

GRACE 위성 운용 현황 및 고정밀 거리측정기 성능분석

김정래*, 양태형
한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Overview of the GRACE Mission Status and a High Precision Ranging Instrument J. Kim and T.H. Yang

요약

2002년 발사된 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)는 미국과 독일 합작으로 개발된 지구중력장 측정 전용 위성으로 동일한 궤도를 비행하는 두 개의 위성 사이 거리 변화를 측정하여 지구 중력장을 추정하는 사업이다. GRACE 위성의 핵심 관측기인 위성간 거리측정기의 원리에 대해 소개하고, 운용 현황 및 성능에 대해 소개하였다. 발사 전 성능 분석 단계에서 고려되지 못했던 거리측정기 오차 요인에 대해 분석하고, 향후 연구 방향을 제시하였다.

1. 서론

2002년 3월 발사된 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성은 미국 NASA와 독일 DLR (German Aerospace Research Establishment)과의 합작 사업으로 개발된 최초의 지구중력장 측정 전용 위성으로 정확한 중력장 모델 생성을 통해 관련 연구에 기여하는 것을 목적으로 하고 있다.

GRACE는 초기 고도 500km인 두 개의 동일한 위성으로 구성되어 있는데, 위성 간의 거리는 평균 220km 정도이다. 각 위성이 지나가는 지점의 중력 세기의

차이가 위성 간의 거리 변화를 유발하고 이를 측정하면 역으로 지구중력장을 추정할 수 있다. 위성 간 거리 측정을 위해서는 초단파 거리측정기를 사용하는데, 이는 정밀도가 수십 micron에 이르는 극히 정밀한 관측기이다. 한편, 위성 간의 거리는 중력뿐만 아니라 비중력 가속도에 의해서도 유발되므로 이를 상쇄하기 위하여 각 위성은 3축 가속도계를 장착하고 있으며, 관측값의 측정 시간 및 위치를 기록하기 위해서 우주측위용 GPS 수신기를 장착하고 있다.

GRACE는 미국 Texas 대학 CSR (Center for Space Research)의 Byron Tapley교수가 사업 책임을 맡고 있으며(Tapley 2004), NASA JPL에서 전체적인 시스템 구성 및 관측 장비 개발 등을 담당하였다. 설계수명 및 운용기간은 5년이었으나, 위성의 성공적인 운용으로 3년간 위성운용을 연장하게 되었다.

발사 전 계산한 GRACE에 의한 중력장 추정 정확도를 지오이드 오차로 나타낼 경우 파장 10000km에서 0.01mm 정도로 이전의 중력장모델보다 100배~1000배 향상된 정확도를 얻을 수 있을 것으로 추정된다 (Kim 2002). 하지만 이는 모든 관측기가 설계 조건을 만족하는 것을 가정하였을 경우로 실제 정확도는 이보다 낮아지게 된다.

2. GRACE 위성간 거리측정기

초단파 신호를 이용하여 거리를 측정할 때 가장 큰 오차 요인은 신호를 생성하는 진동자(oscillator)에 의한 오차인데, DOWR (Dual One-Way Ranging)은 일종의 차분(differencing) 방식을 사용하여 진동자 오차를 최소화함으로써 극히 높은 거리정밀도를 얻는 방법이다. DOWR은 GPS신호와 유사한 반송파 신호를 사용하며, 동일한 GPS 송수신기가 두 개의 위성에 장착되어 있는 것과 개념적으로 같다.

각 위성은 상대방 위성을 향하여 반송파를 송신하는 동시에 상대방에서 보낸 신호를 수신하게 되며, 각 위성에서 출력하는 반송파 신호는 수신 반송파와 내부 기준 반송파와의 차이가 된다. 여기서 각 위성의 송수신 시스템은 동일한 진동자에 구동되므로 각 위성의 진동자 불안정성에 의한 거리오차 요인은 각 수신신호에 거의 동일하면서 반대 부호로 되어있다. 수신된 신호는 지상으로 보내지는데, 지상에서 이 두 신호를 합성할 경우 진동자 불안정성에 의한 거리오차는 대부분 상쇄되게 된다. 이 방법을 이용하여 대부분의 중-저주파 오차요인을 제거할 수 있다 (Kim 2002).

GRACE에 탑재된 DOWR은 KBR(K-Band Ranging)로 불리는데, 이는 K(24GHz)와 Ka (32GHz)의 주파수를 사용하기 때문에 붙여진 이름이다. 각 위성의 전면에 장착된 1개의 안테나로 반송파 송수신 신호를 모두 처리하며, K와 Ka 신호 모두 동일한 진동자에서 생성되지만, 다른 배수기를 사용한다. 위성신호 간 전파간섭 등을 피하기 위하여 두 개 위성 주파수는 K밴드일 경우 0.5MHz 차이를 가진다(Davis 1999). 각 위성의 KBR과 GPS 수신기는 USO

(Ultra Stable Oscillator)라는 정밀한 수정진동자에 의해서 구동된다.

3. GRACE 운용 현황

2003년 7월 최초의 GRACE 중력장 모델인 GGM01 (Grace Gravity Model-01)이 발표되었는데, 이 모델은 초기 4개월 간의 데이터를 이용하여 생성한 것이다. 그림 1은 GGM01 모델의 지오이드 오차를 발사전 중력장 모델인 EGM96와 비교한 것으로 중-장파장 영역에서 $10\sim 50$ 배 향상된 정밀도를 보여주고 있다(Tapley 2004). 한편, GRACE 중력장 모델에는 GRACE 관측값만을 사용한 GGM01S와 다른 관측값과 합성한 GGM01C로 구분지어 진다.

2004년 10월에 GGM02 모델이 발표되었는데, GGM01에 비해 2~3배 향상된 정확도를 나타내었다. 모델의 정밀도는 특정 지점에 대한 지상 측정값 비교나 위성궤도 정확도 향상 여부 등을 이용하여 검증하였다. GGM 모델을 이용하여, 지구해수면 흐름 및 지하수자원 연구에 상당한 진전이 있었다.

하지만 이러한 정확도 향상은 발사 전 설계 목표치에는 도달하지 못하고 있는데, 현재 설계목표치와 3~4배 정도 차이를

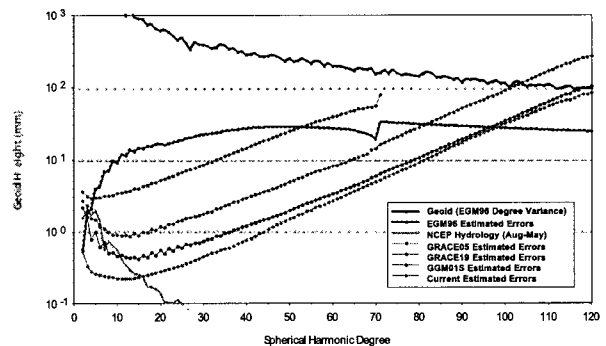


그림 1 GRACE 중력장모델 GGM01로 추정된 지오이드 오차

보이는 것은 관측기 오차가 설계값보다 크거나 관측기 보정이 충분하지 못한 것으로 판단된다. 또한, 이는 관측기 보정 기법 및 중력장 추정 방법의 개선으로 중력장 정확도를 좀 더 향상 시킬 수 있는 가능성이 있다는 것을 의미한다.

4. KBR 운용 현황

KBR은 GRACE-A 위성에 탑재된 주 수정진동자 고장으로 보조 수정진동자로 전환한 것 이외에는 큰 기계 이상 없이 동작을 수행하고 있으며, 데이터 획득률도 99%를 상회하고 있다.

그림 2는 각 위성으로부터 지상으로 송신되는 단방향 반송파 관측값을 표시한 것이다. 두 개 위성의 반송파 신호 주파수의 차이(~0.5MHz)로 인해 한쪽 반송파 관측값은 선형으로 증가하고 다른 쪽은 감소하는 양상을 보인다. 한편, 관측기 내부 저장변수의 표현 자리수 부족으로 정밀도가 감소하게 되기 때문에 반송파의 절대값이 일정한 크기에 도달할 경우 반송파 값을 초기화 시키기 때문에 톱니 형상을 지니게 된다.

2개의 단방향 반송파를 결합하여 K 및 Ka거리 관측값으로 변환한 뒤 결합하면 전리층 효과를 제거한 이중 단방향 거리 관측값을 생성하게 되는데, 이는 그림 3에 나타나 있다. 여기에는 1주기 궤도성분이

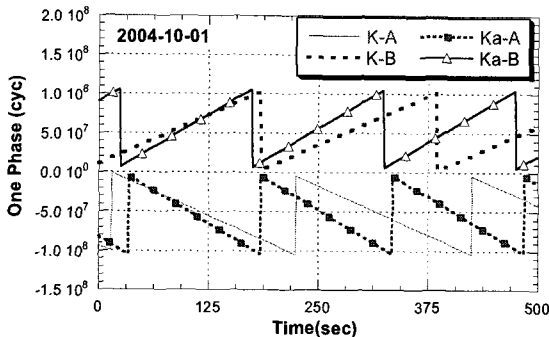


그림 2 KBR 단방향 반송파 관측값

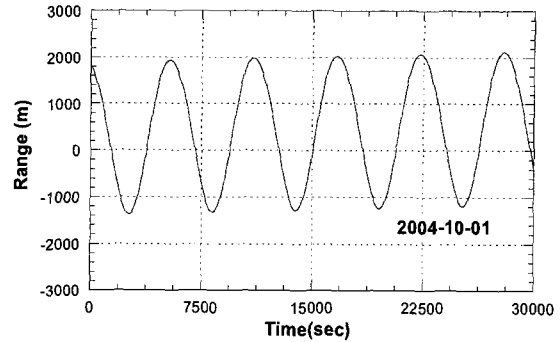


그림 3 KBR 거리 관측값

잘 나타나 있는데, 위성간의 거리가 1.6km의 진폭으로 변화함을 알 수 있다.

5. KBR 오차 요인 분석

KBR 관측 데이터 분석을 통해 파악된 오차 요인 중 발사 전 시뮬레이션 및 성능 평가에서 다루지 않았던 요인 들을 살펴보았다. 이러한 KBR 오차 요인 분석을 통해 향후 KBR 보정 기법 개선을 위한 연구 기반을 마련할 수 있다.

DOWR은 동일한 시간에 측정된 2개의 반송파를 합산하여 노이즈를 제거하기 때문에 관측시간을 동기화 시키는 것이 매우 중요하다. 각 위성의 관측값 절대오차 보다는 상대 관측시간 오차가 더 중요한데, 거리오차를 1 μ m 이하로 유지하기 위해서는 상대시간 오차를 1ns 이하로 유지해야 한다. GPS 데이터를 지상에서 IGS (International GNSS Service) 데이터와 결합하여 처리하면 이 요구 조건을 만족시키는 것이 가능하다 (Dunn 2003).

GRACE 위성에 탑재된 데이터 처리기는 위성설계단계에서 설정된 USO의 주파수에 근거하여 위성내부 시계를 구동하고 관측시점을 결정한다. 그런데, 설계 주파수와 실제 주파수의 차이로 인하여 관측시간 오차가 발생하고, 그 차이는 최대 0.1s 정도이다. 이러한

관측시간오차는 지상에서 후처리 시에 보정해 주게 되는데, 두 개 위성의 관측값을 공통 기준 시간으로 interpolation 하는 방법을 사용하게 된다.

그런데 KBR신호는 고주파 성분을 포함한 극히 정밀한 신호이므로 이러한 interpolation 시에 상당한 정확도 손실이 있게 된다. 이러한 오차 요인은 발사 전 영향 평가에서는 고려하지 않았던 것으로 이에 대한 추가 오차 요인을 고려할 필요가 있다. 발사 전에는 위성 내부에서의 시계 오차 보정이 자주 수행되어 시계 오차가 크지 않고 이에 의한 interpolation 오차도 크지 않은 것으로 가정했다. 이러한 문제점이 인식된 후 현재 시뮬레이션을 이용한 오차 요인 평가 및 보정 기법 개선 방향이 수행되고 있다.

이외에 GPS 데이터에 의한 시계오차 추정값과 KBR 관측값을 비교했을 때 불일치 되는 성분이 발견되었는데, 이는 GPS 추정값 또는 KBR 관측값에 고려되지 못했던 오차 요인이 있다는 것을 의미한다. 이러한 오차 요인 파악을 위해 다수의 기관에서 추정한 궤도 및 시간 오차 값을 비교하는 연구를 수행하고 있다.

발사 전부터 주요 KBR 오차 요인으로 예상된 것으로는 열 환경에 의한 KBR 특성 변화를 들 수 있다. 이는 위성 구조물 열변형 뿐만 아니라 KBR 안테나 및 RF 회로 성능 변화를 모두 포함하는데, 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다.

6. 결론

중력장측정 전용 위성인 GRACE 위성 및 정밀거리측정 장치의 원리를 설명하고, 운용 현황에 대해 논의 하였다. 위성 탑재

시계의 오차로 인한 관측시간 오차가 설계치 보다 상당히 큰 값을 가지는 것이 발견되었는데, 이는 KBR 관측값 interpolation 오차를 유발하고 이는 KBR 성능 저하의 한 요인이 될 수 있다. 오차 영향에 대한 심도 깊은 연구가 수행 중이며, 발사 전 개발한 KBR 소프트웨어 시뮬레이터를 보강 중이다. 이와 병행하여 시간 오차 영향을 최소화하는 보정 기법을 개선하는 연구를 수행 중이다

이러한 연구를 통해 GRACE에 의한 중력장 추정 정확도를 좀 더 향상 시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

후기

이 논문은 2004년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Dunn, C. et al, 2003. Application Challenge: Instrument of Grace GPS Augments Gravity, *GPS World*, February 2003: 16-28
- Kim, J. and B. D. Tapley, 2002. Error Analysis of a Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking Mission, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 25(6): 1100-1106.
- Tapley, B., S. Bettadpur, J. Ries, P. Thompson, and M. Watkins, 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system, *Science*, 305(5683), 503-505.