

GRACE 월별 중력장모델을 이용한 양자강유역 및 삼협댐 지역 저수량 변화 분석

Analysis of Water Storage Variation in Yangtze River Basin and Three Gorges Dam Area using GRACE Monthly Gravity Field Model

황 학¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 이동하³⁾ · 정태준⁴⁾

Huang, He · Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha · Jeong, Tae Jun

Abstract

The GRACE satellite, Launched in March 2002, is applied to research on glacial melt of polar regions, glacial isostatic adjustment(GIA), sea level change, terrestrial water storage(TWS) variation of river basin and large-scale earthquake etc. In this research, the TWS variation of Yangtze river basin from August, 2002 to January, 2009 is analyzed using Level-2 GRACE monthly gravity field model. Particularly, gravity changes of the Three Gorges Dam during the impoundment process in 2003, 2006 and 2008 is observed by estimating equivalent water thickness (EWT). The research results show the distinct annual and seasonal changes of Yangtze river basin, and its amplitude of annual variation is 2.3cm. In addition, we compare the results with water resource statistics and hydrologic observation data to confirm the possibility of research of TWS variation of river basin using GRACE observation data, and also the satellite gravity data is of great help for the research on the movement and periodic changes of river basin.

Keywords : Yangtze River Basin, Three Gorges Dam, GRACE monthly gravity field, Terrestrial Water Storage, Equivalent Water Thickness

초 록

2002년 3월에 발사되어 현재까지 임무 수행중인 GRACE위성의 관측자료는 극지방 빙하의 용해, 빙하 지각균형 조정, 해수면 변화, 하천유역의 저수량변화, 대규모 지진 등 지구시스템의 질량재분배에 대한 연구에 활발히 이용되고 있다. 본 연구에서는 GRACE위성의 Level-2 월별 중력장 모델을 이용하여 2002년 8월부터 2009년 1월 사이 양자강유역의 육지저수량 변화를 분석하였으며, 특히는 2003년, 2006년 및 2008년에 수행된 삼협댐의 3단계 저수과정에 의한 삼협댐 지역에서의 중력변화를 등가수분두께로 계산하여 살펴보았다. 연구결과, 연구기간 내의 양자강유역은 뚜렷한 연변화와 계절변화를 나타내었으며, 연변화의 진폭은 2.3 cm로 계산되었다. 또한, 실제 수자원통계자료 및 수문관측자료와의 비교를 통하여 GRACE위성자료의 이용가능성을 확인하였으며, 이는 향후 위성중력자료를 이용하여 하천유역 내에서의 물의 이동 및 주기적인 변화 연구에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심어 : 양자강유역, 삼협댐, GRACE 월별 중력장, 육지저수량, 등가수분두께

1) 정회원 · 성균관대학교 건설환경연구소 연구원(E-mail:geodesyman@gmail.com)
2) 교신저자 · 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수(E-mail:yoons@skku.edu)
3) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 겸임교수(E-mail:dhlee@geo.skku.ac.kr)
4) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정(E-mail:tjun97@skku.edu)

1. 서 론

2002년 3월에 발사된 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)위성은 NASA ESSP(Earth System Science Pathfinder) 프로그램의 일환으로서, 제공되는 시계열 월별 중력장모델은 전 지구 중력장모델의 정밀도 향상에 획기적인 기여를 하고 있다. 또한, 지구시스템의 질량재분배 과정에서 발생하는 미소한 중력변화를 검출할 수 있어 토양 수분함량이나 산악 빙하, 대륙 빙상 등 다양한 지구물리학적 현상에 대한 연구 및 전 지구적 물순환, 해수면 변화, 빙하 지각균형 조정(Glacial Isostatic Adjustment) 등과 같은 지구 모니터링에도 큰 도움을 주고 있다.

GRACE위성은 지구상공 450km를 비행하는 두 개의 위성(위성간 거리 약 220km)으로 구성되며, L-L SST(Low-Low Satellite to Satellite Tracking)방식으로 위성간 거리변화율(range rate) 즉 두 위성의 속도 변화를 측정한다. 이는 에너지 보존법칙에 의하여 중력장에 의한 위치에너지와 운동에너지의 합이 일정하므로 속도의 변화로 중력장 변화를 결정하는 것이다. GRACE 위성은 이미 설계수명(5년)을 초과하여 운행궤도가 약 5m/일의 속도로 낮아지고 있지만 아직까지 정상적으로 운용이 되고 있으며, 위성자세를 제어하는 추진체가 완전히 소모되는 2013년까지 운행될 예정이다(Wiese 등, 2009). 따라서 400km 공간해상도에서 2~3mm 고정밀도(지오이드고)의 지구 중력장을 약 30일 간격으로 장기간의 시계열 변화 분석이 가능하며(Tapley 등, 2004), 후속모델(GRACE Follow-On)도 추진 중에 있어 지속적인 연구로 이어질 수 있다.

GRACE위성의 중력관측자료는 미국의 텍사스주립대학교 우주연구센터(CSR), 제트추진연구소(JPL)와 독일 포츠담 지구과학연구소(GFZ)에서 처리하여 다양한 종류의 성과로 제공되고 있다. 그중 Level-1 데이터는 공간해상도가 높은 반면 중력장 복원에 복잡한 처리과정이 필요하며, 한편 Level-2 데이터는 전 지구 중력장을 구면조화함수의 계수 형태로 제공되므로 이용이 비교적 용이한 장점이 있다. 또한, Level-2 형식의 월별 중력장모델은 해양조석, 고체지구조석 및 지구자전으로 인한 극조석 등 조석의 영향과 대기와 해양의 변동성으로 인한 비조석 영향을 보정한 상태이다(Bettadpur, 2007). 따라서, 육지에서의 GRACE 중력장모델의 시계열 중력변화는 조석, 대기, 해양의 변동성을 제외한 단순한 육지저수량

(Terrestrial Water Storage, TWS: 토양수분, 지표수, 지하수 및 눈으로 구성)의 변화를 나타내는 것으로 간주할 수 있다. 최근에는 이러한 원리를 바탕으로 지구 중력장의 시계열 중력변화를 등가수분두께(Equivalent Water Thickness, EWT)로 환산하여 전제 유럽대륙(Andersen 등, 2005)이나 아프리카 대륙의 콩고(Congo)강과 잠베지(Zambezi)강 유역(Crowley 등, 2006; Winsemius 등, 2006), 아메리카 대륙의 미시시피강 및 아마존강 유역(Tapley 등, 2004; Syed 등, 2005; Rodell 등, 2007) 등 광활한 지역에서의 대규모 하천유역에 대한 주기적인 TWS 변화 연구가 활발히 진행되고 있다.

중국 양자강(Yangtze river) 유역의 경우, Hu 등(2006)은 15개월(2002년 4월~2003년 12월)의 GRACE 중력장모델을 이용하여 계절별 저수량 변화가 평균 3.4cm 진폭크기로 나타남을 밝혔으며, CPC(Climate Prediction Center), GLDAS(Global Land Data Assimilation System) 등 수문학 모델의 처리결과와 매우 일치하다고 제시하였다. Wang 등(2007)은 22개월(2002년 5월~2004년 12월)의 GRACE 자료를 이용하여 삼협댐 저수지로 유입되는 5개의 중권역 수계에 대한 저수량 변화를 분석하였다. 이러한 선행 연구는 위성중력자료의 처리기간이 2년 미만으로 비교적 짧고, 양자강유역 중부에 위치한 삼협댐의 단계적인 저수과정에 따라 발생하는 저수량의 변화는 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 양자강유역을 대상으로 2002년 8월부터 2009년 1월까지 총 76개월(2003년 6월 및 2004년 1월 제외)의 GRACE위성의 월별 중력장모델을 이용하여 약 7년에 달하는 장기간의 저수량 변화를 살펴보았으며, 2006년~2008년에 양자강유역에서 발생한 극단적인 기상/기후사건과 결합하여 그 영향을 분석하였다. 또한, 삼협댐의 3차례 저수과정(2003년, 2006년, 2008년)으로 인한 수십m의 수위변화와 함께 발생하는 삼협댐 부근 지역에서의 중력변화를 다양한 방식으로 고찰함으로써 Boy와 Chao(2002)의 시뮬레이션 결과에서 제시한바와 같이 GRACE의 위성중력자료를 이용하여 삼협댐의 인위적인 저수과정으로 인한 중력변화를 검출할 수 있는지 분석하고자 한다.

2. 양자강유역 및 삼협댐

유로길이 6,300km의 양자강은 중국 서부지역의 칭짱(Qinghai-Tibetan)고원에서 발원하여 황해(Yellow sea)로

유입하는 중국 최대의 하천이며, 아프리카의 나일강(6,650km)과 남미의 아마존강(6,400km)에 이어 세계에서 3번째로 긴 하천이다. 양자강유역의 총 면적은 180만km²로 중국 국토면적의 약 18.8%를 차지하며, 4억4천만명에 달하는 인구가 이 지역에 거주하고 있다.

삼협댐은 양자강유역의 중·상류구간에 위치한 초대형 중력식 댐으로 1994년 12월에 착공하여 2009년에 완공될 전망이며, 38km 하류에 떨어져있는 거저우(Gezhou) 댐(1988년 완공)과 함께 계단식으로 운영된다. 길이 3,035m, 높이 185m에 달하는 삼협댐의 건설로 인해 평균 폭이 1,576m이고 길이가 662.9km인 하도형 저수지가 형성되었으며, 그 영향권은 서부 중심도시 충칭(Chongqing)시에 이른다. 삼협댐의 저수면적은 1,084km²에 달하며, 완공 후에는 약 40km³ 규모의 물을 저장하게 된다. 그림 1은 본 연구의 대상지역인 양자강유역(A), 양자강유역에 포함되는 지류와 삼협댐의 위치(B) 및 삼협댐의 저수범위(C)를 나타낸 것이다.

3. 육지저수량 변화 탐지

GRACE의 월별 중력장모델은 다양한 차수(CSR: 60

차, JPL: 120차, GFZ: 120차)의 구면조화계수로 제공되며 구면조화함수의 해석을 통해 매월의 전 지구 중력장을 구할 수 있다. 또한, 월별 중력장모델과 일정 기간의 평균중력장과의 차이를 계산함으로써 매월에 해당되는 구면조화계수 C_{nm} , S_{nm} 의 변동성분 \bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm} 을 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (1), 식 (2)와 같이 지구 표면 임의점(ϕ , θ)에서의 중력변화 g 와 지오이드고 변화 h 를 계산할 수 있다.

$$g = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

$$h = R \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

여기서, \bar{P}_{nm} 는 degree n, order m인 완전 정규화된 르장드르 계수, G 는 만유인력상수, M 은 지구의 질량, R 은 지구의 반경을 나타낸다.

GRACE위성 중력장모델의 변동성분을 이용하여 고정밀도의 중력 및 지오이드고의 변화를 계산하기 위해서

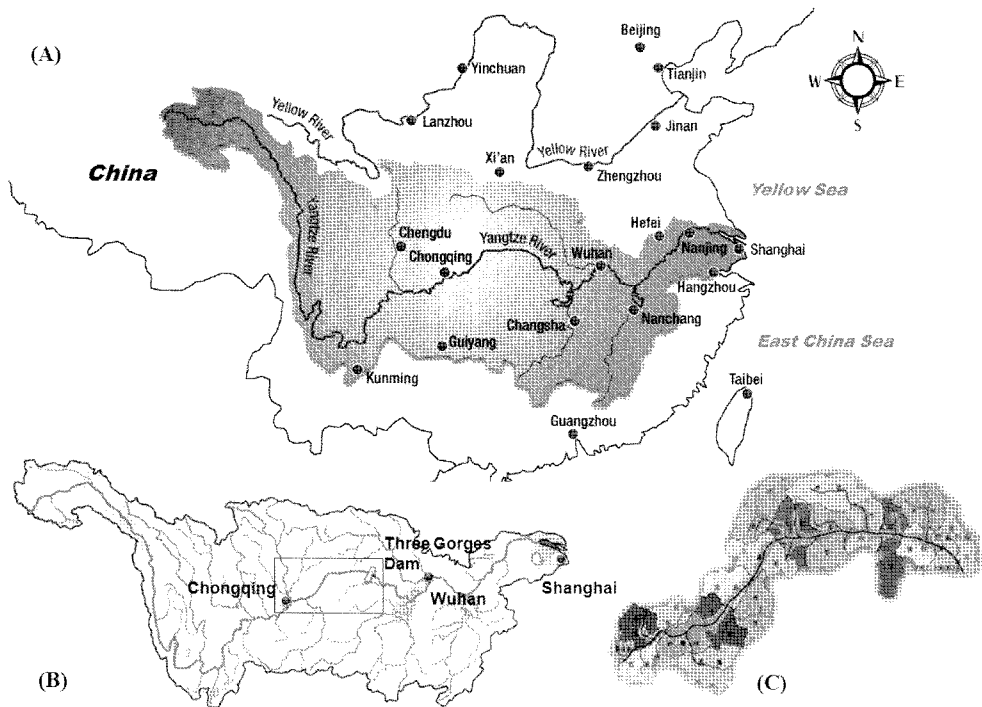


그림 1. 양자강유역 위치도(A), 양자강유역 내 하천분포(B) 및 삼협댐의 저수범위(C) (revised by WWF and CNCS)

는 일반적으로 구면조화 전개를 최대한 높은 차수까지 수행하는 것이 원칙이다. 하지만 GRACE위성은 근극(near-polar)궤도에서 L-L SST방식으로 위성 간 거리와 상대 속도를 측정하기 때문에 위성비행의 시선방향(line of sight)에서 발생하는 신호에 민감한 고유적인 단점을 가지고 있다. 따라서 GRACE위성중력자료에서 해석되는 중력장의 정밀도가 위도방향보다는 경도방향에서 더 높게 나타나는 결과를 초래하며, 남북방향의 줄무늬가 형성되어 물리적인 신호 추출에 큰 영향을 준다(그림 3 참조). 또한, 이러한 현상은 중력장모델의 해석 차수가 높아짐에 따라 포함되는 노이즈 또한 급격히 증가한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Wahr 등(1998)이 고안한 가우시안 필터(gaussian filter)를 적용함으로써 무게함수(w_n)을 이용하여 단파장의 오차를 제거하는 공간 평활화(spatial smoothing)를 수행하였다. 식 (3)은 구면조화 계수의 차수 n에 해당하는 무게 계산식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 w_0 &= \frac{1}{2\pi} ; \\
 w_1 &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1+e^{-2b}}{1-e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right) ; \\
 w_{n+1} &= -\frac{2n+1}{b} w_n + w_{n-1}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식 (3)에서 $b = \frac{\ln(2)}{1 - \cos(r_w/R)}$ 이고, r_w 는 평활화에 적용되는 평균 반경(averaging radius)을 나타내며, 각각의 평활화 반경에 따른 무게변화는 그림 2에 표시하였다. 여기서 가우시안 필터는 구면조화 계수의 차수가 증가됨에 따라 무게가 작아지며, 평활화 반경이 클수록 무게의 감소속도가 빨라짐을 알 수 있다.

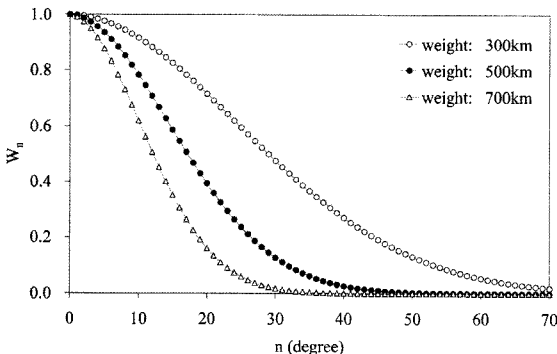


그림 2. 평활화 반경에 따른 가우시안 필터의 무게변화

중력 및 지오이드고의 변화를 표현하는 식 (1)과 식 (2)에 가우시안 필터를 적용하면 식 (4), 식 (5)로 표시할 수 있다.

$$\dot{g} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{max}} (n+1) w_n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) \bar{P}_{nm}(\cos \theta)
 \tag{4}$$

$$\dot{h} = R \sum_{n=0}^{n_{max}} w_n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) \bar{P}_{nm}(\cos \theta)
 \tag{5}$$

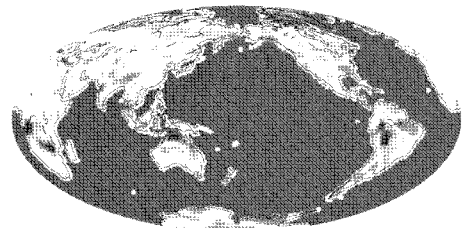
또한, 위에서 언급한바와 같이 하천유역 내의 중력 변화가 단지 육지 상의 수분변화에 인한 것으로 가정할 경우, 식 (4)의 중력변화 \dot{g} 는 등가수분두께(EWT)로 환산하여 다음과 같이 표현된다(Wahr 등, 1998).

$$\Delta\bar{\sigma} = 2\pi \frac{\rho_{av}}{3} \sum_{n=2}^{n_{max}} \frac{2n+1}{1+k_n} w_n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\phi + \bar{S}_{nm} \sin m\phi) \bar{P}_{nm}(\cos \theta)
 \tag{6}$$

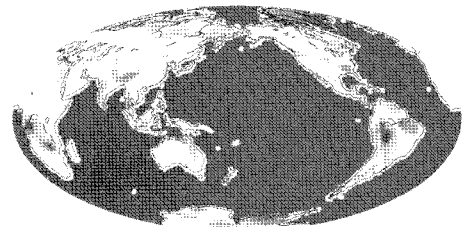
ρ_{av} : 지구의 평균밀도, 5,517kg/m³

k_n : degree n에 해당하는 Love수

그림 3은 최대차수 60차의 구면조화분석에서 평활화 반경을 0km, 300km, 500km로 설정하였을 때의 EWT변화를 나타낸 것으로 500km 반경의 가우시안 필터를 적용한 결과가 기타 경우에 비해 노이즈가 효과적으로 제어된 것으로 나타났다.



(a) 0km



(b) 300km

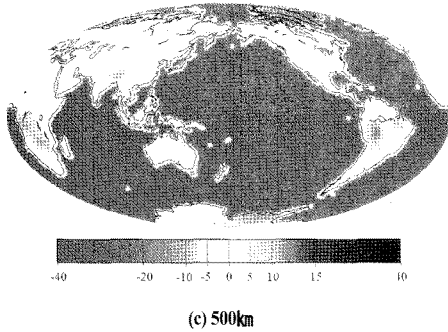


그림 3. 평활화 반경에 따른 가우시안 필터링 결과 (단위: cm)

4. 처리 및 분석

본 연구에서는 CSR에서 제공하는 2003년~2007년 사이의 월별 중력장모형(Level-2)을 이용하여 계산한 평균 중력장모형을 기준으로 2002년 8월부터 2009년 1월까지의 총 76개월(2003년 6월 및 2004년 1월 제외) 시계열 중력장모형과 평균중력장모형의 계수차로 최대차수 60차까지의 구면조화분석을 수행하여 TWS(cm단위의 EWT) 변화를 결정하였다. 연구대상지역 내의 구면조화분석은 1° 간격으로 수행하여 격자로 표현하였으며, 월별 TWS 결과를 양자강유역 전체, 양자강 상류지역 및 중·하류지역, 그리고 삼협댐 저수지역으로 구분하여 시계열 변화를 구하였다. 또한, 각각의 시계열 결과자료에 대해서

는 CLEAN알고리즘을 적용한 파워 스펙트럼 분석을 통하여 진폭과 주기를 계산하였다(Baisch 등, 1999).

4.1 양자강유역의 TWS 변화

4.1.1 연변화 분석

그림 4는 양자강유역 전체의 TWS변화를 시계열로 표현한 것이며, 표 1은 MWR (2009)에서 고시한 2002년부터 2007년 사이의 강수량 및 수자원 총량을 비교대상으로 나타낸 것이다. 전반적으로 GRACE위성 중력장모형을 이용한 TWS의 변화량 계산결과는 연 최고치를 기준으로 볼 때 수자원 총량의 변화와 매우 일치함을 알 수 있다. TWS의 시계열 그래프를 보면 우기인 6월~10월에서는 TWS 값이 0보다 크고, 12월~4월은 0보다 작은 값을 나타내어 뚜렷한 계절변화를 확인할 수 있으며, 2004년 3월에 -5.830cm로 가장 낮은 수치를 나타내었고, 최대치는 9.465cm로 2008년 8월에 나타났다. 스펙트럼 분석 결과, 양자강유역의 저수량 주기는 11.96월로 계산되었으며 그 진폭은 약 2.5cm로 결정되었다(그림 5 참조).

Yang 등(2009)에 의하면 양자강유역은 2000년부터 우기기간의 하천 유량이 적어지고 있으며, 특히 각종 수리시설의 건설로 인해 중·하류지역의 유량이 현저히 감소하는 추세에 있다. 또한, 기후온난화의 영향으로 양자강유역은 2006년~2008년에 극단적인 기상/기후사건(extreme weather/climate events)이 발생하였는데, 여기에는 2006년의 고온·가뭄(I), 2007년과 2008년 여름의

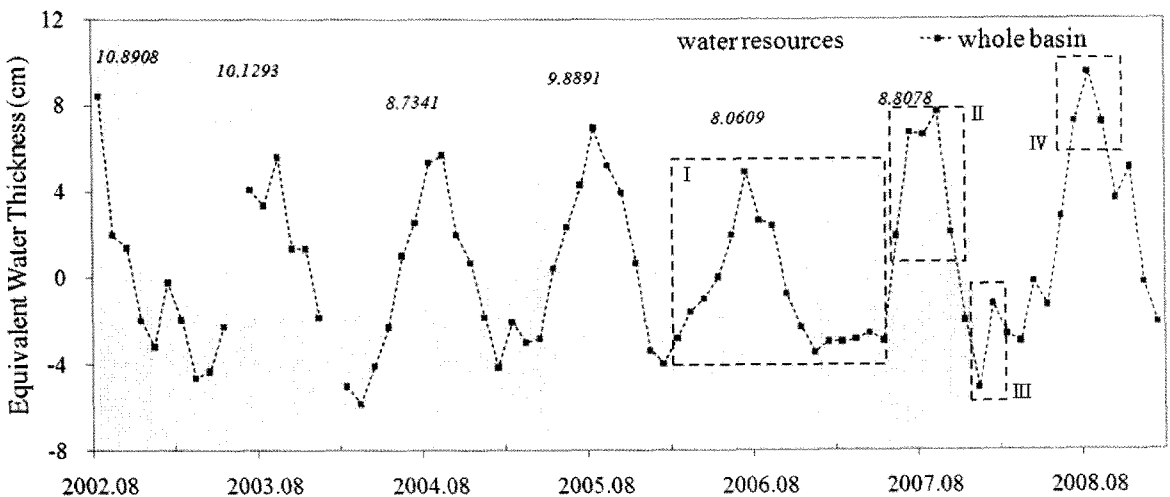


그림 4. 양자강유역 TWS의 시계열 변화

지속 폭우(Ⅱ와 Ⅳ), 2008년 1월 중국 남부지역의 대규모 폭설(Ⅲ) 등이 포함된다. 양자강유역은 2006년의 심각한 가뭄피해로 강수량이 2005년보다 9.1%가 감소되었고, 수자원 총량도 전년도에 비해 19.1%가 줄어들었다(CJWRC, 2006). 그림 4에서도 확인할 수 있듯이 2006년 1월부터 TWS의 양이 상승하기는 하지만 그 상승폭이 매우 더디며, 년 최고치가 7월에 나타난 후 강수량이 가장 풍부해야 할 8, 9월부터는 하락하는 양상을 보이고 있다. 2006년 12월부터 2007년 5월에 이르기까지 TWS는 거의 일정한 값을 유지하고 있는데 이는 가뭄의 여파로 봄철 하천유량의 부족으로 분석된다. 그림 4 중 Ⅱ의

경우, TWS의 상승은 2개월(6월과 7월)만에 이루어졌으며, 지속적인 폭우의 영향으로 7~9월동안 높은 저수량을 나타내었다. 이와 비슷한 양상을 나타내는 사건 Ⅳ도 2008년의 지속폭우도 일정한 상관관계가 있다고 판단된다. 2008년 1월 10일부터 중국 남부지역에 연속해서 내려진 4차례의 폭설은 50년만의 최대폭설로서 30~50cm에 달하는 적설이 광범위하게 분포되었다(Tao 등, 2008). 사건 Ⅲ에 표시된 2007년 12월과 2008년 1월의 TWS차이는 3.833cm에 달하여 이러한 급격한 변화가 폭설의 영향에 기인한 것으로 추정된다.

표 1. 양자강유역의 강수량 및 수자원 총량 통계

(단위: 억 m³)

Item \ Year	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Precipitation	21023.93	18593.28	18546.87	19107.50	17374.55	18030.00
Surface water	10788.31	10023.24	8633.64	9788.50	7959.89	8699.30
Ground water	2704.93	2452.61	2259.52	2430.32	2194.87	2268.10
Unduplicated surface & ground water	102.48	106.04	100.50	100.56	100.97	108.40
Water resources	10890.79	10129.28	8734.14	9889.06	8060.86	8807.80

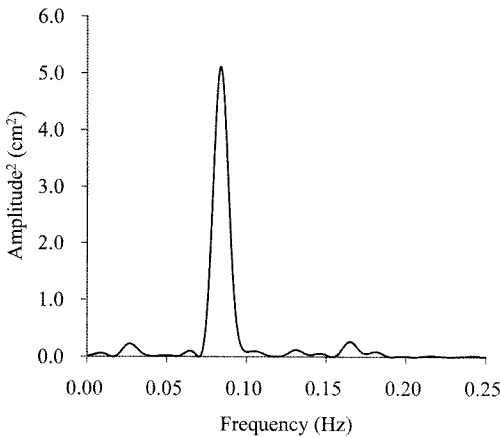


그림 5. 양자강유역 TWS 연변화 스펙트럼 분석

4.1.2 계절변화

양자강유역의 연변화 뿐만 아니라 전형적인 연중 계절변화를 분석하기 위해 그림 4의 결과를 토대로 TWS의 변화가 일정하고 삼협댐의 저수기간에 속하지 않는 2005년을 선택하여 월별 TWS 변화분포도를 작성하였으

며 그림 6에 표시하였다. 그림 6에서 보는바와 같이 양자강유역은 계절에 따라 선명한 변화를 나타내고 있다. 구체적으로 1월에서 4월까지의 평균 저수량보다 작은 양상을 나타내었고, 우기의 초입인 5월에 접어들면서 유역의 중심부를 시점으로 저수량이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 6월에서 10월까지 양자강유역 전 지역에서 풍부한 저수량을 관찰할 수 있으며, 최대 저수량은 8월에 나타났다. 또한, 양자강유역의 서남부는 티벳고원에서 발원하여 인도양으로 흘러드는 Lancang강(Mekong강 상류), Nuijiang강(Salween강 상류), Ayeyarwady강 상류, Brahmaputra강 등 수계가 밀집 분포되어 있는 지역이므로 저수량의 변화 폭이 매우 크게 나타나고 있다. 저수량 감소는 11월에 양자강 유역의 남동지역부터 시작되어 12월에는 전 유역이 다시 평균치를 하회하는 것으로 나타났다.

4.2 삼협댐 영향 분석

삼협댐은 2002년 11월 가배수로를 차단한 후 2003년부터 3차례에 걸쳐 저수시험을 실시하여 최종적으로 175.0m의 저수수위를 목표로 하고 있으며, 표 2는 저수

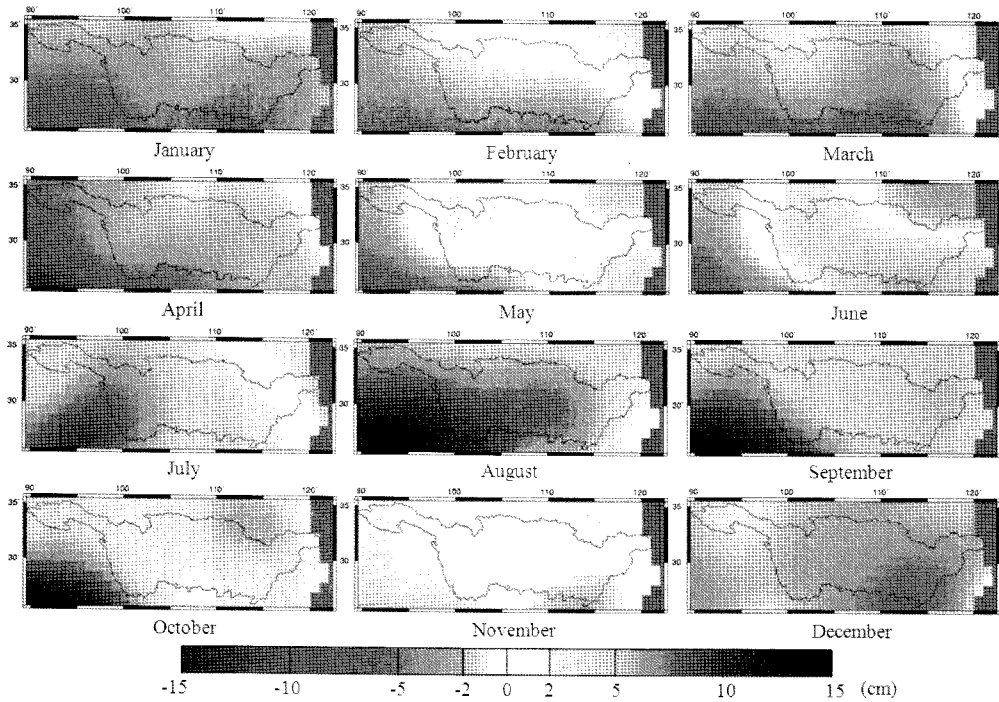


그림 6. 2005년 양자강유역의 TWS 계절변화

표 2. 삼협댐 건설에 따른 저수 수위변화

Phase	Date	Impoundment Period	Water Level(m)		Note
			Start	End	
Phase I (1993-1997)	1997.11.08	-	66.0		closure and diversion of the river
	2002.11.06	-	66.0		diversion channel close
Phase II (1998-2003)	2003.06.01~2003.06.10	10	66.0	135.0	1 st impoundment up 69.0m
	2006.05.20	-	135.0		main body complete
Phase III (2004-2009)	2006.09.20~2006.10.27	37	135.5	156.0	2 nd impoundment up 20.5m
	2008.09.28~2008.11.05	38	145.0	172.3	3 rd impoundment up 27.3m
	2009.	-	175.0		original plans water level

시험에 따른 댐 상류지역 수위변화를 상세히 나타낸 것이다.

Boy와 Chao(2002)는 삼협댐의 인위적인 저수과정을 표면부하의 정/역(forward/inverse) 모델링 연구에 필요한 “대조실험(controlled experiment)”의 소중한 기회라고 여겼으며, Wang 등(2002)은 그린함수(Green function)를 이용한 탄성부하 모델링을 통해 저수수위가 100m, 138m, 175m에 이를 경우 각각 0.1~799 μ Gal, 0.3~2131 μ Gal과

0.5~3405 μ Gal의 중력변화가 발생할 것으로 추정하였다. 하지만 1단계 및 2단계 저수시기에 삼협댐 부근지역에서의 정밀상대중력측량을 수행한 결과 최대 200~250 μ Gal의 중력변화만 관측되었다(Sun 등, 2006, 2007). 본 연구에서도 Sun 등(2007)의 연구와 동일한 범위에 포함되는 동경 111.0°~112.0°, 북위 30.0°~32.0° 내의 저수량 변화를 계산하였으며, 그 결과를 그림 7에 표현하였다.

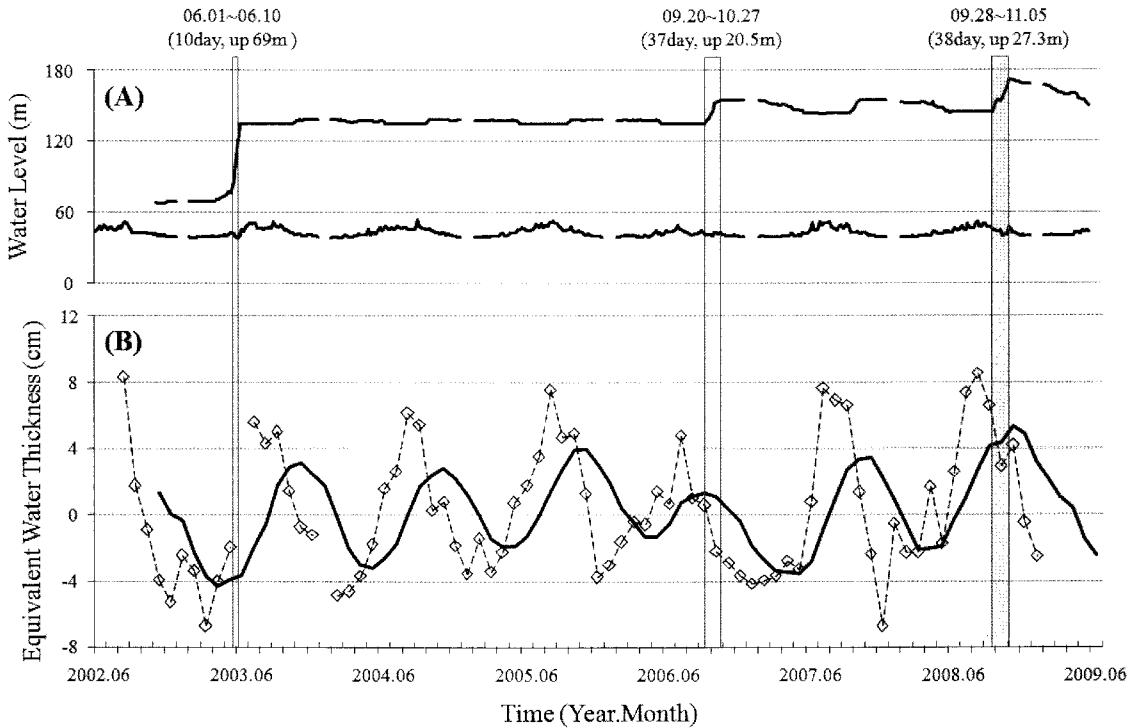


그림 7. 삼협댐 상·하류의 수위변화(A) 및 댐 부근지역의 TWS 변화(B)

그림 7의 (A)는 CTGPC(2009)에서 제공하는 삼협댐 상류(위)와 하류(아래)의 수위관측자료를 표시하였고, (B)는 삼협댐 부근의 저수량 변화 및 6개월 이동평균(실선)을 나타내었다. 수위관측자료에서 볼 수 있듯이 삼협댐 상류의 수위는 3차례의 저수과정을 여실히 반영하고 있으며, 매번의 저수기간에 하류 수위가 다소 낮아지기는 했지만 아주 큰 낙차는 보이지 않고 있다. 유의할 점은 하류지역의 수위가 자연적인 계절변화를 나타내는 반면 댐 상류에서는 인위적인 수위조절로 인하여 우기에는 댐의 수위가 낮아지고 건기에는 수위가 높아짐을 확인할 수 있다. TWS 값의 변화와 삼협댐의 3차례 저수기간 전후에는 뚜렷한 상관성이 확인되지 않으며, 비록 2008년 11월의 값이 전월에 비해 향상되었지만 유사한 신호가 하류지역에서도 동일하게 나타나므로 저수과정으로 인한 결과로 보기는 어렵다. 이처럼 GRACE 위성중력자료가 삼협댐 저수과정에 대한 특정 신호를 탐지하지 못하는 이유는 삼협댐 부근지역에서의 중력 값이 일정한 중력세기 변화를 가져오지만 영향반경이 일반적으로 10 km에 불과하며(Sun 등, 2007), GRACE위성 자체의 시간 해상도 및 공간해상도도 변화 탐지에 제약으로 작용한

것으로 판단된다.

5. 결론

GRACE 월별 중력장모형을 최대차수 60차의 구면조화분석 및 500km 반경의 평활화 처리를 거쳐 TWS의 변화를 계산하여 분석함으로써 GRACE 위성중력자료가 양자강유역의 연평균 저수량 변화와 계절별 변화를 뚜렷이 나타낼 수 있고, 다년간의 수자원통계자료를 토대로 몇몇 극단 기상/기후사건의 영향에 대한 검출이 가능함을 확인하였다. 또한, 동일한 방법으로 삼협댐 부근지역의 중력변화도 검토하였는데, 실제 수문관측자료와 비교분석을 수행한 결과, GRACE위성의 해상도 제약으로 삼협댐의 저수과정에 따른 저수량변화는 검출되지 않았다.

향후 GRACE 월별 중력장모형을 이용하여 결정되는 중력변화는 고체지구물리, 해양물리, 기후학 및 측지학 등 다양한 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며, GRACE 위성중력자료 자체의 해상도 및 정밀도 문제로 말미암아 공간필터링 방법에 대한 다양한 적용

실험과 CPC, GLDAS 및 WGHM(WaterGAP Global Hydrological Model) 등 수문학적 모델을 이용한 구체적인 검증/분석, 그리고 GRACE 위성중력자료의 처리결과에 대한 정확도 평가를 정량적으로 수행하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Andersen, O. B., Seneviratne, S. I., Hinderer, J. and Viterbo, P. (2005), GRACE-derived terrestrial water storage depletion associated with the 2003 European heat wave, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L18405, doi:10.1029/2005GL023574.
- Baisch, S. and Bokelmann, G. H. R. (1999), Spectral analysis with incomplete time series: an example from seismology, *Computers & Geosciences*, Vol. 25, No. 7, pp. 739-750.
- Bettadpur, S. (2007), *Gravity Recovery And Climate Experiment UTCSR Level-2 Processing Standards Document For Level-2 Product Release 0004*, The University of Texas at Austin, pp. 7-12.
- Boy, J. and Chao, B. F. (2002), Time-variable gravity signal during the water impoundment of China's Three-Gorges Reservoir, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 29, No. 24, 2200, doi:10.1029/2002GL016457.
- CJWRC (2006), *Changjiang and Southwest Rivers Water Resources Bulletin 2006*, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, pp. 5-19. (in Chinese)
- Crowley, J. W., Mitrovica, J. X., Bailey, R. C., Tamisiea, M. E. and Davis, J. L. (2006), Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, L19402, doi:10.1029/2006GL027070.
- CTGPC (2009), Real-time Water Regimen, *China Three Gorges Project Corporation*, Yichang, <http://www.ctgpc.com.cn>
- Hu, X. G., Chen, J. L., Zhou, Y. H., Huang, C. and Liao, X. H. (2006), Seasonal water storage change of the Yangtze River basin detected by GRACE, *Science in China Series D (Earth Sciences)*, Vol. 49, No. 5, pp. 483-491.
- MWR (2009), China Water Resources Bulletin, *The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China*, Beijing, <http://www.mwr.gov.cn>
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J., Nigro, J. and Wilson, C. (2007), Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE, *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 159-166.
- Sun, S., Xiang, A., Shen, C., Zhu, P. and Chao, B. F. (2006), Gravity Change After the First Water Impoundment in the Three-Gorges Reservoir, China, *International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 132, pp. 56-61.
- Sun, S., Xiang, A., Xu, R., Zhang, X. and Wei, J. (2007), Changes of local gravity field before and after second impoundment in Three Gorges dam area, *Journal of Geodesy and Geodynamics*, Vol. 27, No. 5, pp. 99-102. (in Chinese)
- Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Chen, J., Rodell, M., Seneviratne, S. I., Viterbo, P. and Wilson, C. R. (2005), Total basin discharge for the Amazon and Mississippi River basins from GRACE and a land-atmosphere water balance, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, L24404, doi:10.1029/2005GL024851.
- Tao, S. Y. and Wei, J. (2008), Severe Snow and Freezing-Rain in January 2008 in the Southern China, *Climatic and Environmental Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 337-350.
- Tapley, B., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F. and Watkins, M. M. (2004), GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System, *Science*, Vol. 35, No. 5683, pp. 503-505.
- Wang, H., Hsu, H. T. and Zhu, Y. Z. (2002), Prediction of surface horizontal displacements, and gravity and tilt changes caused by filling the Three Gorges Reservoir, *Journal of Geodesy*, Vol. 76, No. 2, pp. 105-144.
- Wang, H., Wang, Z. and Yuan, X., et al. (2007), Water storage changes in Three Gorges water systems inferred from GRACE time-variable gravity data. *Chinese J. Geophys.*, Vol. 50, No. 3, pp. 730-736. (in Chinese)
- 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*, Vol. 103, No. B12, pp. 30,205-30,230.
- Wiese, D. N., Folkner, W. M. and Nerem, R. S. (2009), Alternative mission architectures for a gravity recovery satellite mission, *Journal of Geodesy*, Vol. 83, No. 6, pp. 569-581.
- Winsemius, H. C., Savenije, H. H. G., van de Giesen, N. C.,

van den Hurk, B. J. J. M., Zapreeva, E. A. and Klees, R. (2006), Assessment of Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) temporal signature over the upper Zambezi, *Water Resour. Res.*, Vol. 42, W12201, doi:10.1029/2006WR005192.

Yang, G. S., Ma, C. D. and Chang, S. Y. (2009), *Yangtze conservation and development report*, Changjiang Press, Wuhan.

(접수일 2009. 6. 5, 심사일 2009. 6. 19, 심사완료일 2009. 6. 22)