

# GRACE 및 SLR 자료를 이용한 $C_{20}$ 의 시계열 변화 연구

## Research for Time Variation of $C_{20}$ Using GRACE and SLR Measurements

황학<sup>1)</sup> · 윤홍식<sup>2)</sup> · 이동하<sup>3)</sup>

Huang, He · Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha

### Abstract

The research of global-scale mass redistribution and it changed by Earth gravity filed variation observations, including Earth's oblateness  $J_2$ (also called low degree spherical harmonic coefficient  $C_{20}$ ), is in continuous progress. Recently, the comparative analysis of geodetic observation SLR can be made by the development of GRACE and other time-variable gravity measurements. In this study,  $C_{20}$  time series changes in the value of comparative analysis was got by GRACE monthly Gravity filed model (CSR RL04) for the period April 2002 to May 2008. And comparative analysis the harmonic coefficients of  $C_{20}$  was obtained from SLR observations. Signal analysis for two time-series data was made by wavelet transform, CWT(continuous wavelet transform), XWT(cross wavelet transform) and WTC(wavelet coherence) methods. The results indicate that GRACE and SLR values for  $C_{20}$  had both decreasing trend, as well as SLR data represent the annual frequencies, and GRACE was semiannual variations. In addition, the results of GRACE and SLR had a strong correlation with the XWT and WTC in an annual cycle.

Keywords : GRACE, SLR,  $C_{20}$ , Mass redistribution, wavelet analysis

### 초 록

지구 중력장의 경년변화 관측을 통한 전 지구 차원에서의 대규모 질량이동 및 그 변화에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있다. 여기에는 지구의 편평 정도를 나타내는  $J_2$ (또는 지구 중력장모델의  $C_{20}$ )에 대한 연구도 포함되며, 최근에는 GRACE를 비롯한 위성중력기술의 개발로 기존의 SLR 등 우주관측기술의 관측결과와 비교분석을 수행할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 2002년 4월부터 2008년 5월사이의 GRACE 월별 중력장모델(CSR RL04)을 이용하여 저차항 중력장 구면조화 계수  $C_{20}$ 의 시계열 변화를 구하고 SLR 관측 자료로부터 얻어진  $C_{20}$  값과 비교분석을 수행하였다. 시계열 데이터의 분석에는 웨이블릿 변환 신호분석기법을 사용하였으며, 구체적으로 연속 웨이블릿 변환, 직교 웨이블릿 변환 및 웨이블릿 상관관계 분석을 수행하였다. 분석 결과, GRACE와 SLR의  $C_{20}$  결과는 모두 감소하는 추세를 나타내었으며, 1년 주기를 나타내는 SLR과는 달리 GRACE는 반년 주기에서 더욱 높은 강도를 보였다. 또한, GRACE는 SLR와의 직교 웨이블릿 스펙트럼 및 상관관계 분석에서도 1년 주기에서 매우 강한 상관관계를 보여주었다.

핵심어 : GRACE, 위성레이저거리측정,  $C_{20}$ , 질량 재분배, 웨이블릿 분석

## 1. 서 론

지구는 기권, 수권 및 암권이 상호 작용하는 복잡한 동

력학적 시스템을 이루고 있으며, 이러한 지구 동력학적 운동은 지구시스템의 질량을 변화시키고, 시공간적으로 분포되어 있는 지구 중력장에 변화를 가져다주게 된다.

- 1) 정희원 · 성균관대학교 건설환경연구소 연구원, 공학석사(E-mail: duejihh@gmail.com)
- 2) 연결저자 · 정희원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수, 공학박사(E-mail: yoonhs@skku.edu)
- 3) 정희원 · 성균관대학교 건설환경연구소 연구원, 공학박사(E-mail: dhlee@geo.skku.ac.kr)

따라서 지구 중력장에 대한 경년변화를 연구함으로써 전 지구 차원에서의 대규모 질량이동 및 그 변화를 관측할 수 있다. 그중에서도 지구의 편평 정도를 나타내는  $J_2$ (또는 지구 중력장모델의  $C_{20}$ )에 대한 연구가 가장 대표적이다.

SLR(Satellite Laser Ranging) 위성의 발사 및 관측 자료의 연구를 토대로 1979년부터 지구의 편평률이 지속적으로 감소되고 있다는 연구결과가 발표되기 시작하였고,  $J_2$ 에 발생하는 장기적이고 지속적인 변화는 주로 후빙기 반동(Post-Glacial Rebound, PGR)에 의한 것으로 제기되었으며, 1998년 이전까지의 대부분 연구 결과 중  $J_2$ 의 변화범위는  $-2.5 \sim -3.0 \times 10^{-11}/\text{year}$  사이에 분포되었다(Yoder 등, 1983; Cheng 등, 1997; Bianco 등, 1998). 하지만 최근에는 보다 다양한 SLR 관측 자료의 종합적인 처리결과를 통해 1998년부터  $J_2$ 가 급속히 증가하고 있고, 그 변화가 PGR의 영향을 무시할 정도로 큰 것으로 밝혀졌다. 이러한 현상의 직접적인 원인이 되는 지구의 질량 재분배는 구체적으로 극지방(그린란드와 남극 대륙) 빙상과 아극(亞極) 및 고산지대의 빙하 용해, 해양과 외핵의 유동으로 추측되고 있으며(Cox와 Chao, 2002), Dickey 등 (2002)은 해양에서의 질량 재분배가 적도방향으로 기울어지는 것이 주된 원인이라고 제기하였다. 비록  $J_2$ 의 변화량이  $10^{-11}$ 의 크기에 불과하는 수치적으로는 매우 작은 량이지만 이는 회전하는 지구에 있어서 가장 기본적인 요소로서 이러한 변화의 존재를 파악하고 그 원인을 규명하는 것은 지구의 구조 및 동력학적 변화를 이해할 수 있는 가장 기초적인 접근방식이다(Chao, 2006).

최근에는 CHAMP, GRACE 등과 같은 위성중력 관측기술이 비약적으로 발전하여 SLR 등 정밀 궤도추적 및 위치결정을 기본 방식으로 하는 기존의 우주관측 기술에 비해 더욱 높은 정밀도와 해상도로 지구 중력장을 결정함으로써 지구물리학, 지구동력학 및 측지학분야에 중요한 정보를 제공하고 있다. 특히 GRACE는 K밴드 마이크로파를 이용해  $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이상의 속도 측정 정밀도를 확보함으로써 1개월의 시간해상도로 mm단위의 지표수 변화와 1mbar 정도의 해저압력 변화를 검출하고 있다. 따라서 SLR 등 측지위성을 제외하고도 GRACE와 같은 중력위성의 관측 자료를 이용한  $C_{20}$ 의 변화 연구가 가능하게 되었다.

본 연구에서는 GRACE 지구 중력장 관측 자료의 저차항 변화 및 활용 가능성 여부를 분석하기 위하여 총 72개월의 GRACE 월별 중력장모델을 이용하여 저차항 중력장 구면조화 계수  $C_{20}$ 의 시계열 변화를 분석하였으며, 지

구동력학에서 중요한 계수로 이용되는  $C_{20}$ 의 변화에 대해서는 SLR 관측 자료를 기준으로 웨이블릿 변환방법을 이용하여 비교분석을 수행하였다.

## 2. $C_{20}$ 의 물리적 의미

지구 중력장에 대한 수학적 표현으로 흔히 구면조화 계수로 구성되는 중력장모델을 이용하고 있으며, 지구 상 임의의 점( $\theta$ ,  $\lambda$ )에서의 중력퍼텐셜  $V$ 는 식 1과 같이 표현된다(Torge, 1991).

$$V = -\frac{GM}{r} \left( 1 + \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left( \frac{a}{r} \right)^l (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos\theta) \right) \quad (1)$$

여기서,  $GM$ 은 지심인력상수,  $r$ 은 점( $\theta$ ,  $\lambda$ )에서 지심까지의 거리,  $a$ 는 지구의 적도 반경,  $P_{lm}(\cos\theta)$ 는 완전 정규화된 르장드르 함수를 나타낸다. 또한, 구면조화 계수  $C_{lm}$ 과  $S_{lm}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m=0\text{일 경우, } C_{l0} = C_l = \frac{1}{M} \iiint_{\text{earth}} \left( \frac{r'}{a} \right)^l P_l(\cos\theta') dm \quad (2)$$

$$m \neq 0\text{일 경우, } \begin{cases} C_{lm} \\ S_{lm} \end{cases} = \frac{2}{M} \times \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \iiint_{\text{earth}} \left( \frac{r'}{a} \right)^l P_m(\cos\theta') \begin{cases} \cos m\lambda' \\ \sin m\lambda' \end{cases} dm \quad (3)$$

식 2에서 나타내듯이  $m=0$ 일 경우,  $C_{l0}$ 는 경도  $\lambda$ 와 상관없이 Legendre 다항식  $P_l(\cos\theta)$ 에 의해 변화하는 락조화 함수(zonal harmonic)의 형태를 가지게 된다. 따라서 그림 1에 표시한 바와 같이  $C_{20}$ 는 의미 상 지구의 편평도

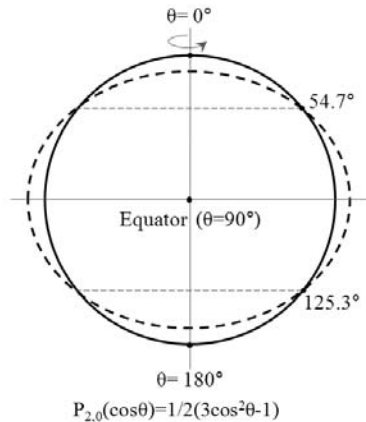


그림 1.  $C_{20}$ 의 수학적 표현

표 1. SLR 위성 제원

Satellite	LAGEOS-1	LAGEOS-2	Starlette	Stella	Ajisai
Sponsor	NASA(USA)	NASA(USA) & ASI(Italy)	CNES(France)	CNES(France)	NASDA(Japan)
Launch Date	04-May-76	22-Oct-92	06-Feb-75	26-Sep-93	12-Aug-86
Size/Reflectors (cm/corner cubes)	60/426	60/426	24/60	24/60	215/1,436
Inclination( °)	109.84	52.64	49.83	98.6	50
Perigee Height(km)	5,850	5,625	815	815	1,485
Apogee Height(km)	5,960	5,960	1,115	815	1,505
Period(min)	225	222	104	101	116

(Earth's oblateness)를 나타내는 값인  $J_2$ 와 동일하며, 식 4와 같은 반비례 관계를 가지고 있다(Lambeck, 1988).

$$C_{20} = -J_2 / \sqrt{5} \quad \text{또는,} \quad J_2 = -\sqrt{5} C_{20} \quad (4)$$

1979년 IUGG/IAG 제17차 총회에서는 GRS80(Geodetic Reference System 1980)을 제정하고 지구 적도반경  $a$ , 지심인력상수  $GM$ , 지구 자전각속도  $\omega$ 와 함께 지구의 역학적 형상요소인  $J_2$ 의 값을  $108,263 \times 10^{-8}$ 로 정의하고 있다.

### 3. GRACE 및 SLR 관측자료 분석

2002년 3월에 발사된 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성은 NASA ESSP(Earth System Science Pathfinder) 프로그램의 일환으로서 설계수명이 5년이며, 450km의 상공을 비행하는 두 개의 위성(위성간 거리 약 220km)으로 구성되어 있다. GRACE는 L-L SST (Low-Low Satellite to Satellite Tracking)방식으로 위성간 거리의 시간적 변화(range rate) 즉 속도를 측정하며, 에너지 보존법칙에 의하여 중력장에 의한 위치에너지와 운동에너지의 합이 일정하므로 속도의 변화를 이용하여 중력장의 변화를 측정하게 된다.

약 30일의 시간해상도로 제공되는 GRACE 위성의 월별 중력장모델은 해양조석, 고체지구, 극 조석(pole tide), 대기와 해양 변동의 연구에 중요한 정보를 제공하고 있다. 또한 지상 mm단위의 수분 변화를 검출할 수 있어 지하수 및 하천유역 내 물 순환(Crowley 등, 2008)이나 산악 빙하, 대륙 빙상(Velicogna 등, 2006) 등 다양한 질량 분포에 대한 연구 및 대지진(Han 등, 2006), PGR, 해수면 변화 등 지구 모니터링에도 큰 도움을 주고 있다.

GRACE의 월별 중력장모델은 현재 미국의 텍사스대학교 공간연구센터(CSR), 제트추진연구소(JPL)와 독일 포

츠담 지구과학연구소(GFZ)에서 계산하여 제공하고 있으며, 본 연구에서는 CSR에서 제공하는 2002년 4월부터 2008년 5월까지(2002년 6, 7월, 2003년 6월 데이터 없음)의 총 70개의 월별 지구 중력장모델(CSR RL04)을 이용하여 GARCE 위성으로 관측되는  $C_{20}$ 의 시계열 데이터를 취득하였으며, CSR RL04 지구 중력장모델은 이미 해양 조석, 고체지구조석 및 지구자전으로 인한 극조 등 조석의 영향과 대기와 해양의 변동성으로 인한 비조석 영향을 보정한 상태이다(Bettadpur, 2007).

GRACE CSR RL04에서 구해지는  $C_{20}$ 에 대한 정밀도 평가를 위하여 LAGEOS-I/II, Starlette, Stella 및 Ajisai 등 원궤도(circular orbit)를 비행하는 5개의 측지위성(표 1 참조)에서 획득한 SLR 관측 자료를 분석하여 얻어진 시계열  $C_{20}$ 을 이용하여 비교분석을 수행하였다. SLR 관측자료의 계산에서는 GRACE RL04버전의 처리과정에서와 동일한 중력장 모델 및 대기/해양 보정이 수행되었다(Cheng 등, 2004).

GRACE 월별 중력장모델과 SLR 자료에서 얻어지는  $C_{20}$  값의 용이한 비교를 위해 기준 값을  $-0.48416948 \times 10^{-3}$ 로 정하고 차이( $\times 10^{-10}$ )를 구하여 분석하였으며, 그림 2는 그 결과를 나타낸 것이다. GRACE 월별 중력장모델에

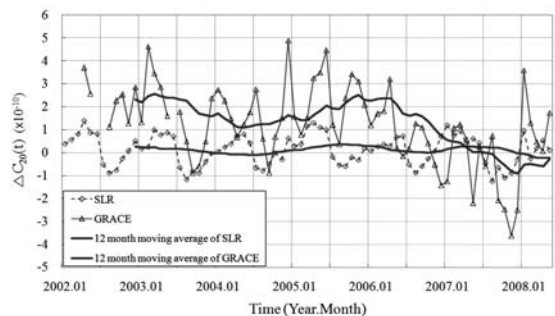


그림 2. GRACE와 SLR 자료를 이용한  $C_{20}$ 의 시계열 변화 그래프

서 구한  $C_{20}$ 의 시계열 데이터는 -3.64~4.89 사이에서 변화하고 1.23의 평균과 1.74의 매우 큰 표준편차를 나타내었다. 반면 SLR 자료의  $C_{20}$ 은 최대 값 1.37, 최소 값 -1.26으로 0.11의 평균을 나타내었으며, 표준편차 역시 0.67로 GRACE의 결과에 비해 2배 이상 우월하여  $C_{20}$ 의 변화가 매우 안정적임을 알 수 있었다. 또한, SLR의 결과는 선명한 1년 주기의 변화양상을 나타내었지만 GRACE의 결과는 1년 주기보다는 반년 주기의 변화가 더 우위를 차지하고 있음을 볼 수 있다.

GRACE와 SLR 두 결과에 대한 12개월 이동평균을 분석한 결과, 모두  $C_{20}$  값이 감소되는 경향을 보였고, 그 변화율은 GRACE가  $-4.6 \times 10^{-11}/\text{year}$ , SLR는  $-0.3 \times 10^{-11}/\text{year}$ 으로 나타났으며, GRACE의  $C_{20}$ 가 시간이 지날수록 SLR 결과에 어느 정도 수렴하고 있음을 관찰할 수 있었다.

#### 4. $C_{20}$ 의 웨이블릿 분석

위에서 결정한 GRACE와 SLR에서 각각 구한  $C_{20}$ 의 시계열 데이터에 대한 심층 분석을 위해 본 연구에서는 웨이블릿 분석 방법을 적용하여 두 시계열 데이터 간의 상관관계를 분석하고자 하였다.

웨이블릿 변환(wavelet transform)은 신호분석에서 흔히 사용되는 푸리에 변환(fourier transform)과는 달리 시간영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환함과 동시에 시간 정보도 보유하는 장점을 가지고 있다. 또한, 넓은 영역을 가지는 신호의 지역적인 특성을 추출하고, 방향성이나 기울기 변화의 불연속성 및 자기 상관 등을 나타낼 수 있다는 점에서 기타 분석기법에 비해 탁월하다.

시계열 데이터  $d$ 와 관련된 웨이블릿  $\psi$ 의 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)은 식 5와 같이 표현할 수 있다.

$$W_{d,\psi}(s,t) = (d(t) * \psi_s(t)) \quad (5)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $\psi_s$ 는 척도(scale)  $s$ 에서의 웨이블릿 함수를 나타내며, 본 연구에서는 Morlet 함수( $\pi^{-1/4} e^{i\omega t} e^{-t^2/2}$ )를 사용하였다(Torrence 등, 1998). 시계열 데이터  $X$ 와  $Y$ 에 대한 웨이블릿 변환을 각각  $W_X$ ,  $W_Y$ 라고 하면, 직교 웨이블릿 변환(cross wavelet transform, XWT)  $W_{XY}(s,t)$ 은 식 6과 같이 표현된다(Torrence 등, 1999).

$$W_{XY}(s,t) = W_X(s,t) W_Y^*(s,t) \quad (6)$$

식 6에서  $W_Y^*(s,t)$ 는  $W_Y(s,t)$ 의 복소공액(complex conjugate)을 나타내며,  $W_{XY}$ 의 위상각(phase angle)은 시간-주파수 공간에서  $X$ 와  $Y$ 사이의 위상관계(phase relationship)를 나타낸다. 직교 웨이블릿 변환은 일반적으로 두 시계열 데이터 간의 공통 출력(common power)이 높은 시간-주파수 공간과 상대 위상각(relative phase)을 나타낸다.

웨이블릿 상관(wavelet coherence, WTC)은 두 시계열 데이터 간의 시간-주파수의 상관성 및 신호 간의 공변(co-vary)관계를 표현하며, 식 7과 같이 표현할 수 있다.

$$R^2(s,t) = \frac{|S(s^{-1} W_{XY}(s,t))|^2}{S(s^{-1} |W_X(s,t)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_Y(s,t)|^2)} \quad (7)$$

여기서,  $S$ 는 평활화 연산자로 식 8과 같이 표현되며,  $S_{scale}$ 은 웨이블릿 척도 축에서의 평활화,  $S_{time}$ 는 시간 영역에서의 평활화를 나타낸다.

$$S(W) = S_{scale}(S_{time}(W(s,t))) \quad (8)$$

본 연구에서는 GRACE와 SLR에서 각각 구해낸  $C_{20}$ 에 대한 분석을 진행하기 위하여 위에서 제시한 웨이블릿 분석 방법을 적용하였으며 그 결과를 각각 그림 3~5에 표시하였다. 그림에서의 원추모양의 경계선은 영향추(cone of influence)를 나타내는 것이며, 굵은 검은색 선은 5% 유의수준(신뢰구간: 95%)을 나타낸다. 또한, 그림 4와 5에서는 상대 위상각이 화살표 벡터로 표시되는데 화살표가 오른쪽을 향하면 위상이 일치함을 나타내고, 왼쪽을 향하면 두 시계열 신호의 위상이 상반됨을 의미하며, 수직으로 위를 향하는 경우 즉 상대 위상각이  $270^\circ$ 이면  $Y$ 의 위상이  $X$ 에 비해  $90^\circ$ 가 지연됨을 나타낸다.

우선, 그림 3에서는 GRACE와 SLR에서 구한  $C_{20}$  값의 연속 웨이블릿 변환 결과를 표시하였다. 그림 3(a)의 GRACE  $C_{20}$  값은 대부분 시간영역에서 비교적 강한 반년 주기를 나타내고 있고 그림 3(b)의 SLR 결과는 명확한 1년 주기가 우위를 차지하고 있었으며 동시에 약간의 반년주기 신호를 보여주고 있다. 이는 GRACE의 위성궤도 고도가 SLR 위성들에 비해 훨씬 낮은 관계로 지구시스템에서 발생하는 다양한 주기의 질량 재분배의 영향을 많

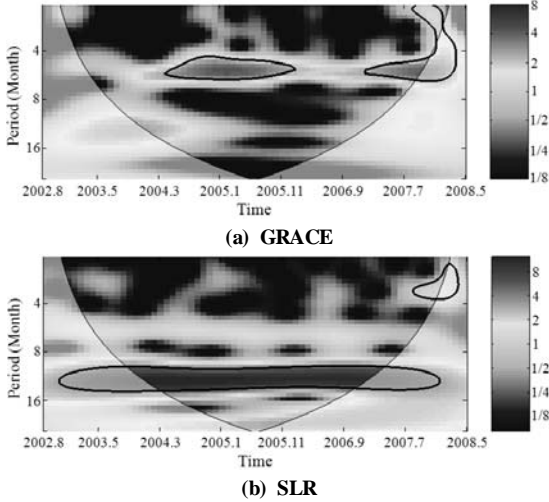


그림 3. GRACE, SLR의  $C_{20}$  연속 웨이블릿 변환

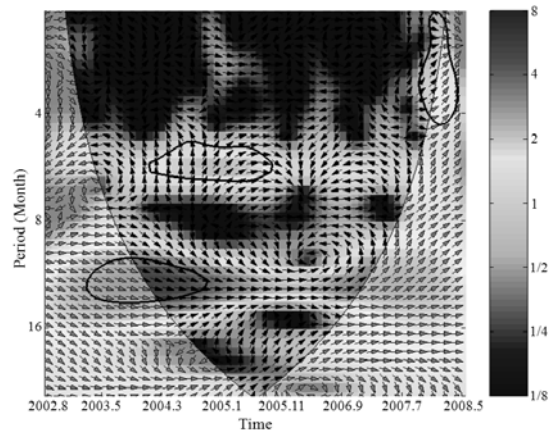


그림 4. GRACE, SLR  $C_{20}$  사이의 직교 웨이블릿 스펙트럼

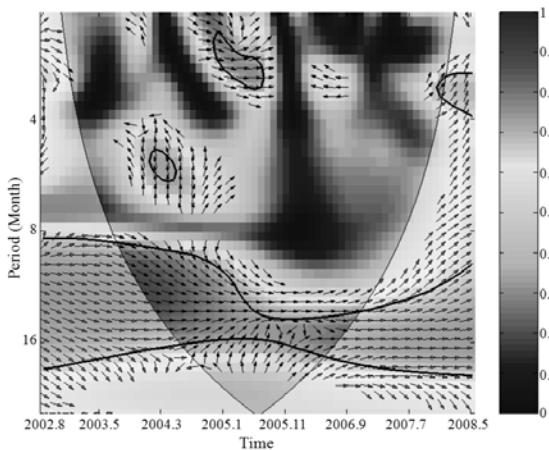


그림 5. GRACE, SLR  $C_{20}$  사이의 웨이블릿 상관관계 및 위상

이 받기 때문인 것으로 분석된다. 이를 제외하고도 SLR의  $C_{20}$  성분이 GRACE에 비해 매우 안정적인 특징도 살펴볼 수 있다.

다음으로 그림 4와 5에서 보듯이 GRACE와 SLR의  $C_{20}$ 는 1년 주기에서 높은 강도의 직교 웨이블릿 스펙트럼과 상관관계를 나타내고 있으며 위상 또한 일치한 것으로 나타났다. 5% 유의수준을 적용할 경우, 1년 주기를 제외한 대부분 구간에서는 직교 웨이블릿 스펙트럼 및 상관관계가 존재하지 않았는데 그 원인은 SLR의  $C_{20}$  시계열 데이터가 짧은 주기에서의 신호가 약하기 때문인 것으로 추정된다.

위에서 서술한 GRACE와 SLR 자료를 이용하여 해석한  $C_{20}$ 의 시계열 변화에 비교적 큰 차이가 존재하는 이유를 분석하면 다음과 같다. 첫째로, 위성의 궤도 배치로 볼 때, GRACE는 근극 궤도(near-polar orbit)를 비행하며 약 30일을 주기로 전 지구에 대한 중력장 자료를 획득하므로 고정밀도의 중/장파장 중력장을 획득할 수는 있지만 모든 관측점의 시공간적 분포가 동일하지 않다는 단점이 있다. 반면 SLR 자료는 고정된 관측점에서 여러 개의 궤도 상에 분포되어 있는 SLR 위성의 궤도 추적자료를 통합하여 계산하기 때문에 공간 및 시간적 분포가 GRACE에 비해 훨씬 우월하다. 다음, SLR의 위성궤도는 대부분 GRACE(450km)보다 몇 배가 높은 수천~수만 km에 위치하고 있어 지구의 만유인력으로 인한 섭동력의 영향을 극히 적게 받으며 지구 중력퍼텐셜의 고차항의 영향은 거의 받지 않게 된다. 따라서 SLR의  $C_{20}$ 는 연변화가 선명한 반면 GRACE는 연변화보다 짧은 주기의 신호에 민감하게 반응하는 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 GRACE의 월별 중력장모델과 SLR 자료를 분석하여  $C_{20}$ 의 시계열 변화를 비교하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 2002년 4월~2008년 5월 사이의 총 70개에 달하는 월별  $C_{20}$  시계열 데이터를 분석한 결과, SLR 자료를 이용한  $C_{20}$ 의 표준편차는  $0.67 \times 10^{-10}$ 로 표준편차가  $1.74 \times 10^{-10}$ 인 GRACE의 결과에 비해 2배 이상의 높은 정밀도를 나타내었다. 또한 SLR의 변화가 1년 주기에서 우위를 차지하는데 이는 위성궤도의 고도 차이로 인하여 GRACE가

SLR보다 지구 중력장의 저차항 변화에 더욱 민감한 변화를 보여주기 때문인 것으로 분석되었다.

2. 두 시계열 데이터에 대한 연속 웨이블릿 변환을 적용한 결과, GRACE와 SLR의 주기성 차이를 보다 시각적으로 확인할 수 있었으며, XWT 및 WTC 분석결과, 1년 주기에서 높은 강도의 직교 웨이블릿 스펙트럼과 상관관계계를 가지고 있고, 위상도 일치한 것으로 확인되었다.

3. GRACE 월별 중력장모델과 SLR 자료를 이용한  $C_{20}$ 의 시계열 데이터는 전반적으로 매우 높은 상관성을 보였지만, GRACE의 정밀도가 상대적으로 낮았으며 이는 GRACE 위성과 SLR 위성의 궤도 배치 및 관측방식의 차이로 인한 것으로 추정된다.

4. 본 연구의 결과를 분석해 볼 때 향후 GRACE 월별 중력장모델의 변화를 이용한 지역적인 질량 이동 및 재분배를 연구함에 있어서 반드시  $C_{20}$ 의 영향을 고려해야 하며,  $C_{20}$ 항을 삭제하거나 정밀도가 높은 SLR 자료의 처리 결과로 대체하는 방법의 사용을 고려해야 한다.

5.  $C_{20}$ 의 시계열 변화에 대한 지속적이고 다각화된 비교분석을 위해 IERS에서 제공하는 Bulletin B포맷의 지구자전파라미터(EOP)와 올해 10월에 발사되는 GOCE 중력위성의 데이터를 이용할 경우 더욱 좋은 성과가 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 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.
- Bianco, G., R. Devoti, M. Fermi, V. Luceri, P. Rutigliano, C. Sciarretta (1998), Estimation of Low Degree Geopotential Coefficients using SLR Data, Planet. Space Sci., Vol. 46 (11/12), pp. 1633-1638.
- Chao, B. F. (2006), Earth's oblateness and its temporal variations, Comptes Rendus Geosciences, Vol. 338, No. 14-15, pp. 1123-1129.
- Cheng, M., Shum, C.K., and Tapley, B.D. (1997), Determination of long-term changes in Earth's gravity field from satellite ranging observations, J. Geophys. Res., Vol. 102, B10, pp. 22,377-22,390.
- Cheng, M.K., and Tapley, B.D. (2004), Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years. J. Geophys. Res., Vol. 109, B09402, pp. 1-9.
- Crowley, J.W., J.X. Mitrovica, R.C. Bailey, M.E. Tamisiea, and J.L. Davis (2008), Annual Variations in Water Storage and Precipitation in the Amazon Basin: Bounding Sink Terms in the Terrestrial Hydrological Balance Using GRACE Satellite Gravity Data, J. Geodesy, Vol. 82, No. 1, pp. 9-13.
- Cox, C.M., Chao, B.F. (2002), Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998, Vol. 297, No. 5582, pp. 831-833.
- Dickey, J.O., Marcus, S.L., de Viron, O., Fukumori, I., (2002), Recent Earth Oblateness Variations: Unraveling Climate and Postglacial Rebound Effects, Science, Vol. 298. No. 5600, pp. 1975-1977.
- Han, S.C., C.K. Shum, M. Bevis, C.Ji, C.Y. Kuo (2006), Crustal dilation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, Science, Vol. 313, No. 5787, pp. 658-662.
- Lambeck, K. (1988), Geophysical geodesy: The Slow Deformations of the Earth, Oxford Science Publications.
- Torge, W. (1991), Geodesy, 2nd Edition, Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Torrence, C., and Compo, G. P.(1998), A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78.
- Torrence, C., and P. Webster (1999), Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system, J. Climate, Vol. 12, pp. 2679-2690.
- Velicogna I., Wahr J. (2006), Measurements of Time-Variable Gravity Show Mass Loss in Antarctica, Science, Vol. 311, No. 5768, pp. 1754-1756.
- Yoder, C. F., Williams, J. G., Dickey, J. O., Schutz, B. E., Eanes, R. J., & Tapley, B. D. (1983), Secular variation of Earth's gravitational harmonic  $J_2$  coefficient from Lageos and nontidal acceleration of Earth rotation, Nature, Vol. 303, pp. 757-762.

(접수일 2008. 9. 7, 심사일 2008. 9. 23, 심사완료일 2008. 9. 26)