. 또한, 장보고 기지가 있는 빅토리아랜드 지역은 빙하 감소 신호가 다른 지역에 비해 뚜렷하지 않았다.



3.2절. 후빙기 지각 반등 모델 검증

3.2.1. 서론

전 지구적인 중력 관측은 2002년 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)가 발사된 이후로 큰 진전을 보였다(Tapley et al., 2004). 중력 위성이 지구를 실시간으로 관측하면서 이전까지 사람의 발길이 닿지 못했던 험지와 오지의 자료를 포함하여 전 지구의 중력 변화를 수백 킬로미터의 해상도로 가능하게 한 것이다. 이러한 중력 변화는 주로 지구의 각 지역에서 발생하는 질량 변화에 의해 나타난다. 예를 들어 연간 변화하는 중력 변화는 대부분 지표의 물 질량의 수송에 의한 결과로서 관측된다. 지표에 존재하는 물이나 얼음은 계절에 따른 기후 변화에 의해 다른 곳으로 빠져나가거나 추가로 유입되므로 연중 중력의 증가 혹은 감소 신호를 뚜렷하게 만들어 낸다. 매년 심해지는 해수면 상승 역시도 동일한 원리로 바다 지역의 중력 신호를 매년 점점 강하게 만들고 있기 때문에, 이를 통해 해수면의 연간 증가폭을 추정할 수 있게 되는 것이다. 표면의 수질량 외에도 고체 지구의 질량이 움직여도 중력 변화가 발생할 수 있다. 지진 등으로 지각이 이동, 압축, 신장되는 경우에는 지각의 밀도 변화가 중력의 변화로서 관측될 수 있다. 또 다양한 원인으로 발생하는 지각 하부의 맨틀이 움직이는 신호도 장기적이고 광역적인 중력 변화를 일으킨다. 이 외에도 지구의 조석, 타원도(ellipticity) 변화, 극운동(polar motion) 현상과 같은 행성 규모의 현상도 중력 신호의 관측에 적지 않은 영향을 미친다.

그중에서도 중요하게 다루어지는 효과 중 하나가 바로 후빙기 반등(post-glacial rebound) 또는 빙하 지각평형 조정(glacial isostatic adjustment)으로 불리는 현상이다. 이는 과거 빙하기 때에 무거운 얼음에 눌러 있던 지구 표면이 얼음이 녹고 난 이후에 천천히 원래 위치를 회복하는 현상을 말하며, 현재에도 진행 중이다. 지난 빙하기 이후 당시 빙하 지역이었던 곳을 중심으로 수만 년 동안 비교적 일정한 속도로 지표면이 상승하는 모습은 곧 고체 지구가 상승하는 효과이기 때문에 중력 위성 입장에서는 마치 중력이 조금씩 강해지는 것처럼 관측된다. 위에서 언급하였듯이 중력 위성은 모든 질량 변동 원인으로부터 발생하는 중력 효과가 모두 합쳐져 관측되므로, 각 요소에 대한 효과를 잘 분별해 내야만 원하는 목표 현상의 효과를 정확하게 추정할 수 있게 된다(Peltier, 2004). 이와 같은 후빙기 반등 현상은 북미 오대호 인근을 중심으로 한 캐나다 지역, 남극의 일부 지역, 유럽 북부 지역에 주로 나타나고 있으나, 반등 효과의 정확한 크기와 영역에 대해서는 연구한 학자마다 그 결과물에 다소 차이가 있다. 따라서 어떠한 후빙기 반등 모델을 받아들여 GRACE 중력 관측값을 보정, 분석하는가에 따라 해당 지역의 수질량 변화 예측은 제각기 달라질 수밖에 없다. 특히 후빙기 반등 효과에 큰 영향을 받고있는 지역에는 그린란드나 남극처럼 현재에도 지구의 거대한 얼음 저장고의 역할을 하는 곳들이 포함

되어 있는데, 한 예시로서 남극 대륙의 빙하 감소는 사용된 후빙기 반등 모델에 따라 그 양이 연간 수십 기가톤에서 많게는 200 기가톤으로 분석되는 등, 연구마다 그 결과의 편차가 무시할 수 없을 정도로 크다. 이러한 오차들은 현재 진행 중인 기후 변화의 실태 평가는 물론, 장기적 기후 변화 예측에도 큰 불확실성을 야기하게 된다.

수많은 전문가들은 일반적으로 빙하 이력(ice history)이라 불리는 과거 축적된 빙하의 분포 모델과 지구 내부의 점탄성 반응에 관련된 수직 층상 구조 모델을 바탕으로 여러 관측 결과에 가장 잘 부합하는 후빙기 반등 모델을 계산하여 제공하고 있다. 하지만 본 연구에서는 이러한 전문적이고도 원론적인 접근법 외에, 현재 가진 GRACE 관측자료를 활용하여 지구 각 부분의 수질량 변화를 예측하고자 할 때 가장 적용 가능한 수준의 후빙기 반등 모델을 얻고자 하였다. 바꾸어 말하면, 수질량 변동과 무관한, 후빙기 반등 효과를 포함한 기타 효과들을 GRACE 자료에서 효과적으로 보정함으로써 결과적으로 수질량 변화에 의한 신호를 더욱 정확하게 얻어내는 것을 목표로 하는 것이다.

3.2.2. 방법

GRACE 자료는 이전 시기 관측자료에 비해 눈에 띄는 장점을 갖고 있지만, 그 반면에 몇 가지 한계점도 명확하게 포함하고 있다(Chen et al., 2013). 여러 연구기관에서 제공되는 GRACE 자료는 고주파 대역에서의 소음을 상당량 포함하고 있는데, 이를 제거하기 위한 후처리 기법을 거치면 대개 해상도가 수백 km에 달할 정도로 떨어지게 된다. 때문에, 실제 신호들이 주변 영역으로 퍼져 보이는 신호 누출 현상이 나타날 수 있다. 또한, 위성 측정 자체의 감도 문제 때문에 지구의 무게중심, 자전축 변화와 같은 행성 규모의 현상을 표현하는 구면 조화 함수의 저차 계수들(degree-1과 2)은 다소 정밀하지 못하다는 약점도 함께 내포하고 있다. 이러한 신호들이 만들어 내는 자료의 부정확성은 위에서 중요하게 언급한 후빙기 반등 효과의 불확실성과 함께 정밀한 수질량 변화를 얻는 데에 장애물로서 작용하고 있다. 이러한 효과들이 적절하게 보정되지 못했을 경우에는 GRACE 자료의 수질량 변화 신호들 또한 큰 오차를 내포할 수밖에 없다. 때문에, 보정을 모두 거친 GRACE 자료가 수질량 변화 신호만을 갖고 있는지에 대한 타당성을 평가할 수단이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이를 위하여 바다의 수질량 신호를 이용하였다. GRACE 자료에서 바다의 수질량 변화 신호는 물리적으로 질량 해수면(mass sea level) 변화로 곧장 연결된다. 질량 해수면은 총 해수면 변화에서 열팽창과 같은 부피 변화 효과를 빼서 질량의 증감으로만 야기되는 해수면의 변화를 의미하는 항이다(Cazenave et al., 2014). 이 질량 해수면의 증가는 곧 육지에서 담수나 빙하들이 동일한 양만큼 유출된 양으로 쉽게 이해할 수 있기 때문에 기후 변화의 주요 지시자로서 폭넓게 이용

되고 있다. 이 질량 해수면은 물리적으로 지구의 지오이드 면을 따라 정렬하게 되는데, 1970년대에 이미 임의의 표면 질량 배열이 주어지면 질량 해수면의 공간적인 변화를 계산하는 방법이 해수면 방정식(sea level equation)이라는 이름으로 집대성된 바 있다(Farrell and Clark, 1976). 이를 이용하면, 어떤 GRACE 자료가 수질량 변화에 의한 신호만을 갖도록 타당하게 보정되었다면, 그 자료의 바다 부분 신호는 해수면 방정식으로 거의 동일하게 재현되어야 할 것이다. 해수면 방정식은 순수하게 중력에 의해 해수면이 재배열되는 효과만을 나타내기 때문에, 이와 물리적으로 별개의 현상인 후빙기 반등 신호나 저차 계수 신호들이 채 보정되지 않고 섞여 있다면, GRACE 자료의 잔여 값이 말해 주는 해수면은 해수면 방정식을 통해 물리적으로 예견되는 해수면과 시공간적으로 상당한 차이를 보일 것이라 예상할 수 있다. 이러한 방식의 평가는 앞서 언급했던 빙하 이력, 지구 구조 모델과 같은 전문적이고도 복잡한 추가 모델링 절차 없이도 후빙기 반등 효과를 GRACE 자료 자체만 갖고도 보정할 수 있는 한 가지 방법이 될 수 있다. 이를 GRACE 자료의 자체 일관성 평가(self-consistency test)라고 하겠다.

본 연구에서는 우선 저해상도인 GRACE 자료를 고해상도로 복원하기 위하여 Forward modeling 기법을 통해 고해상도 수질량 분포도를 얻었다(Chen et al., 2013). 이 방법은 자동화된 반복시행법을 통해 저해상도의 자료를 만들어 낼 수 있는 가장 합리적인 고해상도 분포도를 찾아가는 방법으로, 이미 여러 연구에서 널리 쓰여 온 방식이다. 이 고해상도 분포도를 이용하면 해수면 방정식을 통한 이론적 해수면 변화를 계산하는 것은 물론, 신호 누출이 없는 GRACE 자료의 온전한 바다 신호를 얻을 수 있다. 이때 해수면 방정식의 해와 GRACE 바다 신호의 시계열을 비교하여 해당 GRACE 자료의 자체 일관성의 수준을 평가할 수 있다. 이 유사성을 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 6개의 대양 영역으로 바다를 분할하여 각 바다에서 평균적인 변화 시계열을 얻은 후, 두 시계열 간의 선형 추세(linear trend)와 평균 제곱근 편차(root-mean-square)를 비교하였다. 이러한 방법을 통해 자체 일관성이 가장 높은 GRACE 자료를 얻을 수 있으며, 여기에는 후빙기 반등 효과와 같은 수질량 변화 신호와 무관한 효과가 효과적으로 보정되어 있을 것으로 예상된다. 이를 기반으로 육상 담수의 변화는 물론, 해수면의 거동도 더욱 정밀하게 예측할 수 있게 된다.

3.2.3. 결과

상기하였듯이, 자체 일관성 평가는 결국 관측된 GRACE 자료의 잔여 바다 신호와 해수면 방정식으로 예측되는 이론적 바다 신호의 일치율로써 GRACE 자료의 보정이 타당하게 이루어졌는가를 판단하는 과정이다. 이들 시계열의 불일치율은 GRACE 자료에서 후빙기 반등, 저차 계수의 변동과 같은 고체 지구의 반응으로부

터 기인한 신호들이 성공적으로 보정되지 않았다는 방증이 될 수 있다. 특히 최근 GRACE 자료의 후처리는 이들 신호를 보정하기 위한 ‘권장’ 후처리 선택지를 제공하고 있는데, 이는 Satellite Laser Ranging(SLR) 관측으로 얻은 C20 저차 계수를 GRACE 자료에 교체 삽입하고(Cheng et al., 2013), 후빙기 반등 신호는 A Geruo의 모델로 보정하는 것이다(A et al., 2013). 하지만 이들 역시도 다소 불완전하다는 의견이 제시되어 왔다. 본 연구에서는 실제로 이 처리법이 어느 정도의 자체 일관성을 보이는가를 판단하기 위해, 권장되는 후처리법으로 GRACE 자료를 보정한 후, 여기에 자체 일관성 평가를 수행하였다.

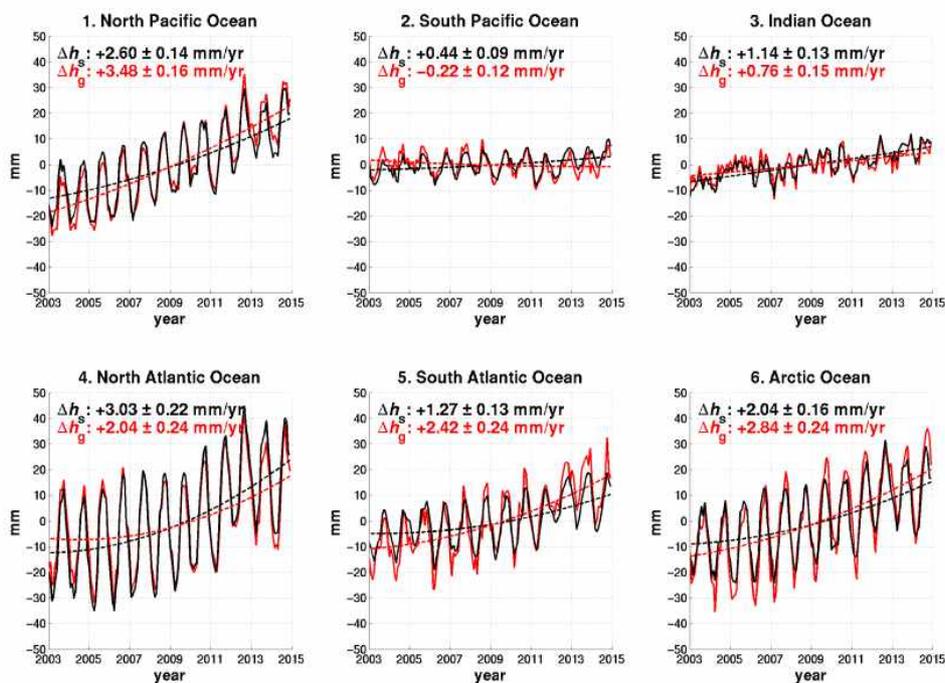


그림 2.1. 널리 추천되는 방법으로 보정된 GRACE 자료의 자체 일관성 평가. 번호 순서대로 북태평양, 남태평양, 인도양, 북대서양, 남대서양, 북극해에서의 평균 시계열이며, 빨간 선은 GRACE의 잔여 바다 신호, 검은 선은 해수면 방정식으로 구한 질량 해수면 변동을 나타낸다. 후빙기 반등 효과는 A Geruo의 모델(2013)을 사용하여 보정하였으며, GRACE 자료의 불확실한 저차 계수 중 하나인 C20는 SLR 계측으로 별도로 구한 값들로 대체한 것이다. 검은 선과 빨간 선은 대부분의 바다에서 대체로 맞지 않음을 확인할 수 있으며, 최대 1.2 mm/yr의 추세 차이를 보인다.

그림 2.1은 2003년 1월에서 2014년 12월까지 만 12년의 기간 동안, 6개 대양에서 GRACE 자료의 바다 잔여 신호(빨간색)와 이론적 해수면 변화(검은색)를 그린 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯 두 시계열은 변화의 양상은 유사하나 그 추세 면에서 큰 차이를 보인다. 질량 해수면은 해당 기간 동안 전 세계 평균 약 2 mm/yr의 상

승률을 보이는데, 두 시계열은 지역에 따라서 1.2 mm/yr까지 차이가 나기도 하는 등, 그 차이가 상당하다고 할 수 있다. 따라서 상기한 처리법을 사용하여 해수면의 거동을 연구하는 경우에 해수면 변동의 불확실성은 더욱 증가할 수밖에 없다. 이러한 차이는 GRACE의 바다 잔여 신호에 해수면 방정식으로 구현되지 못하는 고체 지구의 변동 신호가 섞여 있다는 중요한 증거가 되며, 해당 GRACE 자료의 보정이 부족하다는 명확한 근거가 된다.

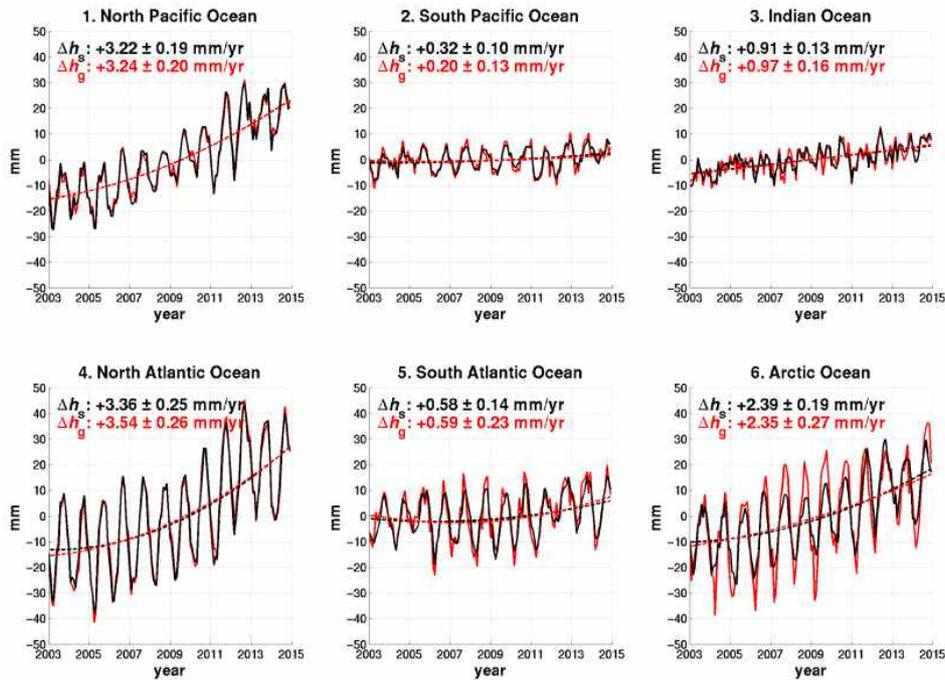


그림 2.2. 그림 2.1과 동일한 형태의 그림이나, GRACE 자료는 가장 자체 일관성이 높은 조합으로 처리되었다. GRACE 저차 계수 C20는 통째로 교체하는 대신 K2, S2 조석 신호의 공명으로 발생하는 에러 신호 보정만 수행하였고, C21과 S21은 극 운동 관측자료를 바탕으로 새롭게 계산하여 교체하였다. 후빙기 반등 신호는 Peltier의 모델(2015)로 보정하였다.

그림 2.1은 자체 일관성을 시험한 수많은 결과 중 하나의 예시로서, 실제로 후빙기 반등, 저차 계수 보정, GRACE 자료 제공 센터 등 수많은 선택지를 고려하면 백여 가지 이상의 조합이 발생할 수 있다. 이들 자료의 다양성은 그만큼 GRACE 자료로 얻을 수 있는 표면 수질량 변화도가 백여 가지 이상의 서로 다른 선택지를 가질 수 있다는 것을 뜻하며, 그들 자료 간의 상이한 차이는 곧 해석적 불확실성과 오차 범위로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 가능한 모든 조합에 대하여 자체 일관성 평가를 수행했으며, 그중 가장 높은 일치율을 보이는 처리법 조합을 발견하였다. 가장 자체 일관성이 높았던 자료는 Center for Space

Research(CSR)에서 제공하는 GRACE 자료를 써서 저차 계수 C20에 남아 있는 K2, S2 조석의 신호를 보정하고 후빙기 반등을 Peltier의 최신 모델(Peltier et al., 2015)로 보정한 경우로 나타났다. 그림 2.2는 해당 자료를 바탕으로 한 두 시계열의 변화를 나타낸 것으로서, 대부분의 바다에서 거의 동일한 수치의 추세는 물론, 북극해를 제외한 대부분의 바다에서 그 변동 양상이 유사하게 나타나고 있다. 이는 GRACE 자료에서 후빙기 반등 및 지구 운동과 같은 고체 지구에 의한 효과가 성공적으로 보정되어, 수질량의 재배치만 고려하는 질량 해수면 변화가 해수면 방정식을 통한 물리적 예측과 잔여 바다 신호에서 보이는 관측적 수치 양쪽에서 잘 일치된 결과로 나타났기 때문이다.

이러한 일치가 단순히 우연의 산물이 아님을 확인하기 위해, 이와 별도로 가상의 합성 자료를 갖고도 모델 실험을 수차례 수행했는데, 임의의 고체 지구 신호(자전축의 부자연스러운 와동, 과장된 후빙기 반등 강도 등)를 의도적으로 섞어 넣은 합성 자료는 항상 자체 일관성이 낮은 결과를 보였다. 반대로 이러한 신호가 없었을 때에는 수질량 신호가 임의의 분포를 갖더라도 합성 GRACE 자료의 바다 잔여 신호는 해수면 방정식의 물리적 예측과 높은 일치율을 보였다(Jeon et al., 2018).

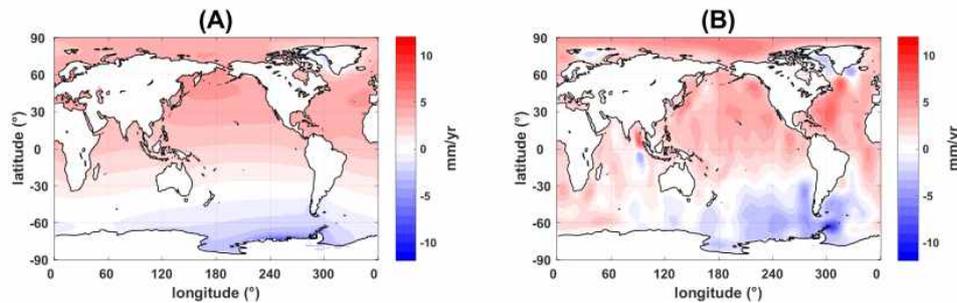


그림 2.3. 자체 일관성이 가장 높은 그림 2.2와 같은 GRACE 자료를 써서 구한 추세도. (A)는 해수면 방정식으로 구한 결과이며, (B)는 효과적으로 보정된 GRACE의 잔여 바다 신호로부터 구한 해수면 상승률이다.

그림 2.3은 이론적 해수면 변동과 관측적 해수면 변동 두 자료로부터 선형 변화율을 공간적으로 그린 것으로, 여기에서도 대부분의 바다에서 거시적으로 굉장히 유사한 패턴을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 왼쪽(A)의 이론적 해수면 변화율과 달리 오른쪽(B)의 GRACE 잔여 신호들은 위에서 언급하였던 고주파 소음들이 여전히 약간 포함되어 있고, 수마트라 인근과 같이 지진 신호도 약간 포함되어 있음을 알 수 있다(Han et al., 2006). 하지만 그 외에는 대양 규모에서 두 자료의 분포는 놀랄 만큼 유사하며, 이 역시 후빙기 반등 신호를 포함한 대규모의 고체 지구 신호들이 효과적으로 제거되었기 때문으로 생각된다.

이렇게 자체 일관성이 높은 자료를 바탕으로, 우리는 GRACE 자료가 포함하고 있지 않은 지구 무게중심 이동 효과(1차 구면 조화 계수)를 추가로 계산하여 더하

였다. 실제 총 질량 해수면은 무게중심 변화까지 모두 포함된 값으로 표현되어야 하지만, GRACE는 상기한 감도의 한계 때문에 지구 중심 이동은 감지하지 못한다. 따라서 2차 이상의 구면 조화 계수 합으로 표현된 그림 2.2와 2.3의 결과는 이 효과를 포함하여야 완전한 해수면 변화를 표현할 수 있게 된다. 지구의 무게중심 이동은 Swenson 등(2008)의 연구에서 소개된 계산법을 통해 쉽게 계산할 수 있다. 이를 포함하면 그림 2.4와 같은 각 대양에서의 시계열 변화와 그림 2.5와 같은 공간적 해수면 상승을 얻을 수 있다.

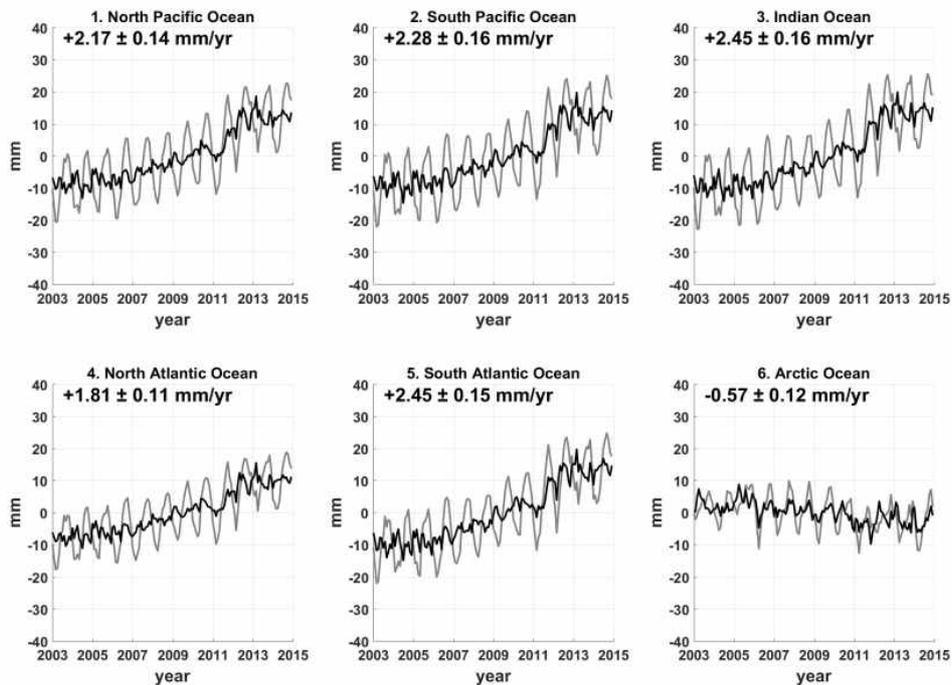


그림 2.4. 자체 일관성이 높은 자료에 지구 무게중심 이동 효과를 더한 총 질량 해수면의 변동. 북극해의 질량 해수면이 감소세라는 것이 특기할 만하다.

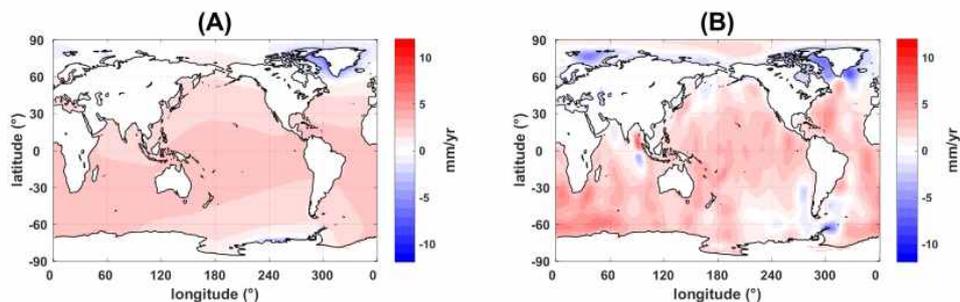


그림 2.5. 그림 2.3과 동일한 자료를 바탕으로 지구 무게중심 이동 효과를 추가로 더한 질량 해수면 변화율의 공간적 분포. 육지의 수질량이 끊임없이 유출된다고 알려진 그린란드와 서남극 인근의 감소율이 눈에 띈다.

현재 진행 중인 육지 담수의 고갈과 해수면 상승의 효과는 바다의 지리적 위치 때문에 북반구보다 남반구에 더 큰 질량 집중을 야기한다. 따라서 지구의 무게중심은 기후 변화에 따라 남반구 방향으로 꾸준히 이동하고 있으며, 이 효과를 포함하는 경우 남반구의 바다는 그림 2.1에서 보인 변화율보다 양의 방향으로 더욱 증가된 해수면 상승효과를 보인다(그림 2.1과 2.4). 연구된 2003-2014 기간 동안 전 세계 바다가 평균적으로 2.14 ± 0.12 mm/yr(95% 신뢰구간) 상승하는 추세로 조사된 데 비해, 그림 2.4에 나타난 것처럼 남반구 바다는 이에 비해 더 큰 질량 해수면 상승을 보인다. 더욱 특기할 만한 점은, 북극해의 질량 해수면은 여타 대양들과 눈에 띄게 다르게 감소 효과를 보인다는 사실이다(그림 2.4와 2.5). 해수면 방정식이 묘사하고 있듯 질량 해수면은 지구의 중력에 직접 영향을 받는 지오이드 면을 따라 정렬하므로, 이 면은 주변의 중력 근원, 즉 질량들이 유출될수록 낮아질 수밖에 없다. 따라서 북극해의 감소하는 질량 해수면은 지구 무게중심이 남반구로 이동한 요인 외에도, 극권에서 기후 변화에 따른 담수와 빙하 질량의 손실이 주변 해수를 붙잡아 둘 중력의 감소로 이어지고 있다는 사실로서 설명될 수 있을 것이다. 특히 연구 기간 동안 조사된 전 세계 평균 질량 해수면 변화율인 2.14 mm/yr라는 수치는 이전 GRACE를 이용한 질량 해수면 연구들에서 측정된 수치보다 비슷하거나 약간 높은 수준에서 잘 일치할 뿐만 아니라, 2005~2014년 시기의 열팽창 효과의 기여도(약 1.1 mm/yr)와 위성 고도계를 이용한 총 해수면 변화율(약 3.5 mm/yr)을 연구한 최신 연구(Dieng et al., 2017)의 결과들과도 그 범위가 상당히 부합하는 결과이다.

극지연구소

3.2.4. 결론

본 연구는 이와 같이 후빙기 반등 효과와 섞여서 관측되는 중력 신호에서 이를 효과적으로 분별해 냄으로써 수질량 변동 신호만을 바탕으로 전 세계 평균 질량 해수면의 변화만이 아니라 각 지역의 해수면 변화까지도 알아볼 수 있었다. 질량 해수면은 공간적으로 굴곡이 있는 지오이드 면을 따라 지역에 따라 최대 2.4 mm/yr에서 적게는 북극해와 같이 감소하는 등 지역적 편차가 상당하였다. 특히 앞서 언급하였듯 후빙기 반등 효과가 나타나는 영역과 강도에 대한 추정 범위가 모델별로 상이하여 정확한 수질량 변화를 해석해 내는 데에 상당한 오차 범위를 내포했다는 사실을 상기해 보면, 본 연구의 자체 일관성 평가는 후빙기 반등과 같은 여타 고체 지구의 반응을 적절하게 제거할 하나의 방법론을 제시하였을 뿐만 아니라, 그를 바탕으로 일관되고 불확실성이 적은 예측 수치를 제시하였다는 데에 그 의의가 크다고 할 수 있다. 자체 일관성 평가는 미래에도 제안될 후빙기 반등 모델들과 기타 고체 지구의 효과들을 판별하는 데에도 꾸준히 적용될 수 있을 것이며, 이를 기반으로 더욱 정밀한 수치 예측과 기후 변화의 파악 또한 가능할 것이다.

3.3절. 후빙기 지각 반등 모델 보정

3.3.1. 서론

해수면 상승은 기후 변화를 나타내는 중요한 지표이며, 검조의(tide gauge) 및 위성 고도계를 이용하여 관측되어 왔다. 위성 고도계 관측에 의하면 1993년에서 2015년 동안 전 세계 바다의 평균 해수면은 약 3.07 mm/yr 상승하였으며, 최근 10년 동안은 3.5 mm/yr로 해수면 상승률이 더 빨라졌다. 이러한 해수면 상승을 일으키는 요인은 크게 두 가지로 나뉘며, 첫 번째는 해수의 온도 및 염분 변화로 인한 부피 팽창과 두 번째는 극지방의 빙상, 대륙 빙하 및 담수의 유입으로 의한 해수의 총 질량 증가이다. 최근 WRCP 보고서에 의하면 평균 해수면 변화량의 약 1/3이 해수의 부피 변화에 의한 것으로 밝혀졌다. 따라서 해수의 질량 증가가 최근 가속화된 평균 해수면 상승의 주된 원인으로 손꼽히고 있으며 이를 정확히 추정하는 것이 현재와 미래의 해수면 상승을 이해하는데 매우 중요하다.

2002년부터 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 위성에 의하여 시간에 따른 전 지구적 표면 질량 변화가 관측되어왔으며, GRACE 관측자료는 구면 조화 함수의 형태로 제공되고 있다. 배포되고 있는 GRACE 자료에는 극지방의 빙상, 대륙의 물과 빙하, 해수 질량 및 고체지구의 밀도 재배치 등이 복합적으로 포함되어 있으며, 지표의 물 및 얼음 질량 변화를 이해하기 위해서는 고체지구의 밀도 재배치 성분이 적절히 제거되어야 한다. GRACE 자료에 포함되어 있는 고체지구 질량 재배치 신호의 대부분은 빙하기에 지각과 맨틀을 누르고 있었던 빙하들이 간빙기를 거치며 짧은 시간에 사라짐으로 인해 나타나는 맨틀의 반등(Post Glacial Rebound : PGR) 효과이다. PGR 효과는 과거 빙하들의 역사와 지구 내부 구조에 기반한 모델 값을 이용하여 GRACE 측정값에서 제거할 수 있다.

현재 다양한 PGR 모델이 개발되어 있으며, 물과 얼음 질량의 변화량을 정확하게 이해하기 위해서 가장 합리적인 PGR 모델을 선택해야 한다. 최근 들어 ICE-5G 모델에서 ICE-6G 모델로 발전함에 따라 많은 진전이 있었지만, 여전히 최적의 PGR 모델을 선택하는 것에는 많은 논의가 필요하다. 특히 PGR 모델을 구성하는 다양한 스펙트럼 중 지구 자전축의 운동으로 인해 생기는 degree 2 order 1 구면 조화 함수 계수($\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$)에 큰 오차가 있는 것으로 알려져 있다(Chambers et al., 2010). 예를 들어 PGR 모델에 따라서 남극의 연간 질량 변화량은 117 ~ 171 GTon/yr, 해양질량은 1.08 ~ 2.11 mm/yr와 같이 다양한 추정을 유발한다(WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018).

본 연구에서는 PGR 모델의 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 성분을 보정한 후 대륙 및 해양의 물 질량 변동을 비교, 분석하고자 한다. $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 은 GRACE 위성이 관측할 수 있는 가장 큰 범위의 신호이기 때문에 대륙 규모의 표면 질량 변화에 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 따라서 본 연구를 통해 PGR 모델에 내재되어 있는 불확실성을 줄이고

대규모 신호와 관련하여 물 질량의 이동 및 기후 변화에서 새로운 이해를 기대할 수 있다.

3.3.2. 자료 및 방법

가. GRACE와 PGR 모델

대륙 및 해양의 물 질량 변화를 이해하기 위해서 Center of Space Research(CSR)에서 구면 조화 함수 형태로 제공하는 release06 level2 GRACE 위성 자료를 사용하였다. GRACE 위성 자료에는 PGR 효과가 포함되어 있기 때문에 이를 적절한 모델 값을 이용하여 제거하여야 한다. 본 연구에서는 PGR 효과를 제거하기 위해서 Paulson et al. (2007) (이후 Paulson07), A et al. (2013) (이후 A13), Peltier et al. (2015) (이후 Peltier15)에서 제시한 모델들을 사용하였다.

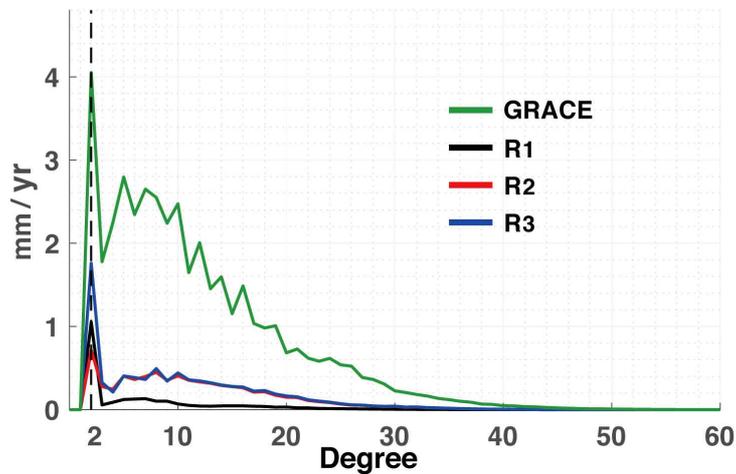


그림 3.1. A13을 이용하여 PGR 신호가 제거된 GRACE 신호(녹색)와 PGR 모델 차이의 스펙트럼 세기. R1(검정색), R2(빨간색), R3(파란색)는 각각 A13 - Paulson07, A13 - Peltier15, Peltier15 - Paulson07이다. 모든 값에 500km 반지름의 Gaussian 평활화가 적용되어 있다.

그림 3.1은 PGR 모델간의 차이를 보여준다. R1, R2, R3는 각각 A13 - Paulson07, A13 - Peltier15, Peltier15 - Paulson07의 스펙트럼별 세기를 보여준다. 녹색 선은 A13을 이용하여 GRACE 신호를 보정하였을 때의 스펙트럼별 세기이고 검정색 점선은 구면 조화 함수의 degree-2 계수의 지점을 표시한 것이다. 세 가지 잔여 값의 신호는 GRACE 신호보다 모든 스펙트럼에서 신호의 크기가 작게 나타나며, 30차 이상의 영역에서는 모델 간의 일치도가 높게 나타난다. 반면, 서론에서 언급하였듯이 모델 간의 차이는 degree-2 영역에서 가장 크게 나타나며 대부분

은 $\Delta C21/\Delta S21$ 의 차이에서 기인한다. 더욱이 degree2에서 R3(파랑)의 경우 GRACE로 추정된 물 질량 변동 신호(녹색)의 1/2에 해당한다는 점에서 정확한 $\Delta C21$ 과 $\Delta S21$ 이 반드시 고려되어야 한다.

GRACE 위성은 지구의 무게중심점을 중심으로 지구를 선회하며 중력 변화를 측정하기 때문에 지구 무게중심의 변화(geo-center motion)를 정확하게 추정할 수 없는 단점이 있다. 이러한 지구의 무게중심 변화량은 구면 조화 함수의 계수 중 degree-1에 해당하므로, GRACE의 degree-1 성분은 0으로 제거한 후 제공되고 있다. 하지만 지구의 무게중심이 자전축의 북쪽 방향으로 1mm 이동한다면 평균 해수면의 높이는 약 0.51mm 하강에 해당하는 효과를 발생시키기 때문에 degree-1 구면 조화 함수 계수는 반드시 고려해야 할 요소 중 하나이다(Wu et al., 2012). 통상적으로 degree-1 구면 조화 함수 계수는 degree-2 이상으로 이루어진 GRACE 육지 신호와 이 육지 신호를 이용하여 얻은 해양 모델을 합하여 계산할 수 있다(Swenson et al., 2008). 만약 degree-2 이상의 육지 신호가 불확실하다면(특히 $\Delta C21/\Delta S21$), 그때 얻어지는 degree-1 구면 조화 함수 계수도 큰 오차를 포함한다.

나. 순산 모의 기법 (forward modeling)

GRACE 신호의 공간 해상도는 약 300 km (60차 구면 조화 함수)에 해당하기 때문에, 그보다 작은 공간 규모의 신호를 해석하는데 한계가 있다. 게다가 여러 aliasing error를 줄이는 단계에서 신호의 해상도와 세기는 더 낮아지고, 인접한 영역으로 신호가 퍼져나가는 leakage 현상이 나타난다. 일반적으로 육지 영역의 신호가 해양 영역 신호보다 강하기 때문에 해안가에 위치한 해양 신호는 육지로부터 넘어온 leakage에 오염되어 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 Chen et al. (2013)은 순산 모의 기법(forward modeling (FM))을 개발하였다. FM은 육지와 해양의 지리적 경계를 기준으로 감쇄되어 있는 신호를 반복적으로 회복하는 과정을 거친다. 본 연구에서는 PGR 효과를 모델을 통해 제거한 후 FM을 수행하였다. 자세한 FM 방법은 Chen et al. (2013)에 제시되어 있다.

각 반복 과정에서 전 지구적으로 표면 질량이 배치되기 때문에 불완전한 무게중심 성분(degree-1 구면 조화 함수 계수)이 생긴다. 하지만 본래의 GRACE 신호에는 degree-1 계수가 없기 때문에 반복 과정 중 생기는 degree-1 항은 항상 제거한다. 일정 수 이상의 반복을 거친 후에 업데이트되는 해양 신호의 변화량은 0에 가깝게 수렴하며, 이때 우리는 FM의 최종 해를 얻었다고 판단한다. 원래의 FM 방법에서는 해양질량이 모든 곳에서 동일하다고 가정하지만 보다 더 정확한 육지와 해양의 질량 분포를 얻기 위해서 Jeon et al. (2018)은 Self-attraction and loading (SAL) 효과(Farrell and Clark, 1976)를 가정한 FM을 수행하였다. 추가적으로 본 연구에서는 PGR model에서 불확실성이 높은 $\Delta C21/\Delta S21$ 계수를 보정하여 표면 질량 변화에 의해서만 유도되는 $\Delta C21/\Delta S21$ 을 얻는 것이 목적이기 때문에 FM 시작 전에 $\Delta C21/\Delta S21$ 계수가 없는 상태에서 반복을 시작한다. FM 반복 과정에서

발생하는 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 성분 또한 degree-1 계수처럼 제거한다. 결과적으로 수정된 FM 방법을 이용하여 얻은 해에는 leakage 효과뿐 아니라 PGR error가 최소화된 표면 질량 분포를 얻을 수 있다. PGR error가 최소화되었다고 판단할 수 있는 근거는 PGR 모델에서 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 외에는 모델간 차이가 적고, 미처 제거하지 못한 잔여 PGR의 영향은 구면 조화 함수의 차수가 커질수록 GRACE 표면 질량 분포에 비해서 매우 작으므로 FM 반복을 거치는 동안 그 영향이 미미해지기 때문이다(그림 3.1).

다. Degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 추정

앞서 말했듯이 degree-1 구면 조화 함수 계수는 GRACE의 육지 신호와 해양 모델을 결합하여 얻을 수 있다(Swenson et al., 2008). Swenson et al. (2008)은 해양 모델로써 육지 질량 변화량과 총량은 같지만, 부호가 반대이면서 평평한 해수면 모델을 가정하여 degree-1 구면 조화 함수 계수를 계산하였다. 하지만 이 방법은 크게 세 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째, 해양질량은 전 지구적으로 평평하게 분포한다는 가정은 이론적으로 적합하지 않으며, SAL 효과가 고려된 해양 모델을 사용하는 것이 더 적절하다(Sun et al. 2016; Jeon et al., 2018). 둘째, leakage 보정을 하지 않은 상태의 GRACE 신호를 이용하기 때문에 degree-1 구면 조화 함수 계수는 leakage에 오염되어 있다. 셋째, 사용된 PGR 모델에 내재 되어 있는 PGR error의 수준에 따라 결정되는 degree-1이 상이하다. 본 연구에서는 leakage 및 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 과 관련된 문제를 FM을 통해 보정 및 제거하였으며, SAL 효과를 해양 모델로 채택하였다. 또한, 저차계수를 추정할 때에는 degree-1 뿐만 아니라 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 구면 조화 함수 계수를 동시에 계산했다. 선행 연구(Sun et al., 2016)에서도 degree-1 뿐만 아니라 다른 구면 조화 함수(ΔC_{20})를 동시에 계산하였지만 불완전한 leakage 보정이 이루어졌다는 점에서 차이가 있다.

Degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 계산 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다. 보다 더 자세한 식의 유도 과정은 Swenson et al., (2008)을 참고하면 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{10}^{ocean} \\ \Delta C_{11}^{ocean} \\ \Delta S_{11}^{ocean} \\ \Delta C_{21}^{ocean} \\ \Delta S_{21}^{ocean} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{10C}^{10C} & I_{11C}^{10C} & I_{11S}^{10C} & I_{21C}^{10C} & I_{21S}^{10C} \\ I_{10C}^{11C} & I_{11C}^{11C} & I_{11S}^{11C} & I_{21C}^{11C} & I_{21S}^{11C} \\ I_{10C}^{11S} & I_{11C}^{11S} & I_{11S}^{11S} & I_{21C}^{11S} & I_{21S}^{11S} \\ I_{10C}^{21C} & I_{11C}^{21C} & I_{11S}^{21C} & I_{21C}^{21C} & I_{21S}^{21C} \\ I_{10C}^{21S} & I_{11C}^{21S} & I_{11S}^{21S} & I_{21C}^{21S} & I_{21S}^{21S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C_{10} \\ \Delta C_{11} \\ \Delta S_{11} \\ \Delta C_{21} \\ \Delta S_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta G_{10C} \\ \Delta G_{11C} \\ \Delta G_{11S} \\ \Delta G_{21C} \\ \Delta G_{21S} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

식(3.1)에서 $[\Delta C_{10}^{ocean} \ \Delta C_{11}^{ocean} \ \Delta S_{11}^{ocean} \ \Delta C_{21}^{ocean} \ \Delta S_{21}^{ocean}]^T$ 은 FM 해에서 SAL 효과에 의해 예측되는 구면 조화 함수 계수들이다. \bar{I} 행렬은 아래 식과 같다.

$$\bar{I} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{U} \bar{U}^T \vartheta(\theta, \phi) d\Omega \quad (3.2)$$

이때, \bar{U} 행렬은 아래 식과 같다.

$$\bar{U} = [\Delta U_{10C} \Delta U_{11C} \Delta U_{11S} \Delta U_{21C} \Delta U_{21S}]^T \quad (3.3)$$

식(3.3)의 \bar{U} 행렬의 각 성분은 아래 식과 같다.

$$U_{lm\psi} = \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{cases} \cos(m\phi) (\psi = C) \\ \sin(m\phi) (\psi = S) \end{cases} \quad (3.4)$$

위 식의 θ 와 ϕ 는 각각 여위도와 경도를 나타내며, \tilde{P}_{lm} 은 정규화된 버금 르장드르 함수이다. $\vartheta(\theta, \phi)$ 는 해양 함수로써 육지 영역은 0이고 해양 영역은 1이다. \bar{G} 행렬은 \bar{U} 로 이루어져 있으며 FM 해에서 얻어지는 지구 전체의 구면 조화 함수 계수이다.

$$\Delta G_{lm\psi} = \frac{1}{4\pi} \int U_{lm} \vartheta(\theta, \phi) \sum_{l'=2}^{\infty} \sum_{m'=0}^{\infty} \tilde{P}_{l'm'}(\cos\theta) [\Delta C_{l'm'} \cos(m'\phi) + \Delta S_{l'm'} \sin(m'\phi)] d\Omega$$

$[\Delta C_{10} \Delta C_{11} \Delta S_{11} \Delta C_{21} \Delta S_{21}]^T$ 이 수렴할 때까지 $[\Delta C_{10}^{ocean} \Delta C_{11}^{ocean} \Delta S_{11}^{ocean} \Delta C_{21}^{ocean} \Delta S_{21}^{ocean}]^T$ 을 업데이트해 가며 식(3.1)을 반복적으로 풀게 되면 저차 구면 조화 함수 계수들을 얻게 된다. 이때 얻어진 degree-1, $\Delta C_{21}, \Delta S_{21}$ 구면 조화 함수 계수는 PGR error가 최소화되어 있는 FM 최종 해를 기반으로 계산되었기 때문에 대부분이 지구 표면에 존재하는 물과 얼음의 질량에 의해 결정되는 저차계수들이다.

3.3.3. 결과

가. PGR 모델 error가 보정된 Degree-1, $\Delta C_{21}, \Delta S_{21}$ 구면 조화 함수 계수

그림 3.2는 PGR error의 보정 유무에 따른 degree-1 구면 조화 함수 계수들을 나타낸다. 좌측 그림들은 ΔC_{21} 과 ΔS_{21} 에 의한 PGR 모델 잔여 오차들이 남아 있는 상태에서 계산한 값들이고, 우측 그림들은 PGR 모델의 잔여 오차 성분 보정이 고려된 값들이다. PGR error가 보정된 경우, 사용된 PGR 모델에 상관없이 선형성분들의 편차가 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

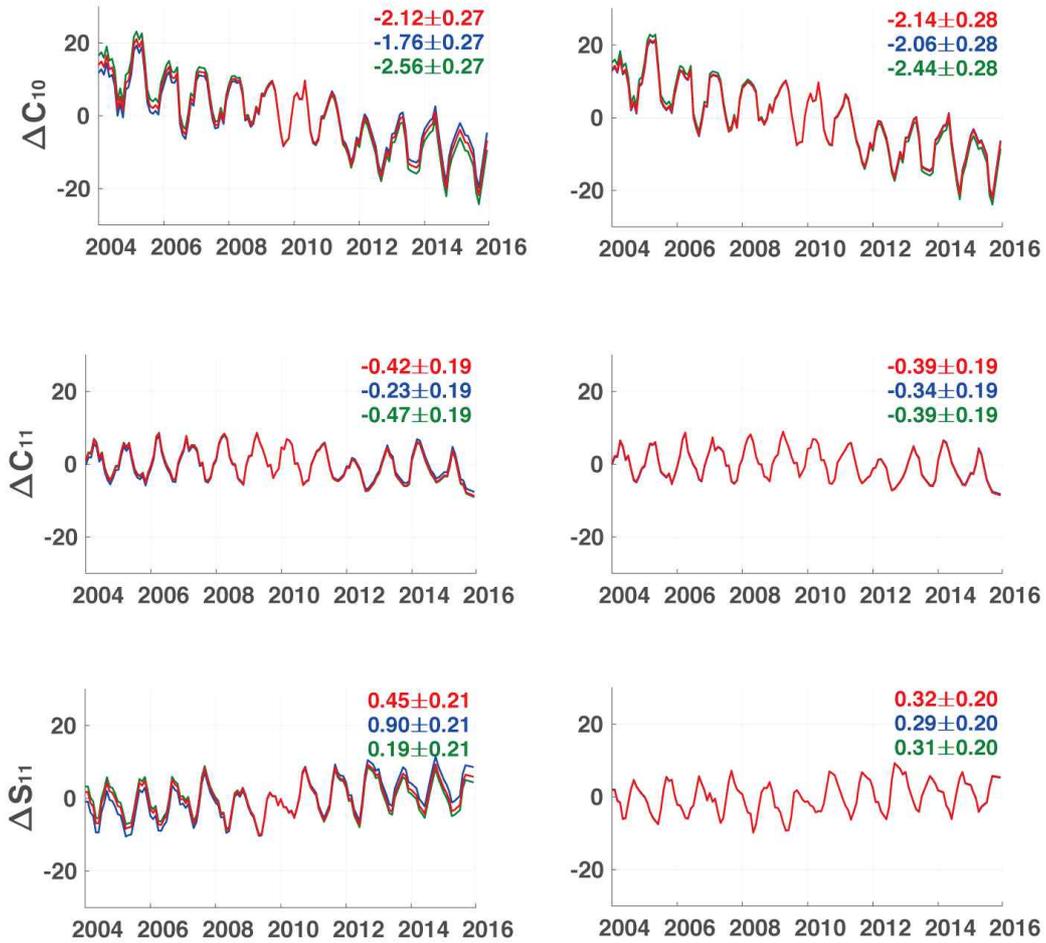


그림 3.2. PGR error가 포함된 degree-1(좌) 과 PGR error가 보정된 degree-1(우) 구면 조화 함수 계수. 첫 행은 ΔC_{10} , 두 번째 행은 ΔC_{11} , 마지막 행은 ΔS_{11} , 구면 조화 함수 계수이다. 빨간색은 A13, 파란색은 Paulson07, 녹색은 Peltier15를 이용하여 PGR 효과를 보정한 결과이다. 세로축의 단위는 mm이고, 각 그림 속의 숫자는 시계열의 선형성분(mm/yr)을 나타낸다(95% 신뢰구간).

현재 보고서에 나타나진 않았지만, 이러한 보정 방법의 타당성을 검증하기 위해서 모의실험을 수행하였다. 그 결과 본 연구의 방법을 적용했을 때, degree-1 계수들이 참값과 가까운 결과로 산출되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.3에서 왼쪽 그림들은 GRACE 신호에서 PGR 모델만을 이용하여 그 효과를 제거한 ΔC_{21} , ΔS_{21} 계수를 나타내고 오른쪽 그림들은 PGR error를 보정해준 계수들의 시계열을 나타낸 것이다. PGR error가 남아 있는 ΔS_{21} 의 경우에는 선형성분의 부호가 반대로 나타날 정도로 PGR model 간의 차이가 크다. 반면 PGR error 보정을 거친 후의 두 계수들은 PGR 모델에 상관없이 선형성분들이 서로 잘

일치한다. ΔC_{21} 과 ΔS_{21} 의 경우도 모의실험을 한 결과, PGR error가 보정되었을 때 참값과 매우 유사한 선형성분을 나타내었다.

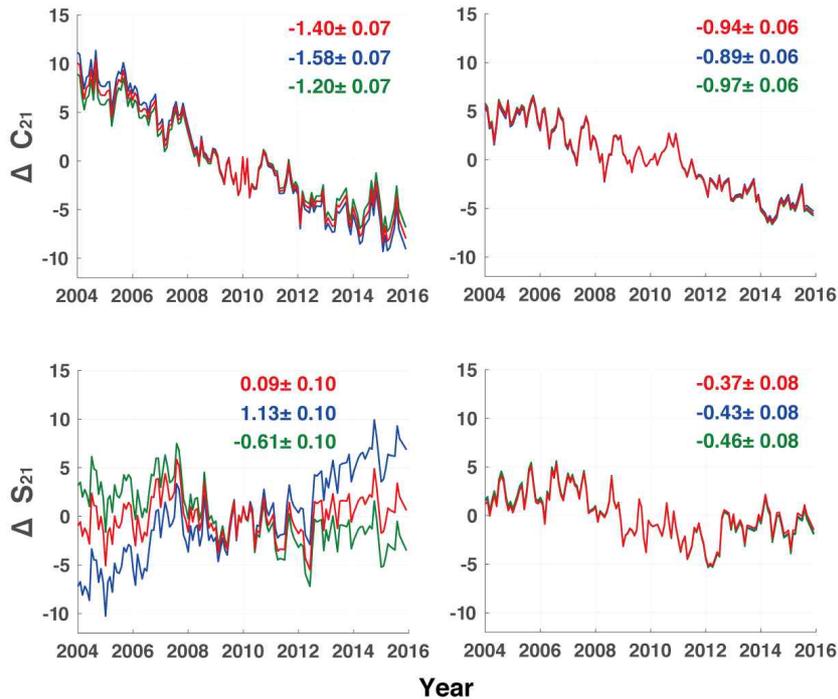


그림 3.3. 왼쪽 그림들은 A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해서 PGR 효과가 보정된 GRACE ΔC_{21} (위), ΔS_{21} (아래) 그림이다. 오른쪽 그림들은 왼쪽 그림들의 경우와 비슷하지만 PGR error가 제거된 ΔC_{21} , ΔS_{21} 구면 조화 함수 계수들이다. 세로축의 단위는 mm이고, 각 그림 속의 숫자는 시계열의 선형성분(mm/yr)을 나타낸다(95% 신뢰구간).

나. 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면 변화

PGR error가 보정되지 않은 저차 계수들(그림 3.2와 3.3의 좌측 계수)과 보정된 계수들(그림 3.2와 3.3의 우측 계수)을 고려하였을 때, 대륙별 물 수지 및 해수면의 변화가 어떤 양상을 나타내는지 알아보았다.

그림 3.4는 PGR model error가 보정되지 않은 대륙별 물 수지(a~g) 및 평균 질량 해수면 변화(h)를 나타낸다. 저차 계수들의 특성상 대규모 신호에 큰 영향을 주기 때문에 degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 구면 조화 함수 계수에 잔여 오차 성분들이 남아 있다면 표면 질량의 추정은 PGR 모델의 선택에 따라 매우 다양하게 나타난다. 특히 Paulson07(파란색)의 경우 다른 두 모델을 이용했을 때 보다 유라시아와 평균 해수면은 매우 낮게 추정하는 반면 북미에서는 Greenland에 버금갈 정도의 질량 손실이 있는 것처럼 오해할 수가 있다.

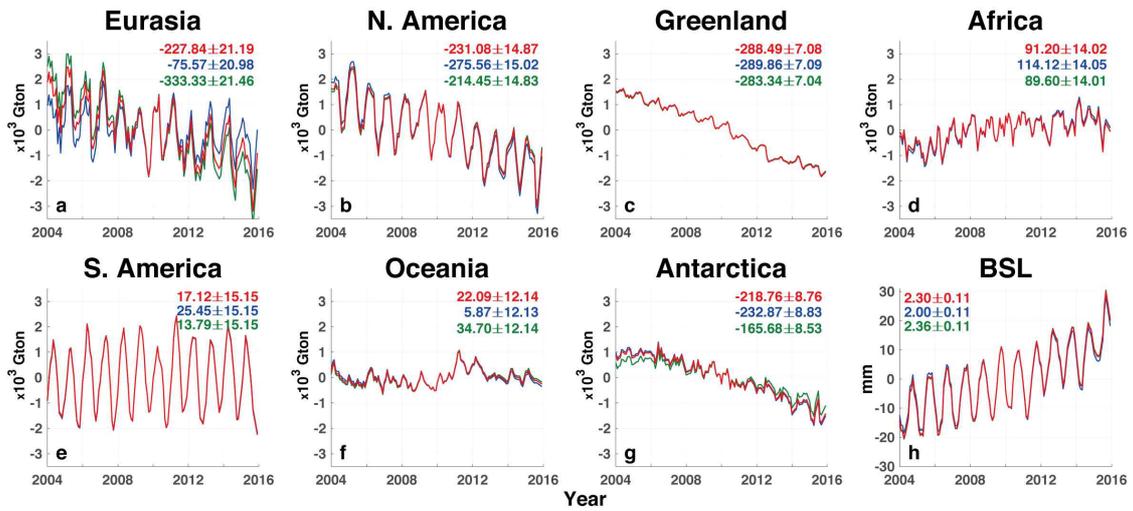


그림 3.4. A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해 PGR 효과가 제거된 GRACE 자료로부터 계산한 대륙별 물 수지(a~g)와 평균 질량 해수면 변화(h). Leakage 효과는 FM을 이용하여 모두 제거되었다. 각 그림 속의 숫자들은 계절 변동 성분이 제거된 시계열의 선형 성분과 95% 신뢰구간을 나타낸다(a~g: GTon/yr, h: mm/yr).

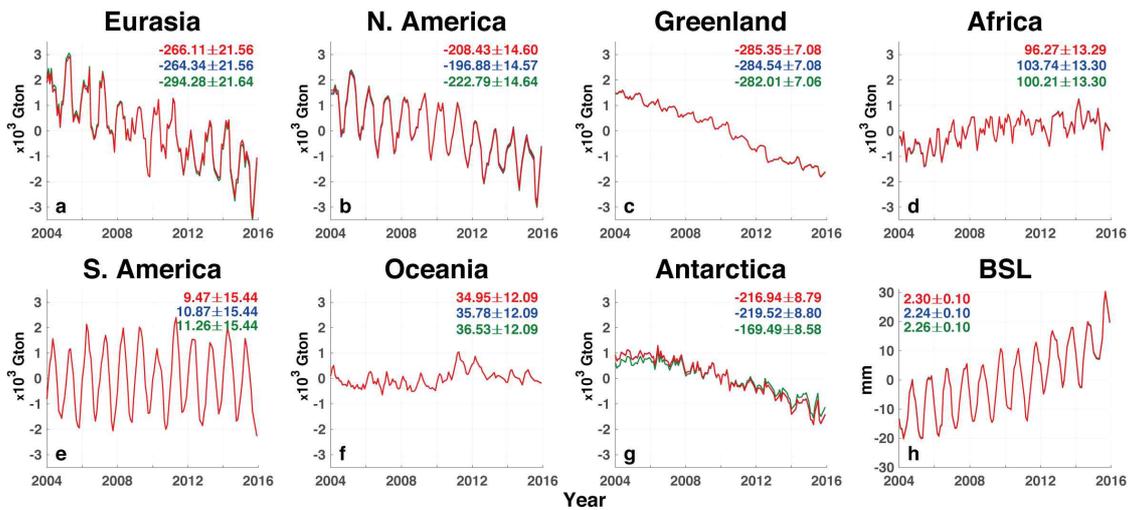


그림 3.5. 그림 4와 유사하지만, PGR model error가 보정된 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면 변화.

반면 그림 3.4와 달리 그림 3.5에서는 남극을 제외하고 모든 대륙의 선형 성분들이 오차범위 안에서 잘 일치한다. 흥미로운 사실은 PGR error가 존재하는 경우 PGR 모델에 따라 유라시아와 북미의 질량 변화를 해석하기 난해하였지만 PGR error가 보정되었을 때는 각 대륙의 질량 손실률이 PGR 모델에 상관없이 비슷하게 나타난다는 것이다. 이뿐만 아니라 두 대륙의 질량 손실률의 합이 그린랜드와 남극

질량 손실률 합에 버금간다는 것이다. BSL(h)의 경우에 어떠한 PGR 모델을 사용하더라도 평균값 2.27 mm/yr과 크게 다르지 않다. 해수의 질량 변화량(2.27 mm/yr)은 해수의 부피 변화 값(1.3 mm/yr)과 더해지면 위성 고도계가 측정한 평균 바다 해수면 증가 속도(3.5 mm/yr)와 0.07 mm/yr 밖에 차이 나지 않는다(WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018). 이는 저차계수들에 남아 있던 PGR error 성분이 효과적으로 보정되었음을 지시하는 또 다른 검증 도구가 될 수 있다. 그림 3.4와 달리 Paulson07을 이용한 경우에도 다른 두 모델들의 추정값과 큰 차이 없이 상호 간의 높은 일치율을 보인다. 하지만 여전히 남극에서는 A13과 Paulson07을 이용한 값과 Peltier15를 이용한 값에서 큰 차이가 존재하는데 이는 PGR 모델에 사용된 빙하의 역사 차이(ICE-5G, ICE-6G)에서 오는 근본적인 문제로 ICE-5G를 이용하고 있는 PGR model의 개선이 필요하다.

3.3.4. 결론

본 연구에서는 PGR 모델 내에서 가장 불확실성이 높은 ΔC_{21} , ΔS_{21} 계수를 보정했다. PGR error가 존재하는 경우에는 PGR 모델 선택에 따라 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면의 변화 폭이 다양했지만, 보정을 거치고 나면 모델에 상관없이 일관적인 질량 변화량을 보여준다. 다시 말해 공간 규모가 큰 신호를 정확하게 추정하기 위해서는 정확한 저차계수가 수반되어야 함을 의미한다. PGR error가 보정된 자료를 근거로 판단했을 때, 해수면을 상승시키는 요인으로 그린란드, 남극의 빙상 유실뿐만 아니라 유라시아 및 북미에서도 해수면 상승에 큰 기여를 하고 있음이 밝혀졌다. 극지방 외의 대륙별 물 수지의 감소는 기후 변화 및 인간 활동에 따른 관계농업의 증가, 지하수의 감소, 영구 동토층의 질량 감소 등을 지시할 수 있는 관측적 사실임에 큰 의의가 있다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

빙하 변동에 의한 해수면의 지역적 변동 분석기술 개발

육지의 물과 얼음 손실에 의한 해수면 변화는 전 지구 바다의 해수면을 상승시키는 작용을 한다. 가령, 남극 반도와 같이 전 지구 규모에 있어 상대적으로 작은 지역에서 얼음이 유실될 경우에도 바다의 특성상 전 지구 바다의 해수면을 상승시키게 된다. 지금까지 대부분의 해수면 변화 연구 역시 전 지구 평균 해수면 상승률을 이용하여 해수면 상승의 효과를 계산해 왔다. 하지만, 해수면은 중력에 의해 자유롭게 재배치 되기 때문에, 해수면 변동은 전 지구 바다에 동일하게 발생하지 않는다. 서남극과 같이 많은 빙하 유실이 있는 지역은 전 지구 평균 해수면을 상승시키는데 크게 영향을 주지만, 서남극 일대의 해수면은 오히려 하강하게 된다. 이는, 서남극 빙하 유실에 의한 지역적인 중력 가속도 감소로 해수면이 서남극에서 더 먼 바다로 재배치가 되기 때문이다. 반대로, 동 남극은 얼음 질량이 증가하여 전 지구 해수면을 하강시키는 역할을 하고 있는데, 이 지역은 중력 가속도 증가로 오히려 인근 바다의 해수면이 상승하고 있다. 이러한 지역적인 해수면 변동을 효과를 Self-Attraction and Loading (SAL)이라고 한다. 이론적으로 SAL 효과는 이미 밝혀져 있었으나, 그 효과가 명확하게 관측되지는 못하였다. 그 이유는, SAL 효과가 주로 해안선 인근에서 가장 뚜렷이 발생하는데, GRACE를 비롯한 인공위성 자료들은 해안선 인근 바다에서 관측 에러가 매우 크기 때문이다. 이번 연구를 통해, SAL 효과를 계산하는 모델과 GRACE의 고유 에러인 leakage error를 보정하는 자료 처리 기법을 새롭게 개발하여, SAL에 의한 해수면의 지역적인 변동을 관측적으로 최초로 확인할 수 있었다.

제5장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

5.1절. 관측 관련 해외과학기술

남극 빙권 변화 및 해수면 상승 연구에 크게 기여를 한 GRACE 위성의 수명이 다하여, GRACE-II 위성이 최근 발사되었다. GRACE-II 위성은 GRACE 위성에 비해 10배 이상의 해상도를 가질 것으로 예상되어 과학계가 큰 주목을 하고 있다. 하지만, GRACE-II 위성의 가속도계에 결함이 있음이 밝혀져 아직까지 GRACE-II 위성이 관측한 결과가 배포되고 있지 않은 상황이다. 향후, 남극 빙권 및 해수면 변화 연구를 기획할 때 GRACE-II 위성 자료의 한계를 명확히 인식하는 것이 필요하다.

5.2절. 모델링 관련 과학기술

해수면의 지역적 변동인 SAL 효과를 계산하는 모델의 공간 해상도가 급격히 상승하여, 수 km 규모의 작은 효과까지 계산이 가능하게 되었다. 남극 빙하 유실은 상대적으로 작은 규모의 빙하 하류에서 발생하기 때문에 SAL에 의한 해수면 변동 역시 고해상도 계산이 요구된다. 서남극 빙하 유실에 의한 해수면 변동 연구를 위해서 국내 연구진에서도 고해상도 SAL 모델을 개발하는 것이 필요하다.

제6장. 참고문헌

Shepherd, A., et al. (2012), A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 338(30), 1183 - 1189.

Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi (2007), ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards ECMWF Newsletter No. 110.

Chen, J. L., C. R. Wilson, and B. D. Tapley (2013), Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise, *Nat. Geosci.*, 6, 549 - 552, doi:10.1038/NGEO1829.

Cheng, M., B. D. Tapley, and J. C. Ries (2013), Deceleration in the Earth's oblateness, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118(2), 740-747.

Dieng, H. B., A. Cazenave, B. Meyssignac, and M. Ablain (2017), New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach, *Geophys. Res. Lett.*, 44(8), 3744-3751.

Farrell, W. E., and J. A. Clark (1976), On Postglacial Sea Level, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 46(3), 647-667.

Han, S.-C., C. K. Shum, M. Bevis, C. Ji, and C.-Y. Kuo (2006), Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, *Science*, 313(5787), 658.

Jeon, T., K.-W. Seo, K. Youm, J. Chen, and C. R. Wilson (2018), Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry, *Scientific Reports*, 8(1), 13519, doi:10.1038/s41598-018-31972-8.

Peltier, W. R. (2004), Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32(1), 111-149, doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359.

Peltier, W. R., D. F. Argus, and R. Drummond (2015), Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120(1), 450-487.

Swenson, S., D. Chambers, and J. Wahr (2008), Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 113(B8), B08410.

Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004), The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31(9), L09607.

Chambers, D. P., Wahr, J., Tamisiea, M. E. & Nerem, R. S. Ocean mass from GRACE and glacial isostatic adjustment. *Journal of Geophysical Research* 115, doi:10.1029/2010jb007530 (2010).

WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993 - present. *Earth Syst Sci Data* 2018, 10(3): 1551-1590.

Paulson A, Zhong S, Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. *Geophys J Int* 2007, 171(2): 497-508.

A G, Wahr J, Zhong S. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophys J Int* 2012, 192(2): 557-572.

Wu, X., Ray, J. & van Dam, T. Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications. *Journal of Geodynamics* 58, 44-61, doi:10.1016/j.jog.2012.01.007 (2012).

Sun Y, Riva R, Ditmar P. Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J_2 from a combination of GRACE data and geophysical models. *J Geophys Res Solid Earth* 2016, 121(11): 8352-8370.