

GRACE 인공위성 중력 자료를 이용한 수자원변화량(TWSC) 산정

TWSC Estimation using GRACE Satellite Gravity Data

김준수* / 이상일**

Joon-Soo Kim, Sang-Il Lee

요 지

지구는 지속적으로 변화하는 동력학적 시스템이며, 지표면 형상 및 지구 내부의 질량분포도 계속 변화하고 있다. 지구시스템의 질량재분배 과정에서 발생하는 밀도 차이는 중력장의 미세한 변이를 초래한다. 미 항공우주센터(NASA)와 독일 국립 항공우주연구센터(DLR)에서 공동으로 개발한 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 인공위성은 지구의 중력장을 측정하는 위성으로, 2002년부터 현재까지 9년 동안 활동해왔다. 본 연구에서는 한반도(북위 37.5°~41.5°, 동경 125.5°~130.5°)의 월평균 수자원변화량(TWSC: Terrestrial Water Storage Change)을 산정하기 위해 미국 텍사스대학교 공간연구센터(CSR)에서 가우시안 필터링을 통해 구면조화함수의 계수 형태로 제공된 총 94개월(2002년 8월~2010년 6월)의 자료(Level-2)를 이용하였다. Level-2 자료는 해양조석, 고체지구조석 및 지구 자전으로 인한 극조석 등 조석의 영향과 대기와 해양의 변동성으로 인한 비조석 영향을 보정한 것이다. 이렇게 산정한 TWSC를 수자원관리정보시스템(WAMIS)과 전지구지표동계화시스템(GLDAS)을 통해 제공되는 자료와 비교·분석하였다. 본 연구를 통해 GRACE 중력장 자료가 수자원총량의 산정과 검증에 위한 대안으로 활용될 수 있음과, 수문요소의 불확실성을 낮출 수 있는 새로운 수문자료로의 활용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : GRACE, 중력장, TWSC(Terrestrial Water Storage Change)

1. 서 론

한반도에서 관측되고 있는 수문자료의 대부분은 지상관측을 통해 획득된다. 기존의 기상 관측 방법을 통한 강수량, 침투량, 증발산량 등의 기초자료 획득에는 시·공간적 한계가 있어 새로운 방법론이 필요하다. 이러한 상황에서 미 항공우주국 NASA에서 발사된 인공위성 GRACE를 통해 제공되는 월별 중력장 자료를 이용한 우리나라 수자원 총량의 산정이 가능하게 되었다. 산정한 수자원 총량 내 각 수문요소의 불확실성을 축소하고, 정량화된 Database을 통해 수자원 장기 종합계획 수립 시 효율적인 기초자료 산출을 제공할 수 있을 것이다.

2. GRACE 인공위성 개요 및 중력 자료 특성

2.1 GRACE 개요

GRACE위성은 미국 NASA ESSP(Earth System Science Pathfinder)의 두 번째 과제

* 학생회원 · 동국대학교(서울) 토목환경공학과 석사과정 · 공 학 사 · E-mail: kim-joon-soo@nate.com

** 정 회 원 · 동국대학교(서울) 건설환경공학과 교 수 · 공학박사 · E-mail: islee@dongguk.edu

1997년 5월에 채택되어, 2002년 3월 17일에 Plesetsk (62.7° N, 40.3° E) Russia에서 발사된 인공위성으로서 전 지구 중력장과 시간변이에 따른 중력장 변화의 탐사를 목적으로 미국 NASA와 독일 DLR(Deutschen Zentrum für Luft-und Raumfahrt)이 공동으로 만든 쌍둥이 인공위성이다. GRACE 위성의 중력장측정 원리는 위성체 내의 가속도계 센서인 ACC(Accelerometer)와 이중 단방향 거리측정기 KBR(K-Band Ranging System)을 통해 지표면 위치 변화에 따른 중력세기 차이를 측정하여 저궤도 위성과 같은 위도상의 다른 위성 간의 거리변화율을 측정하는 Low-Low Satellite to Satellite Tracking(L-L SST) 방법을 사용한다. GRACE위성은 고도 약 500km에서 서로 약 220km 떨어져있는 두 개의 위성간의 거리의 시간적 변화(range rate)를 측정하고, 중력장에 의한 위치에너지와 운동에너지의 합은 일정(에너지 보존법칙)하다고 가정, 속도의 변화를 측정하여 중력장의 변화를 기록한 자료는 이전의 위성이 과거 수십 년간 관측한 중력 자료보다 양적, 질적 측면에서 훨씬 우수한 것으로 평가되며, 월평균 중력장 변화의 형태로 NASA를 통해 제공된다.

2.2 GRACE 중력 자료의 특성

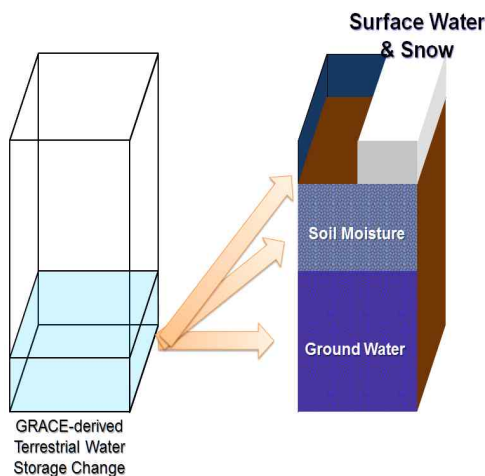


Fig. 1 수자원변화량(TWSC) 개념

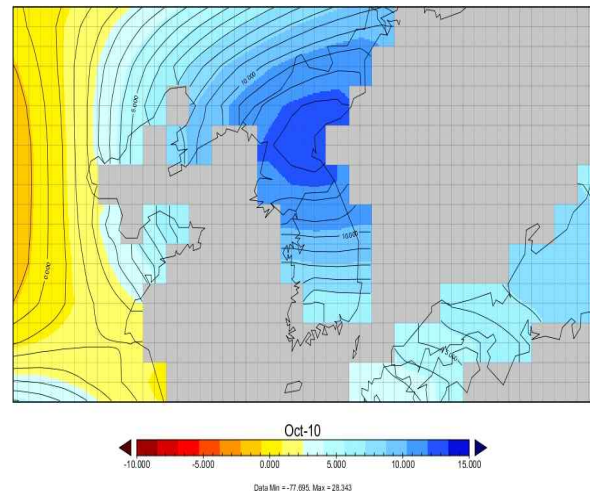


Fig. 2 GRACE Level-2 수자원저수량 예시

현재 미국 NASA에서 제공되는 GRACE 월별 중력장 자료는 미국의 텍사스주립대 공간연구센터(CSR), 제트추진연구소(JPL)와 독일 포츠담 지구과학연구소(GFZ)에서 제공되며, 처리 단계에 따라서 4가지(Level-0, Level-1A, Level-1B, Level-2) 형태로 구분된다. 본 연구에서 이용될 CSR Level-2 자료는 전 지구 중력장을 약 30일 간격으로 구면조화분석결과 최대차수(degree and order) 60차까지 계산된 자료를 사용하였다. 이는 해양조석, 고체지구 조석 및 지구 자전으로 인한 극조석 등 조석의 영향과 대기와 해양의 변동성으로 인한 비조석 영향을 보정한 상태의 자료이다. 육지에서의 Level-2 월별 중력장 자료는 수자원저수량(TWS: Terrestrial Water Storage) 변화를 Fig. 1과 같이 나타낸 것으로 하천유역 내의 중력 변화가 단지 육지 상의 수분변화(지하수, 함수량, 강우, 눈)에 기인한 것으로 정의된다. Level-2 월별 중력장 자료는 cm단위의 등가수분두께(EWT: Equivalent Water Thickness)로 환산되며, 중력장 자료의 차수가 높아짐에 따라 생성되는 단파장 오차를 제거하기 위한 방법으로 Wahr(1998)가 고안한 가우시안 필터(gaussian filter)를 적용한 공간 평활화 반경 0

km, 300km, 500km가 제공된다(Bettadpur, 2007).

3. 수자원 변화량 계산

공간연구센터(CSR)에서 제공받은 2002년 8월에서 2010년 6월까지 총 94개월(03년 6월, 04년 1월 결측)의 월별 중력장 자료(Level-2 Land)를 이용하여 등가수분두께(EWT)로 환산된 월평균 수자원저수량(TWS)을 NASA에서 개발한 Software Panoply를 이용하여 Fig. 2와 같이 표현하였으며, 한반도의 구면조화해석 결과 1°×1° 격자간격의 한반도 경·위도(32°N ~ 43°N, 123°E ~ 132°E)에 해당하는 25개의 공간·시계열 자료를 사용하였다. WAMIS 자료와 GLDAS 자료를 이용하여 GRACE 수자원변화량과 같은 한반도의 수자원변화량을 산정하기 위해서 두 기관의 공통된 자료에 대한 상관성 분석이 선행되어야 한다.

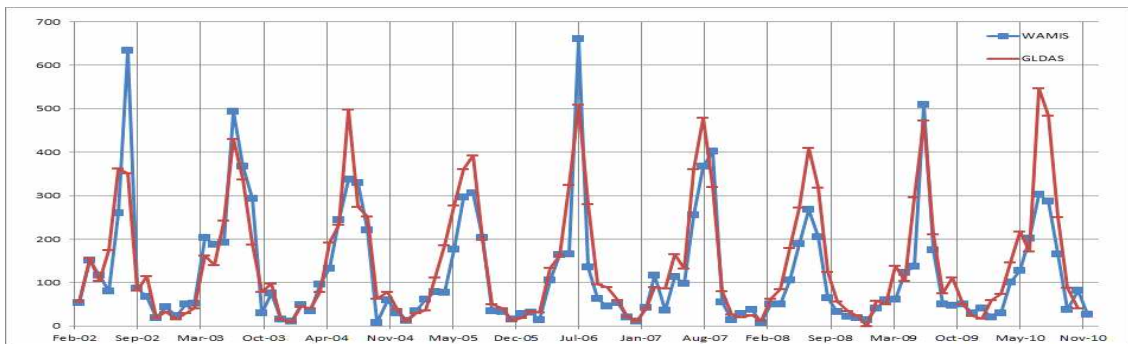


Fig. 3 WAMIS & GLDAS의 강우량 상관분석 (Unit:mm)

두 기관 자료간의 단순상관관계를 살펴 본 결과 두 기관의 강우량에 대한 상관계수가 0.9124로, 이는 두 자료의 높은 상관관계를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3는 2002년 1월에서 2010년 12월까지 WAMIS와 GLDAS 강우량의 변화를 시계열로 표현한 것이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \\ \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & -S_{i,N-1} \\ & \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

GRACE에서 추출한 한반도의 수자원저수량(TWS)을 Eq. (1)에 대입하여 수자원변화량(TWSC)으로 산정하였다. 여기서, \bar{S} 는 수자원저수량, t 는 시간, N 은 월, i 는 GRACE 위성이 관측한 일수를 말한다(Rodell and Famiglietti, 2001).

$$\begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta t \end{bmatrix}_N = \begin{matrix} N \\ N-1 \end{matrix} P - \sum_{N-1}^N E - \sum_{N-1}^N R \quad (2)$$

한반도의 수자원변화량을 산정을 위해 WAMIS(강우량, 증발산량)와 GLDAS 수문자료(유출량)를 Eq. (2)에 대입하였다. ΔS 는 수자원변화량, P 는 강우·강설량, E 는 증발산량, R 은 지표·지표하 유출을 의미한다(Syed, 2008).

Table 1 공간 평활화 반경별 통계 값 (Unit:cm)

spatial smoothing	Min.	Max.	Range	Mean	Median	RMSE
000km	-5.708	4.440	10.148	1.842	0.943	1.744
300km	-2.941	2.746	5.687	-1.204	0.807	1.102
500km	-1.581	2.734	4.315	-1.349	-0.957	0.853

한반도 수자원변화량과 GRACE 자료의 공간 평활화 반경 별 통계 값을 통해 두 자료간의 상관관계를 Table 1과 같이 나타냈다. 한반도 수자원변화량 값에 대한 통계분석을 실시한 결과 공간 평활화 반경이 높을수록 한반도에서 실측한 값과 평균오차가 가장 가깝다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 2002년 8월에서 2010년 6월까지 산정된 WAMIS 자료와 GRACE 자료의 공간 평활화 반경 500km에 대한 수자원변화량에 대한 평균 제곱근 오차(RMSE)를 시계열로 표현한 것이다. 평균 제곱근 오차의 가장 원인은 여름철에 집중되는 강수량으로 짐작된다.

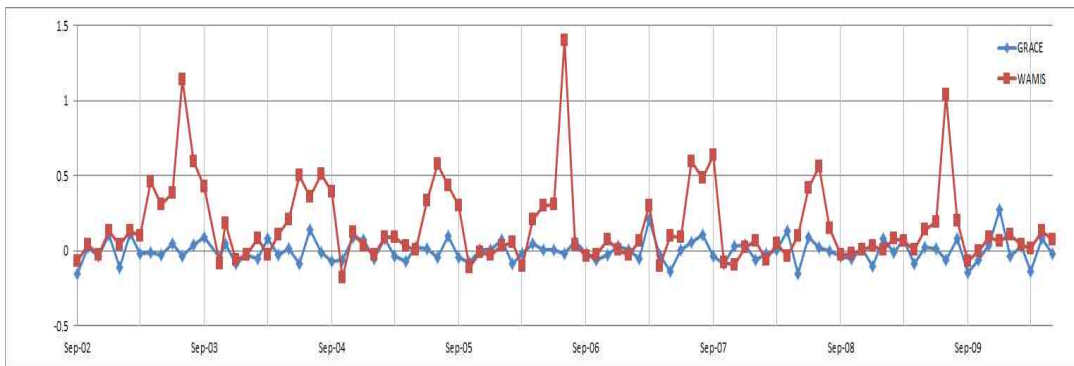


Fig. 4 공간 평활화 반경 500km GRACE와 WAMIS의 RMSE 분석

4. 평균 수자원변화량 산정

구면조화함수 최대 60차까지 해석된 CSR Level-2 위성 중력 자료의 공간 평활화 반경 500km에 대한 2002년 8월에서 2010년 6월까지 총 94개월의 경위도별 평균 수자원 변화량 (Table 2)을 산정하였으며, 전 지역의 평균 수자원변화량은 0.988cm/month으로 산정되었다. GIS S/W인 Map-info를 사용하여 Fig. 5와 같이 한반도의 평균 수자원변화량을 나타내었다. 변화량 폭이 클수록 적색(남쪽), 작을수록 청색(북서쪽)으로 표현되었다.

Table 2 평균 수자원변화량 (Unit:cm/month)

long lat	125.5	126.5	127.5	128.5	129.5	130.5
42.5	-	-	-	-	1.053	1.161
41.5	-	0.794	0.888	0.982	1.077	-
40.5	0.745	0.836	0.923	1.008	1.089	-
39.5	0.784	0.872	0.951	-	-	-
38.5	-	0.906	0.976	-	-	-
37.5	-	0.944	1.003	1.050	-	-
36.5	-	-	1.043	1.078	1.105	-
35.5	-	-	1.102	1.126	1.144	-

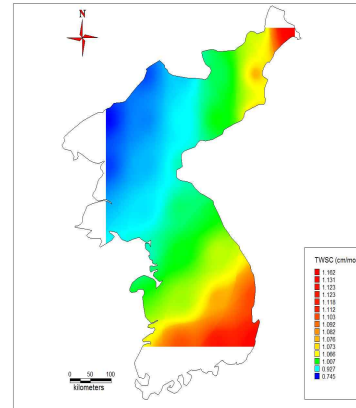


Fig. 5 500km 평균 TWSC

5. 결론

GRACE 위성 중력 자료를 이용한 한반도 전역의 94개월 평균 수자원변화량이 0.988cm/month로 산정되었다. 공간 평활화 반경 500km의 GRACE Level-2 자료가 WAMIS에서 제공된 실측값과 가장 적합한 것으로 나타났다. 향후 보다 정밀한 해상도의 GRACE 중력장 자료를 이용한다면 수문지질도, 지하수 정보 DB, 지하수와 하천수의 수위, 가뭄지도, 해안유역의 지하수 함양을 평가, 지하수 자원조사, 농업, 산림, 해저자원탐사 등 여러 분야에 걸쳐 경제적, 시간적, 공간적인 파급효과를 기대할 수 있다.

감 사 의 글

본 연구는 한국 연구재단의 일반연구자지원사업(과제번호: 20100021311)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Bettadpur, S. (2007). Gravity Recovery And Climate Experiment UTCSR Level-2 Processing Standards Document For Level-2 Product Release 00004. The University of Texas at Austin, pp. 7-12.
2. Rodell, M. and Famiglietti, J.S. (2001). An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). Water Resour. Res., 37(5), 1327 - 1340, doi:10.1029/2000WR900306.
3. Syed, T.H., (2008), Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS, Water Resour. Res., Vol.44, No.2, pp.W02433. DOI:10.1029/2006WR005779.
4. Wahr, J. and Bryan, F. (1998). Time-variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. J. Geophys. Res., Vol.103, No.B12, pp. 30205 - 30230.