

GRACE 위성 중력자료를 활용한 한반도의 평균 수자원변화량 산정

Estimation of Average Terrestrial Water Storage Changes in the Korean Peninsula Using GRACE Satellite Gravity Data

이 상 일* / 김 준 수** / 이 상 기***

Lee, Sang Il / Kim, Joon Soo / Lee, Sang Ki

Abstract

Most hydrologic data are obtained by ground observations. New observation methods are needed for some regions to overcome difficulties in accessibility and durability of long-term observation. In 2002, NASA launched twin satellites named GRACE which were designed to measure the gravitational field of the earth. Using the GRACE monthly gravity level-2 data, we calculated terrestrial water storage change (TWSC) of the Korean peninsula in various spatial smoothing radii (0 km, 300 km, 500 km). For the validation of GRACE-based TWSC, we compared it with land-based TWSC which was obtained using the ground observation data: precipitation and evaporation from WAMIS, and runoff from GLDAS. According to the mean square-error test, GRACE-based TWSC best fits the land-based one at 500 km smoothing radius. The variation of the terrestrial water storage in the Korean peninsula turned out to be 0.986 cm/month, which means that appropriate measures should be prepared for sustainable water resources management.

Keywords : GRACE, gravitational field, TWSC, spatial smoothing

요 지

대부분의 수문자료는 지상관측을 통해 얻어진다. 그러나 어떤 지역은 접근이 어렵거나 장기적인 관측에 어려움이 있기 때문에 지상관측을 대체하거나 보완할 새로운 방법이 요구된다. 시·공간적 한계를 극복할 수 있는 대안으로 미 항공우주국 NASA에서 2002년 지구 중력장을 측정하는 GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment) 인공위성 자료가 존재한다. 본 연구에서는 GRACE Level-2 중력자료를 이용하여 공간평활화 반경별(0 km, 300 km, 500 km)로 한반도의 수자원변화량(GRACE-based TWSC)을 산정하였다. 산정된 결과의 타당성을 검증하기 위해, 지상 수문 관측자료를 이용한 수자원 변화량(land-based TWSC)과의 비교를 시도하였다. Land-based TWSC는 WAMIS의 강우량, 증발산량 및 GLDAS의 유출량 자료를 이용해 계산하였다. GRACE-based TWSC와 land-based TWSC의 RMSE 검정 결과, 공간평활화 반경 500 km의 위성자료가 한반도에 가장 적합한 것으로 나타났다. 한반도의 월별 평균 TWSC는 0.986 cm/month로 나타났고, 이러한 큰 변화폭 때문에 안정적 수자원 확보를 위한 대처 방안의 마련이 필요한 것으로 평가된다.

핵심용어 : GRACE, 중력장, 수자원변화량, 공간평활화

* 교신저자, 동국대학교-서울 공과대학 건설환경공학과 정교수

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea (e-mail: islee@dongguk.edu)

** 동국대학교-서울 공과대학 건설환경공학과 석사

MS, Dept. of Civil and Environmental Eng., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

*** 동국대학교-서울 공과대학 건설환경공학과 박사과정

Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Dongguk Univ., Seoul 100-715, Korea

1. 서론

우리나라는 대부분의 수문자료를 지상관측을 통해 얻고 있다. 지상관측만으로 양질의 기초 수문자료(강수량, 침투량, 증발산량)를 획득하기에는 어려움이 따른다. 이에 따라, 접근이 어려운 지역이나 장기적인 관측이 필요한 경우에 존재하는 시·공간적 한계를 극복할 수 있는 새로운 관측 방법이 요구되었다. 2002년, 미 항공우주국(NASA)은 시·공간적 한계를 극복하기 위해, 전 지구적인 관측이 가능한 GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment) 인공위성을 발사하였다. GRACE는 두 개의 위성이 쌍을 이뤄 대기권에서 지구를 돌며, 중력장을 측정하는 위성이다. 지구상의 물의 무게의 변화로 인해 중력장이 변한다, 는 가정으로 GRACE가 측정할 중력의 변화를 이용해 수자원변화량(TWSC; Terrestrial Water Storage Change)의 증·감을 계산하는 원리이다. GRACE 중력 측정 자료를 활용하여 수문학, 고체지구, 빙권, 기후변화 및 해양학 등의 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

텍사스대학교 우주연구센터(UTCSR; University of Texas Center for Space Research)는 GRACE가 제공하는 구면조화계수 형태의 중력장 시계열변화량이 수자원 저수량(TWS; Terrestrial Water Storage)의 변화를 나타내는 것을 증명했다(Tapley et al., 2004). 이 결과를 바탕으로, GRACE Level-2 자료를 활용한 연구가 수자원 분야에서도 활발히 진행되고 있다. 양자강 유역의 TWSC 분석(황학 외, 2009), GRACE 중력자료와 GLDAS 자료를 물수지방정식에 대입한 미시시피 강 유역의 TWS 산정(Rodell et al., 2007), 일리노이주의 지하수 저장량 산정(Yeh et al., 2006) 및 증발산량 산정(Rodell et al., 2004) 등의 연구가 대표적이다. TWS의 지역 편차가 큰 한반도의 경우, 정확한 산정을 위해 정밀한 지구중력장 자료 개발이 필요하다.

본 연구는 UTCSR이 제공하는 중력장 자료를 활용하여, 각 공간평활화 반경(0 km, 300 km, 500 km) 별 한반도의 TWSC를 산정했다. GRACE-based TWSC의 검증을 위해, land-based TWSC와의 비교분석을 수행했다. Land-based TWSC는 국가 수자원관리 정보시스템(WAMIS; WAter Management Information System)에서 제공하는 자료(강우, 증발산량)와 전 지구 지표동계화시스템(GLDAS; Global Land Data Assimilation System)에서 제공하는 유출량 자료를 이용하여 산정했다. GRACE-based TWSC와 land-based TWSC의 평균 제공근 오차(RMSE; Root Mean Square Error) 해석을 실시했다. 오차해석의 결과

를 이용하여 한반도에 적합한 공간평활화 반경을 제시하고, 관측 기간에 대한 경·위도별 평균 TWSC를 산정했다.

2. 배경

2.1 GRACE 인공위성

GRACE는 전 지구 중력장과 시간에 따른 중력장 변화의 탐사를 목적으로 미국 NASA와 독일 항공우주센터(DLR; Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt)가 공동으로 제작한 쌍둥이 위성이다. 중력장을 측정하는 방법은, 위성의 가속도를 이용하는 방법과 두 위성의 거리 변화율을 이용하는 방법이 있다. 가속도를 이용한 중력장 측정 방법은, 각 위성에 탑재된 가속도계(SGG; Space borne Gravity Gradiometer)가 각자의 가속도를 측정할 후, 두 지점의 가속도차를 계산하여 해당 좌표의 중력을 계산하는 방법이다. 반면, 거리 변화율을 이용한 중력장 측정은, 두 위성이 위치한 지점의 중력이 다를 경우 진행되는 각 위성의 속도가 달라지며, 이에 따라 발생하는 위성간 거리차를 이용하여 해당 위도의 중력을 계산하는 방법이다(SST; Satellite to Satellite Tracking). 이 방법은 위성의 위치에 따라 두 가지로 구분된다(Low-Low SST, Low-High SST). Low-High SST 방법은 동일 좌표에서 저궤도 위성과 고궤도 위성이 쌍을 이루는 것이며, Low-Low SST 방법은 고도와 위도는 같으면서, 다른 경도 상에서 두 위성이 쌍을 이루는 방법이다. GRACE 위성은, 동일 궤도 평면에 위치한 두 개 위성간의 속도 변화는 두 지점간의 중력장 차이에 비례한다(GRACE Analysis Team, 2000)는 기본이론에 근거한 Low-Low SST 방법이 적용되었다.

GRACE 쌍둥이 위성은 약 500 km 상공에서 220 km 정도 거리를 두고 운행한다. 이 위성으로부터 받은 궤도정보를 활용하여 지구 중력의 장과장 성분을 측정하고, 진행되는 두 위성간의 시간에 따른 거리변화율을 관측하여 중력을 계산한다(Fig. 1). 이 때, 중력장에 의한 위치에너지와 운동에너지는 에너지보존법칙을 따른다고 가정한다. 속도 변화를 측정하여 중력장의 변화를 기록한 자료는 GRACE 이전의 위성이 과거 수십 년간 관측한 중력자료보다 양·질적으로 훨씬 우수한 것으로 평가된다(Bettadpur, 2007a).

2.2 대상 지역

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 한반도에 해당하는 자료의 공간 분포를 나타낸 것이며, 각 셀의 크기는 경도(1°)

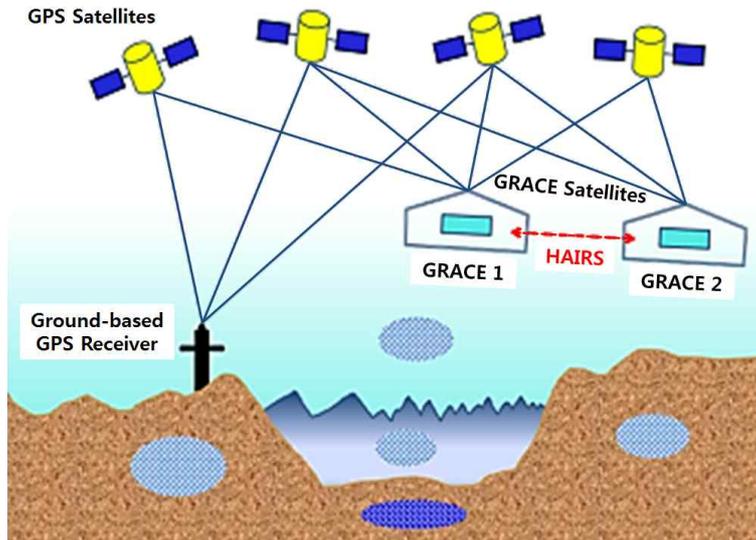


Fig. 1. The Principle of GRACE Satellite Measurements (Modified from Tapley and Reigber, 2003)

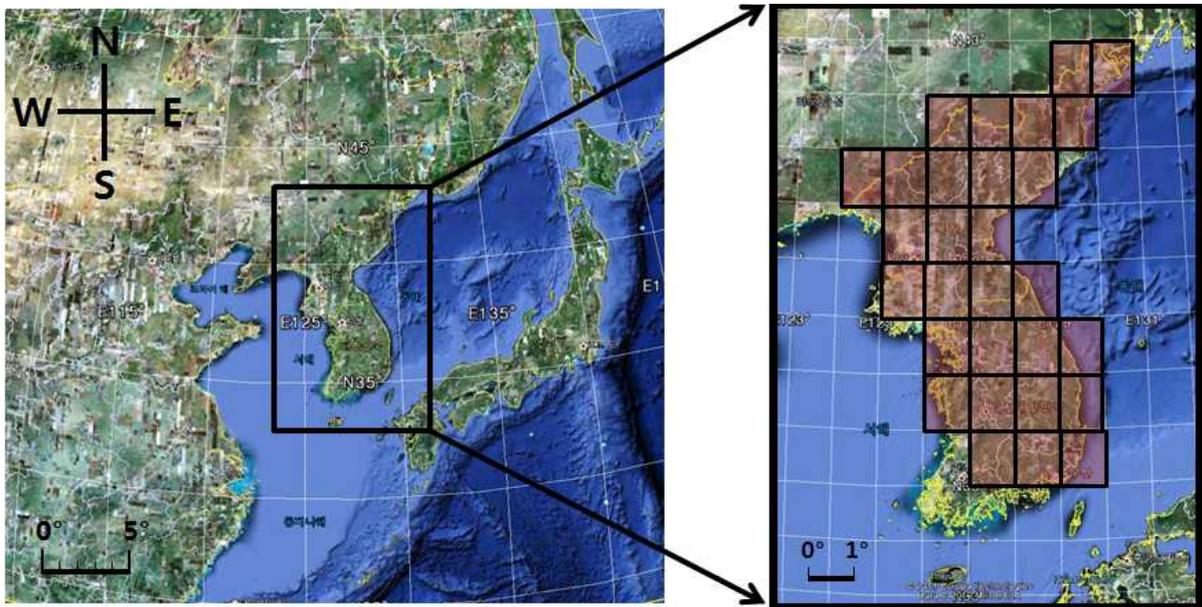


Fig. 2. Data Cells of The Korean Peninsula (GRACE Tellus, 2011)

× 위도(1°)이다(29개). 전 지구 중력장의 변화량 및 TWS 시계열 자료를 2002년 8월부터 결측 시점 없이 사용할 수 있다. 단, 전라남도와 전라북도 일부 지역은 자료가 제공 되지 않고 있다.

2.3 분석 방법

Fig. 3은 본 연구에서 TWSC를 산정하는 전체 흐름을 나타낸 것이다. GRACE 위성의 전 지구 중력자료에서 한반도에 해당하는 부분의 시계열 자료를 추출하고, 그를 토대로 GRACE-based TWSC를 계산한다. 위성을 통

해 산정한 결과의 신뢰도를 검증하기 위해 기존의 수문 분석에서 사용되던 기상 관측자료를 이용한 land-based TWSC를 계산하여, 두 시계열에 대한 RMSE 오차 검정을 수행한다.

3. GRACE-BASED TWSC

3.1 GRACE 중력자료

NASA는 GRACE로부터 획득한 자료를 중력장, TWS 및 TWSC 등 여러 형태로 제공하고 있다(GRACE Tellus,

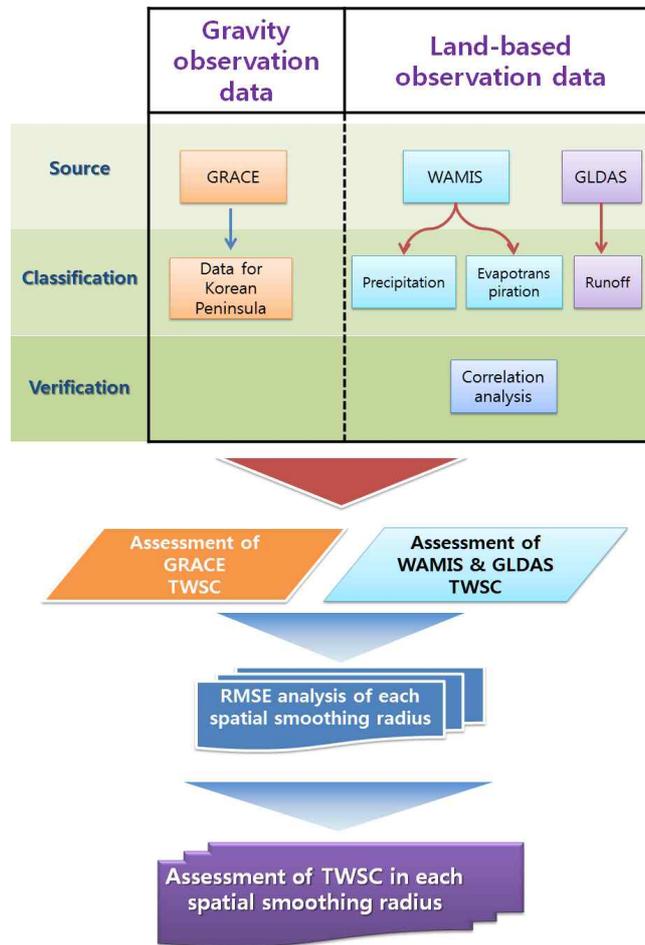


Fig. 3. Flow Chart for TWSC Assessment

2010). GRACE 월별 중력장 자료는 UTCSR, 제트추진연구소(JPL; Jet Propulsion Laboratory) 및 독일 포츠담 지구과학연구소(GFZ; GeoForschungsZentrum)에서 처리한 자료이며, 자료처리 과정에 따라 4가지(Level-0, Level-1A, Level-1B, Level-2) 단계로 구분된다(Fig. 4). 본 연구에서는 2002년 8월에서 2010년 6월까지 총 95개월의 자료를 사용했다.

Level-0 자료는 DLR 산하기관인 GRACE 원시자료센터(RDC; GRACE Raw Data Center)에서 위성 원시자료를 처리한다. Level-1 자료는 공간해상도가 높은 반면 중력장 복원에 복잡한 처리과정이 필요한 것으로, JPL과 GFZ에서 주관한다. Level-1A 자료는 Level-0 자료에 대한 비파괴성(non-destructive)을 반영하고, 이진법 형태의 자료를 공학단위로 환산한 것이다. Level-1B 자료는 위성에 시간 태그를 부여한 형태이다. 마지막으로, Level-2 자료는 UTCSR에서 자료를 생성한 후, GFZ와 JPL이 개별적으로 검증한 자료이다. 또한, 월별 중력장 모

델이 각각 다양한 차수(UTCSR: 60차, GFZ: 120차, JPL: 120차)로 제공되는데, 이는 해양조석, 고체지구조석 및 지구 자전으로 인한 극조석 등 조석의 영향과 대기와 해양의 변동성으로 인한 비조석 영향을 보정한 자료들이다(Bettadpur, 2007b). 본 연구에서는 UTCSR에서 제공하는 Level-2 자료(구면조화함수의 계수: 60차)를 사용했다.

3.2 TWSC 산정

지표상 중력 변화의 원인은 지표수자원(지하수, 토양수분, 지표수)량의 변화로 인한 것이라는 가정(Rodell et al., 2007)에 따라, 육지의 Level-2 월별 중력장 자료를 TWS로 볼 수 있다(Fig. 5). 따라서 Level-2 월별 중력장 자료를 cm 단위의 등가수분두께(LWET; Liquid Water Equivalent Thickness)로 환산할 수 있다. Fig. 6은 2005년 8월의 중력자료를 TWSC로 환산한 것이다(GRACE Tellus, 2010).

TWS를 Eq. (1)에 대입하여 공간평활화 반경 별 TWSC를 산정할 수 있다(Fig. 7).

$$\left[\frac{\Delta S}{\Delta t} \right]_N = \left[\frac{\bar{S}_{i,N} - \bar{S}_{i,N-1}}{\Delta t} \right] \quad (1)$$

여기서, ΔS 는 수자원 변화량, \bar{S} 는 평균 수자원저수량, t 는 시간, N 은 월, i 는 GRACE 위성이 관측한 일수를 말한

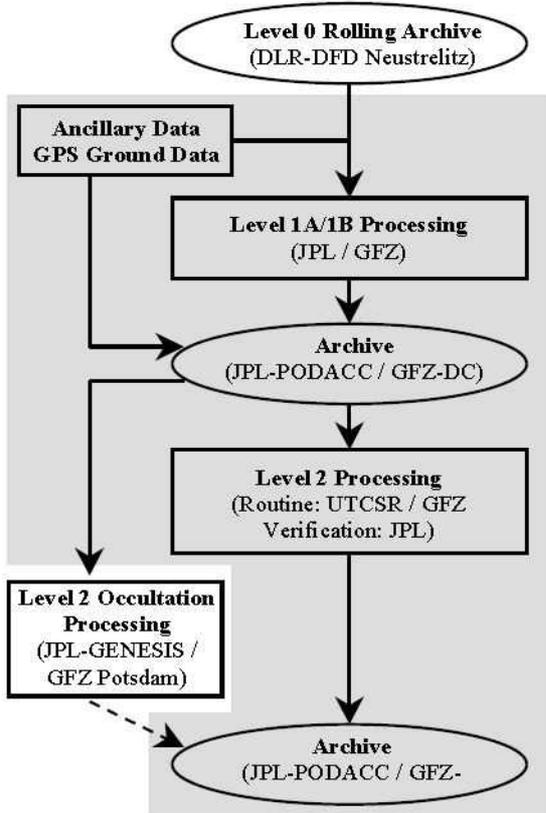


Fig. 4. GRACE Science Data Flow (GRACE Analysis Team, 2000)

다(Rodell and Famiglietti, 2001). 이 때, 각 월별 관측 일수가 적게는 20일에서 최대 31일까지 다양하기 때문에 월별 평균 수자원저수량을 사용했다.

4. 검증

본 장에서는 3장에서 계산한 GRACE-based TWSC의 효용성 검증을 수행하였다. 비교 검증 대상인 land-based TWSC의 산정 방법 및 RMSE 검정 방법을 기술하였다.

4.1 물수지법

GRACE-based TWSC의 효용성을 검증하기 위해서는, 기존에 통용되던 방법으로 산정된 결과와의 비교가 필요하다. 본 절에서는 기상관측 수문자료를 활용한 land-based TWSC를 구하고 GRACE-based TWSC와의 비교 검증을 통해서 연구 결과의 실용성을 확보하고자 한다.

지상 관측자료를 활용한 수문분석의 가장 전형적인 방법은 물수지법이다. 물수지법은 지구상의 물순환 시스템에서 총량은 변하지 않는다는 기본 가정부터 출발한다. 신뢰도 높은 경우, 유출 및 증발산량 관측자료를 획득할 수 있다면, 물수지법(Eq. (2))을 통해 TWS를 구하는 것은 매우 쉬운 일이다.

$$\left[\frac{\Delta S}{\Delta t} \right]_N = \sum_{N-1}^N P - \sum_{N-1}^N E - \sum_{N-1}^N R \quad (2)$$

여기서, P 는 강우·강설량, E 는 증발산량, R 은 지표·지표하 유출을 의미하며, 이 요소들의 변화량인 ΔS 는 TWSC에 대응한다(Syed et al., 2008).

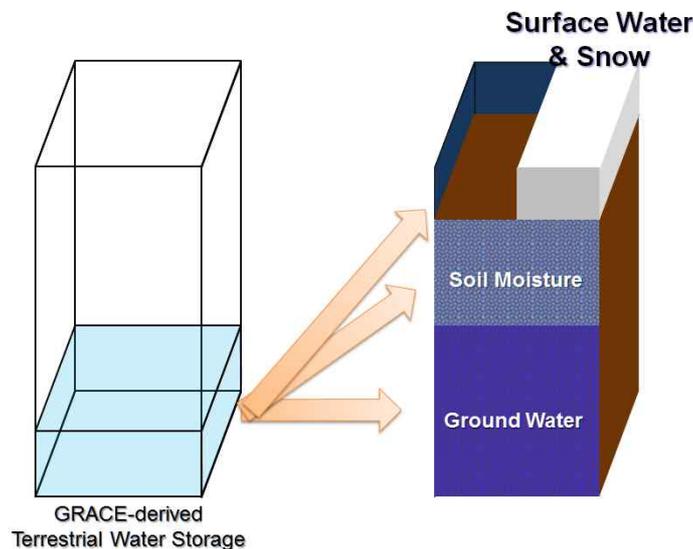


Fig. 5. Concept of TWS in GRACE Gravity Data

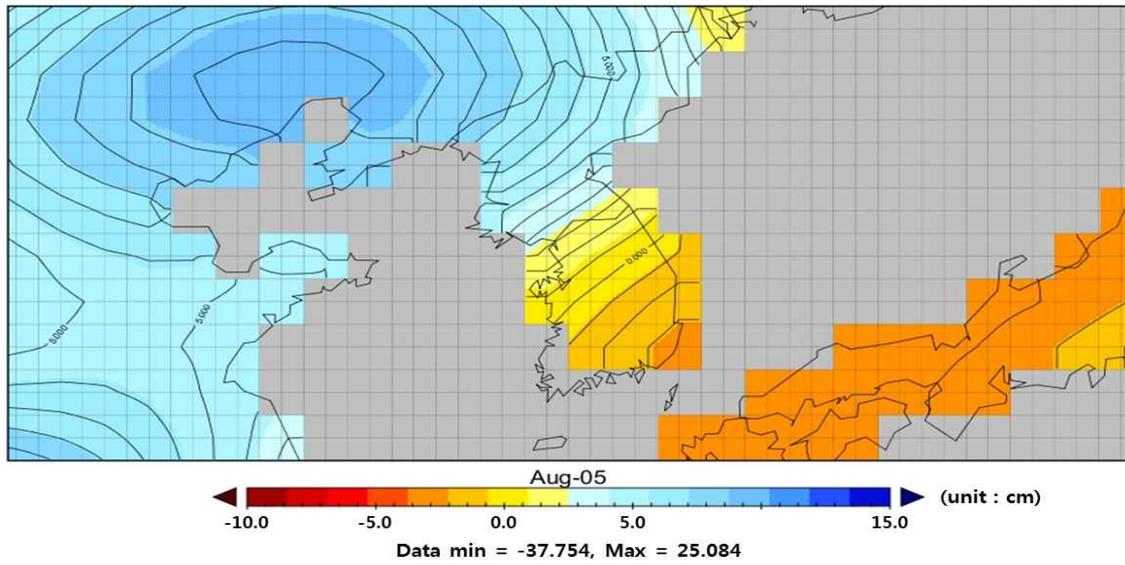


Fig. 6. Example of Conversion of GRACE Level-2 Monthly TWSC in Aug 2005

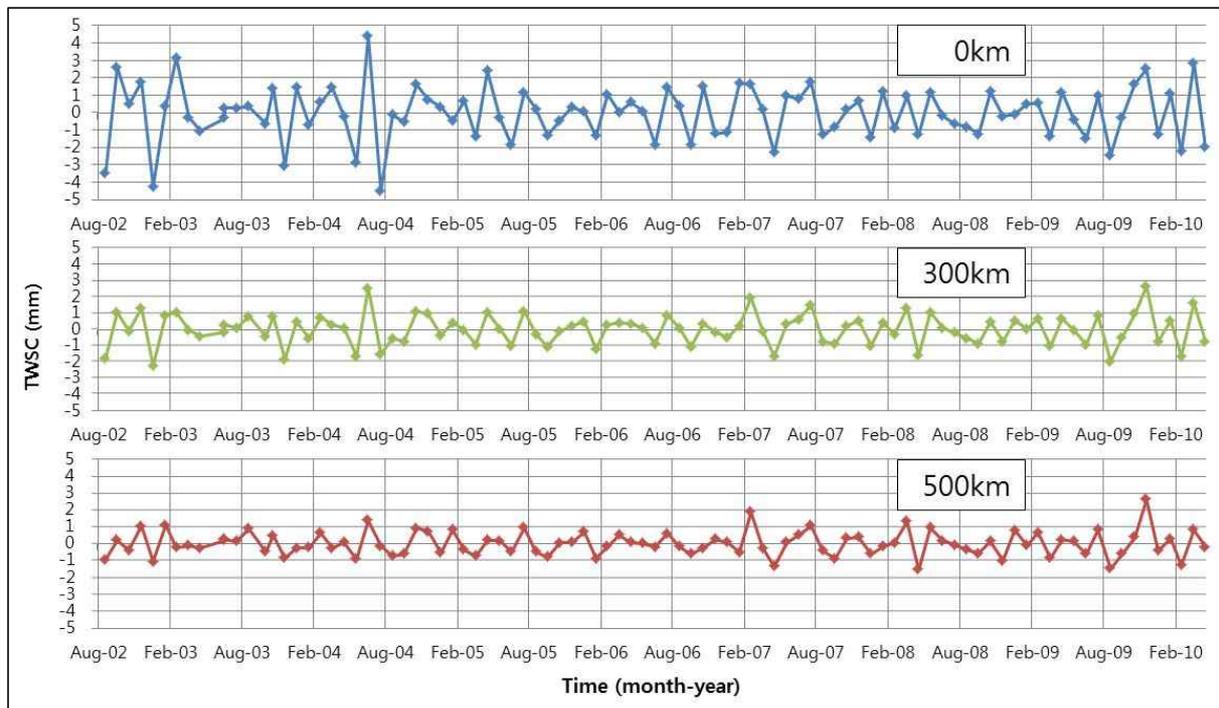


Fig. 7. GRACE-Based TWSC for Each Spatial Smoothing Radii (GRACE Tellus, 2010)

4.2 LAND-BASED TWSC

국내의 지상관측 수문자료를 2000년 1월부터 제공하고 있는 WAMIS에서 강우량과 증발산량을, GLDAS에서 강우량과 유출량을 수집했다(Table 1). WAMIS에서는 강우량, 증발산량, 유출량 등의 수문자료를 관측소 별 시계열 자료로 제공하고 있다(WAMIS, 2010). GLDAS 자료

는 기상관측위성의 관측값(유출량, 강우량 등)을 GRACE 위성과 같은 형태($1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 셀)로 NASA가 인터넷을 통해 제공한다(NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center, 2010). 본 연구에서는 두 기관이 제공하는 원시자료의 공간평균값을 사용했다.

WAMIS에서 유출량을 획득하기 어렵기 때문에, 두 기관에서 제공하는 강우량의 상관분석을 통해 GLDAS에서

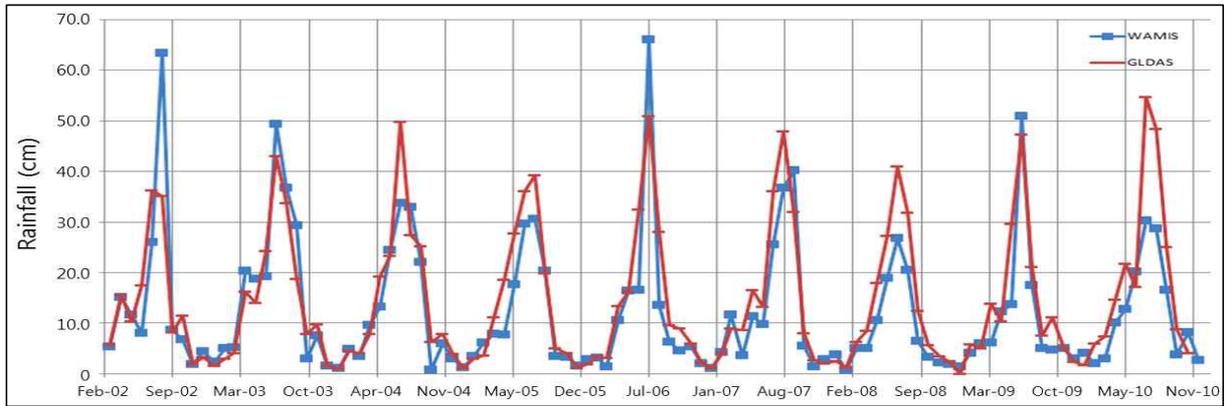


Fig. 8. Time Series of Rainfall Attained from WAMIS and GLDAS

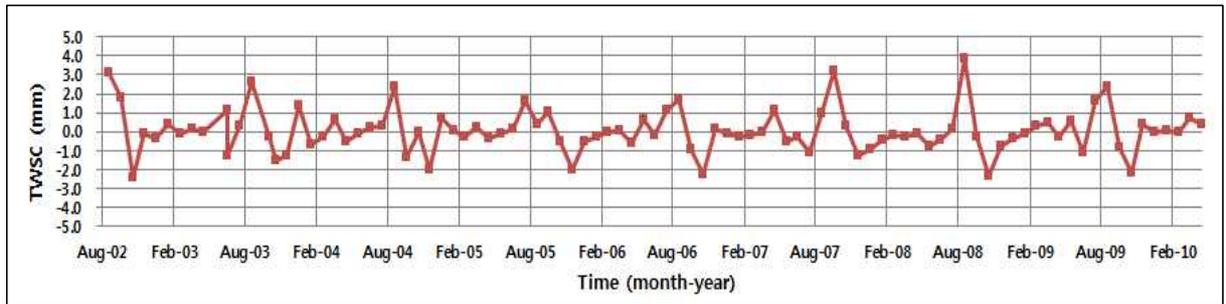


Fig. 9 Land-Based TWSC (Runoff from GLDAS, Precipitation and Evapotranspiration from WAMIS)

Table 1. Land-Based Observation Parameters Used in This Study

Parameters	Spatial Resolution	Time Span	Spatial Extent	Source
Precipitation (P) (solid & liquid rainfall)	Local	Aug 2002 ~ June 2010	123.5°E ~ 132.5°E 32.5°N ~ 43.5°N	WAMIS
Evapotranspiration (E)	Local			GLDAS
Runoff (R) (surface & subsurface flow)	1°×1°			

제공하는 유출량을 사용할 수 있는지 알아보았다. Fig. 8은 2002년 1월부터 2010년 12월까지 WAMIS와 GLDAS의 강우량 시계열 자료를 나타낸 것이다. 두 시계열의 상관관계수는 0.9124로, 높은 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 WAMIS에서 강우량과 증발산량을 사용하고, GLDAS에서 유출량을 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Table 1의 변수들을 Eq. (2)에 대입하여 얻은 land-based TWSC를 나타낸 것이다.

4.3 RMSE 검정

2장에서 언급한 바와 같이, GRACE-based TWSC에 대한 검증이 요구되기 때문에, 본 연구에서는 RMSE 검정을 수행했다. RMSE 검정은 시계열 분석에서 최적 예측

결과를 선택할 때 사용되는 방법 중 하나이다. 예측값이 해당 기간의 실측값에 얼마나 가까운지를 계산하여 추정된 모수를 검증하는 방법이므로, 본 연구에 도입하기 가장 적절할 것이다. Eq. (3)은 RMSE를 구하는 식이다. 이 때, e_i 는 i 번째 시점에서 GRACE-based TWSC에서 land-based TWSC를 뺀 값이다.

$$SE = \sqrt{(e_1 + e_2 + \dots + e_N)^2 / (N-1)} \quad (3)$$

Table 2는 한반도의 land-based TWSC와 GRACE-based TWSC의 공간평활화 반경 별 RMSE 통계량과 상관관계수를 정리한 것이다. RMSE 검정 결과 및 상관관계수를 토대로, 반경 500 km의 GRACE-based TWSC가 가장 적합한 것으로 나타났다.

Table 2. Correlation and Statistics of RMSE Test for Each Spatial Smoothing Radius [mm]

Spatial Smoothing Radius	Min.	Max.	Range	Mean	RMSE	Correlation
000 km	-5.708	4.440	10.148	1.842	1.744	0.228
300 km	-2.941	2.746	5.687	-1.204	1.102	0.289
500 km	-1.581	2.734	4.315	-1.349	0.853	0.294

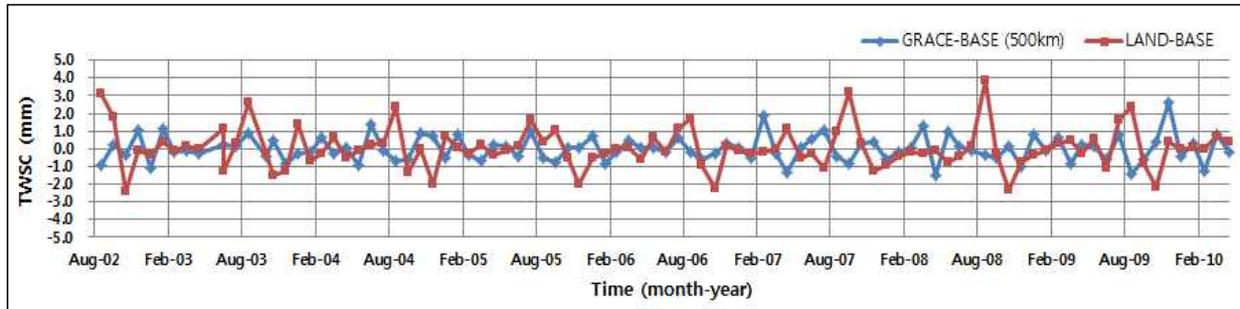


Fig. 10. Land-Based TWSC and GRACE-Based TWSC (spatial smoothing radius 500 km)

Table 3. Mean TWSC of Spatial Smoothing Radius 500 km

Lat. \ Long.	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	-

(cm/month)

Fig. 10은 공간평활화 반경 500 km의 GRACE-based TWSC와 land-based TWSC를 나타낸 것이다. Land-based TWSC의 여름철 수자원 변화량의 폭이 GRACE-based TWSC와 비교했을 때, 다소 높은 값을 보이지만, 전체 관측 기간의 월별 패턴은 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 2008년 9월에 2.734 mm로 오차가 가장 크며, 전체 기간 중 여름철(7~9월)의 오차가 RMSE를 높인 것으로 여겨지며, 상관계수를 떨어뜨리는 것으로 판단된다. 이러한 오차는 지상관측 보다 GRACE 위성 자료로부터 기인한 것으로 보는 것이 적당할 것이다. 한반도의 경우 지형적 특성상 GRACE가 제공하는 셀 자료 중 일부가 불가

피하게 해양을 포함하고 있기 때문에, 해당 셀에서 육지 부분만 추출할 수 있다면 GRACE-based TWSC의 신뢰도를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

5. 한반도의 평균 TWSC

구면조화함수 최대 60차까지 해석된 CSR Level-2 위성 중력자료의 공간평활화 반경 500 km에 대한 경위도별 평균 TWSC를 산정하였으며, 한반도 전 지역의 평균 TWSC는 9.86 cm/month으로 산정되었다(Table 3, Fig. 11). 동쪽이 서쪽보다 TWSC가 크게 나타나고 있으며, 이

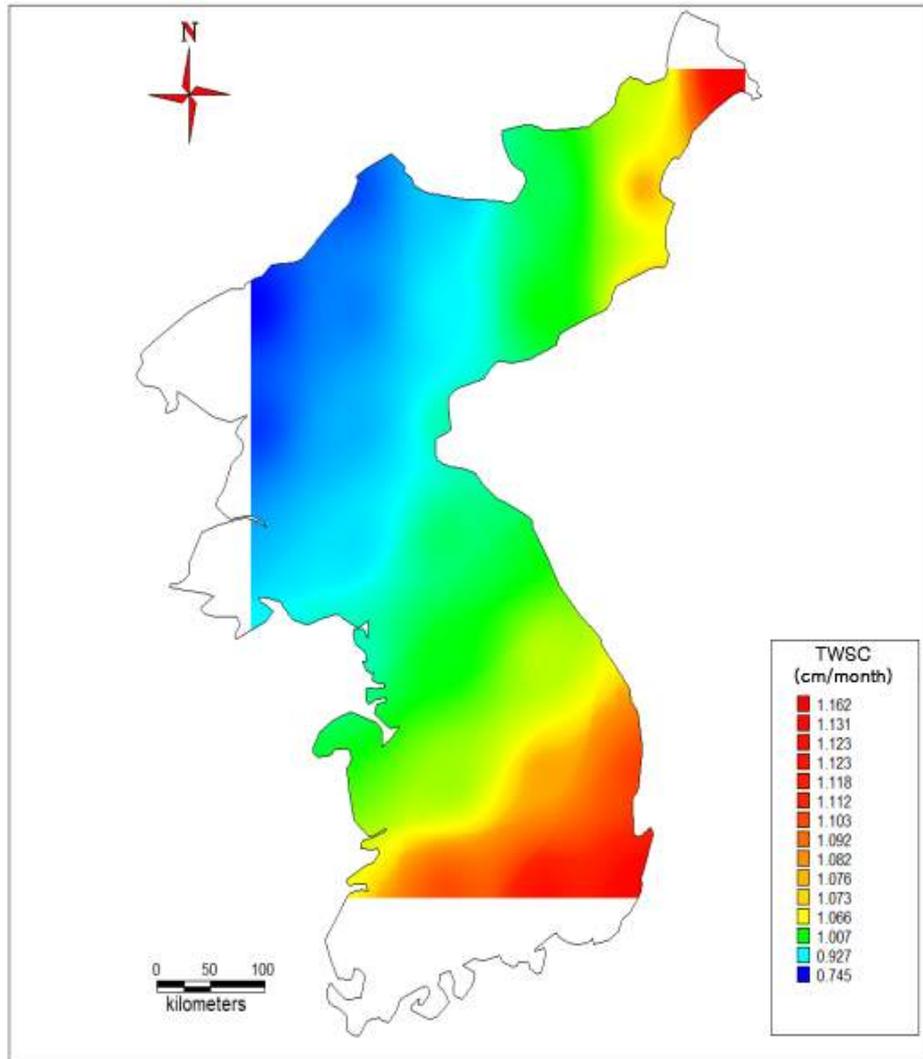


Fig. 11. Mean TWSC for Spatial Smoothing Radius 500 km

는 한반도의 지형적 특성을 반영했을 때 당연한 결과로 여겨진다.

6. 결론

갈수록 심화되는 이상기후 현상 때문에 안정적인 수자원 확보에 대한 근본적이고 체계적인 연구의 필요성이 제기되고 있다. 총 수자원 저수량을 파악하고 변동 특성을 분석하는 연구를 기초로 하여, 수자원 확보 방안 및 물 기근 대처 방안을 제시할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 수문분석에 전통적으로 사용됐던 지상관측자료 대신 GRACE 위성 자료의 적용 가능성을 검토하고, 연간 지표수자원 저수량의 변동 패턴을 분석했다. 산정된 GRACE-based TWSC의 신뢰도를 검증하기 위해 지상 관측자료를 사용한 land-based TWSC와 비교분석이 요구되었다. 하

지만, 실측 자료는 지속적이며 정확한 자료 획득에 상당한 어려움이 존재하며, 원시자료를 분석에 필요한 형태로 변환하는데 많은 제약이 따른다. 물수지법에 대입할 변수들은 자료 획득의 편이성 및 효용성을 고려해서, WAMIS에서 강수량 및 증발산량, 그리고 GLDAS에서 유출량을 채택했다. 이때, 두 기관의 자료를 하나의 식에서 사용할 수 있는지 여부를 판단하기 위해, WAMIS와 GLDAS가 각각 제공하는 강수량의 상관분석을 실시했다. 그 결과, 0.912의 높은 상관계수를 가지며, Fig. 8에서 높은 상관성을 확인할 수 있다. 이 자료들로 산정한 land-based TWSC와 공간평활화 반경 500 km에서의 GRACE-based TWSC의 RMSE 분석 결과, 공간평활화 반경 500 km에서의 GRACE-based TWSC (0.986 cm/month)와 land-based TWSC의 RMSE가 0.853으로 가장 근접한 것으로 나타났다. 전체 분석 기간 중 7~9월에 해당하는 여름철에서 발견되는 오차를 제외하

면 GRACE 위성자료의 적용성이 상당히 높은 것으로 평가할 수 있다.

본 연구 결과의 여름철 TWSC 오차 원인으로 첫째, 변화가 심한 해안선으로 인한 실제 지표 수자원량 추출의 어려움, 둘째, 한반도 면적을 고려했을 때, 비교적 넓은 위성자료 단위 셀, 셋째, 단일 기관에서 획득하지 못한 지상 관측자료, 등을 고려할 수 있다. 향후 연구에서 이와 같은 부분을 개선한다면, 안정적 수자원 확보 계획에 기초 자료를 마련하는데 있어서 상당한 편리함을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, GRACE 중력자료의 활용으로 수문지질도, 지하수 정보 DB, 지하수와 하천수의 수위, 가뭄 지도, 농업, 산림, 해저자원 등 여러 분야에 걸쳐 경제적, 시간적, 공간적인 파급효과를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국 연구재단의 일반 연구자 지원 사업(과제번호: 2011-0026581)에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

국가 수자원관리 정보시스템 (2010). <http://www.wamis.go.kr/>

황학, 윤홍식, 이동하, 정태준 (2009). "GRACE 월별 중력장 모델을 이용한 양자강유역 및 삼협댐 지역 저수량 변화 분석." **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제27권, 제3호, pp. 375-384.

Bettadpur, S.V. (2007a). *Level-2 Gravity Field Product User Handbook*. The University of Texas at Austin, pp. 5-18.

Bettadpur, S.V. (2007b). *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.

GRACE Analysis Team (2000). Science Data System Development Plan. GRACE Project Document 327-710.

GRACE Tellus (2010. 6.). <http://www.grace.jpl.nasa.gov/>

GRACE Tellus (2011. 12.). <http://www.grace.jpl.nasa.gov/>

<http://www.grace.jpl.nasa.gov/>

NASA GES DISC (2010. 6.) <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/>

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 Resources Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 1327-1340, doi:10.1029/2000WR 900306.

Rodell, M., Chen, J.L., and Hiroko, K. (2007). "Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE." *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 159-166, doi:10.1007/s10040-006-0103-7.

Rodell, M., Famiglietti, J.S., Chen, J.L., Seneviratne, S., Viterbo, P., and Holl, S. (2004). "Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations." *Geophysical Research Letter*, Vol. 31, No. 20, pp. L20504, doi:10.1029/2004GL020873.

Syed, T.H., Famiglietti, J.S., Rodell, M., Chen, J.L., and Wilson, C.R. (2008). "Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 2, pp. W02433, doi:10.1029/2006WR005779.

Tapley, B.D., Bettadpur, S.V., Ries, J.C., Thompson, P.F., and Watkins, M.M. (2004). "GRACE measurements of mass variability in the Earth system." *Science*, Vol. 305, No. 5, pp. 503-505.

Tapley, B.D., and Reigber, C. (2003). GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment An Earth System Science Pathfinder (ESSP) Mission. GRACE HPC Poster. CSR/SGC.

Yeh, P.J.-F., Swenson, S.C., Famiglietti, J.S., and Rodell, M. (2006). "Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)." *Water Resources Research*, Vol. 42, pp. W12203, doi:10.1029/2006WR 00537.

논문번호: 12-003	접수: 2012.01.11
수정일자: 2012.02.28/05.24	심사완료: 2012.05.24