

GPS 관측을 통한 한반도 서해안 지역의 해수하중에 의한 지각변위 검출 가능성 조사

Feasibility Study for Detecting Ocean Loading Displacements in the Western Costal Area of Korea Using GPS Measurements

박관동¹⁾ · 임형철²⁾

Park, Kwan-Dong · Lim, Hyung-Chul

¹⁾ 국민대학교 삼림과학대학 산림자원학과 조교수(E-mail:kdpark@kookmin.ac.kr)

²⁾ 한국천문연구원 GPS 연구그룹 선임연구원(E-mail:hclim@kao.re.kr)

Abstract

The ocean loading displacement of the crust is one of the major error sources in space geodesy techniques. In the western part of the Korean Peninsula, the vertical displacement due to ocean loading reaches up to 3 cm. To check out the possibility of correcting the inaccurate ocean tide model in the Yellow Sea, we used four GPS sites to compute the height variations and compared them with the model-predicted ones. The comparison shows relatively good agreement except for small differences in the phase and amplitude.

1. 서론

우주측지(Space Geodesy)의 가장 중요한 관측장비라 할 수 있는 VBLI(Very-Long Baseline Interferometry), GPS(Global Positioning System), 그리고 SLR(Satellite Laser Ranging)은 현재 좌표결정 정밀도가 1-2mm 정도이고, 속도결정 정밀도는 1mm/year 정도로 매우 정확하며, 각종 하드웨어와 데이터 처리 알고리즘의 발전으로 정밀도는 계속 향상되고 있다. 이러한 높은 정밀도를 산출하기 위해서는 미세한 지각변위를 발생시키는 각종 오차요인을 반드시 고려해야 하며, 관련 현상을 정확히 예측할 수 있는 모델을 개발할 필요가 있다. 그 중 흔히 간과하기 쉬운 오차요인은 해수하중에 의한 수직방향 지각변위인데, 전 세계적으로 가장 그 변위가 심한 캐나다 서해안과 프랑스 해안의 경우 그 진폭이 6-8cm에 달하며, 한반도 서해안의 경우 약 1-3cm에 이른다. 그러므로 해수하중에 의한 지각변위를 고려하지 않는다면, 우주측지 장비로 관측한 정확한 측위결과의 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다.

지구는 완벽한 고체가 아니기 때문에 여러 종류의 지각변위가 발생한다. 그 대표적인 예는 고체지구(Solid Earth) Tide인데, 심한 경우 60cm 진폭의 변위가 발생하는 지역도 존재한다. 그러나 이를 고려할 수 있는 매우 정확한 모델이 존재하며 이런 모델에 기인하는 오차는 무시할 수 있을 정도이다. 또한, 극(Pole) Tide에 의해 주기적으로 발생하는 지각변위도 무시할 수 없는 오차요인이지만, 고체지구 Tide와 마찬가지로 매우 정확한 모델을 이용하면 손쉽게 보정할 수 있다. 즉, 관측소 위치에 따라 고체지구 Tide와 극 Tide는 정확히 예측이 가능하므로 고정밀 GPS 데이터 처리 시 매 관측시각마다 보정이 가능하다. 또 하나 무시할 수 없는 지각변위 요인은 대기압력하중(Atmospheric Pressure Loading)인데, 큰 대륙의 중앙부 같은 경우 최대 2cm 정도의 변위가 발생한다. 이는 사전에 변위정도를 예측할 수 없기 때문에, GPS 데이터처리 시 대기압력하중을 고려하지 않고 관측소 좌표를 결정한 후 기상데이터를 이용하여 계산된 대기압력하중에 의한 지각변위를 보정해 주어야 한다.

해수하중에 의한 지각변위를 정확히 계산하기 위해서는 정확한 해양 Tide 모델(Ocean Tide Model)이 필요하다. 그러나 한반도 서해안은 복잡한 리아스식 해안구조를 가지고 있으며, 검조기(Tide Gauge)와 인공위성 관측 데이터가 부족하기 때문에 해양 Tide 모델이 부정확하다. 또한, 해양 Tide 조화함수(Tidal Harmonics) 성분 중 가장 큰 진폭을 가지는 M_2 (아래참고)는 서해안 지역이 전 세계에서 두 번째로 높은 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2001). 부정확한 해양 Tide 모델은 지구물리를 비롯한 다양한 고정밀 측위 응용분야의 오차요인으로 작용하기 때문에 한반도와 그 주변지역의 정확한 모델 개발이 시급한 상황이다. Lee 등(2001)은 Matsumoto 등(2000)이 개발한 프로그램을 이용하여, 한반도 전역의 M_2 에 의한 지각변위를 계산하였지만, M_2 를 제외한 타 해양 Tide 조화함수 성분에 의한 지각변위에 대한 연구는 미흡하였다. 본 연구에서는 서해안 GPS 상시관측소에서 발생하는 해수하중에 의한 수직방향 지각변위를 현존하는 해양 Tide 모델을 기반으로 예측한 뒤, GPS 관측을 통해 계산한 값과 비교하였다. 이를 통해 현재 국내 운영중인 70여 개 GPS 상시관측소를 이용하여, 한반도 전역과 그 주변지역의 해양 Tide 모델을 개선할 수 있는 가능성을 타진해 보았다.

2. 해양 Tide 모델과 GPS 데이터 처리

2.1 해양 Tide 모델

2.1.1 해양 Tide 조화함수

본 연구에는 해양 Tide 조화함수 중 11개의 대표적인 조화함수를 사용하였는데, 이들은 표 1에서 보는 바와 같다. 11개의 조화함수는 다음과 같다: 1) 4개의 반일주(半日周, Semi-diurnal) Tide 조화함수 - M_2, S_2, N_2, K_2 ; 2) 4개의 일주(日周, Diurnal) Tide 조화함수 - O_1, P_1, Q_1, K_1 ; 3) 3개의 장주기(Long-Period) 조화함수 - M_f, M_m, S_{sa} . 표 1에는 각 조화함수의 필요성과 그 주기 또한 나열하였다.

표 1. Eleven tidal harmonics used in this study

	Darwin Symbol	Name	Period (h:hour, d:day)
Semi-diurnal	M_2	Principal lunar	12.42h
	S_2	Principal solar	12.00h
	N_2	Major lunar elliptical	12.66h
	K_2	Luni-solar declinational	11.97h
Diurnal	O_1	Principal lunar	25.82h
	P_1	Principal solar	24.07h
	Q_1	Major lunar elliptical	26.87h
	K_1	Luni-solar declinational	23.93h
Long-period	M_f	Lunar fortnightly	13.66d
	M_m	Lunar monthly	27.55d
	S_{sa}	Solar semi-annual	182.6d

표 1의 조화함수 중 가장 큰 수직방향 지각변위 진폭은 M_2 성분에 의해서 발생하며, 이는 대략 12시간의 주기를 가진다. 한반도 서해안 지역의 경우 M_2 에 의한 수직방향지각변위는 경기만 일대에서 대략 1.8cm 정도이며, 경기만에서 멀어질수록 그 진폭은 감소한다(Lee 등, 2001).

2.1.2 해양 Tide 모델

표 2는 현재 가장 많이 사용되는 대표적인 해양 Tide 모델에 대해 각각의 생성 방법 및 그 격자 크기를 함께 보여준다. 표 2에서 언급되는 T/P는 레이더를 이용한 해수면 높이 측정 인공위성인 Topex/Poseidon을 의미하며, ERS1/2는 또 다른 지구관측 인공위성의 이름이다. 이들 위성에서 관측한

해양 Tide는 타 해양 Tide 모델을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 Lee 등(2001)이 사용한 Matsumoto 등(2000)이 개발한 NAO99Jb 해양 Tide 모델과 GOTIC2 프로그램을 사용하였다. NAO99Jb 모델은 표 2의 NAO99b를 한반도와 일본지역 219개 검조기 관측 데이터를 통합하여 북동아시아 지역에 보다 적합하게 개발한 모델이다. 각 모델의 정확성을 비교하기 위해서 선별적으로 GOT99.2b와 CSR4.0 모델을 사용하여 보았지만, NAO99Jb모델과의 차이는 미미하였다.

표 2. Popular ocean tide models

Name	Description	Grid Resolution
Schwiderski	Assimilation of tide gauge data into hydrodynamic model	1° × 1°
FES94.1	Pure hydrodynamic tide model	0.5° × 0.5°
FES95.2	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	0.5° × 0.5°
FES98	Assimilation of tide gauge data into hydrodynamic model	0.25° × 0.25°
FES99, FES02	Assimilation of T/P data into FES98	0.25° × 0.25°
CSR3.0, CSR4.0	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	0.5° × 0.5°
GOT99.2b	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	0.5° × 0.5°
GOT00	Assimilation of ERS1/2 data outside the latitude ±66°	0.5° × 0.5°
NAO99b	Assimilation of T/P and tide gauge data into hydrodynamic model	0.5° × 0.5°

2.2 GPS 상시관측소 및 데이터 처리

2.2.1 연구 대상 지역

현재 한국에는 70여 개 이상의 GPS 상시관측소가 운영중이다. 그림 1은 천문연구원(KAO, Korea Astronomy Observatory), 행정자치부(MOGAHA, Ministry of Government Administration and Home Affairs), 해양수산부(MOMAF, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 그리고 국토지리정보원(NGII, National Geographic Information Institute)에서 운영중인 관측소를 보여준다. 이 중 서해안에 위치한 4곳의 상시관측소(INCH, 인천; SEOS, 서산; YONK, 영광; MKPO, 목포)를 본 연구의 대상지역으로 선택하였다. 서해 도서지역에는 특히 해양수산부의 선박항해용 Differential GPS 기준국으로 사용되는 상시 관측소들이 있지만, 많은 수의 사이클슬립(cycle slip)이 관측되고 데이터의 신뢰도가 낮아 본 연구 대상에서 제외시켰다(Park 등, 2002). 그림 2는 지각변위가 가장 높을 것으로 예측되는 경기만에 위치한 INCH 관측소의 2000년 1월 1일부터 30일 까지 한 달 간의 해수하중에 의한 수직 지각변위 예상치를 GOTIC2를 이용하여 계산한 결과를 보여준다. 그림 3은 지각변위가 적을 것으로 예상되는 MKPO 관측소의 계산 결과를 나타낸다. INCH에서는 한 달의 기간동안 최대 진폭이 3cm에 육박하고, MKPO에서는 2cm 미만으로 나타난다. 만약에 M_2 만을 고려하였다면, 일정 크기 진폭의 sine파 형태의 지각변위를 보였을 것이다.

2.2.2 GPS 데이터 처리

앞서 언급한 네 곳의 GPS 상시관측소 데이터를 고정밀 GPS 데이터 처리 소프트웨어인 GIPSY-OASIS II(이하 GIPSY라 칭함)를 이용하여 처리하였다. GIPSY를 이용한 데이터 처리 방법 중 kinematic 정밀단독측위(Precise Point Positioning) 기법을 이용하였다. 이는 기존의 정밀단독측위가 1-2 시간 내지 하루 단위로 단일 좌표를 결정하는 것과는 달리, 매 관측 시각마다 정밀 좌표를 결정하는 방법으로 대형 교량이나 빌딩 등 구조물 변위 감시에 이용되는 방법이다.

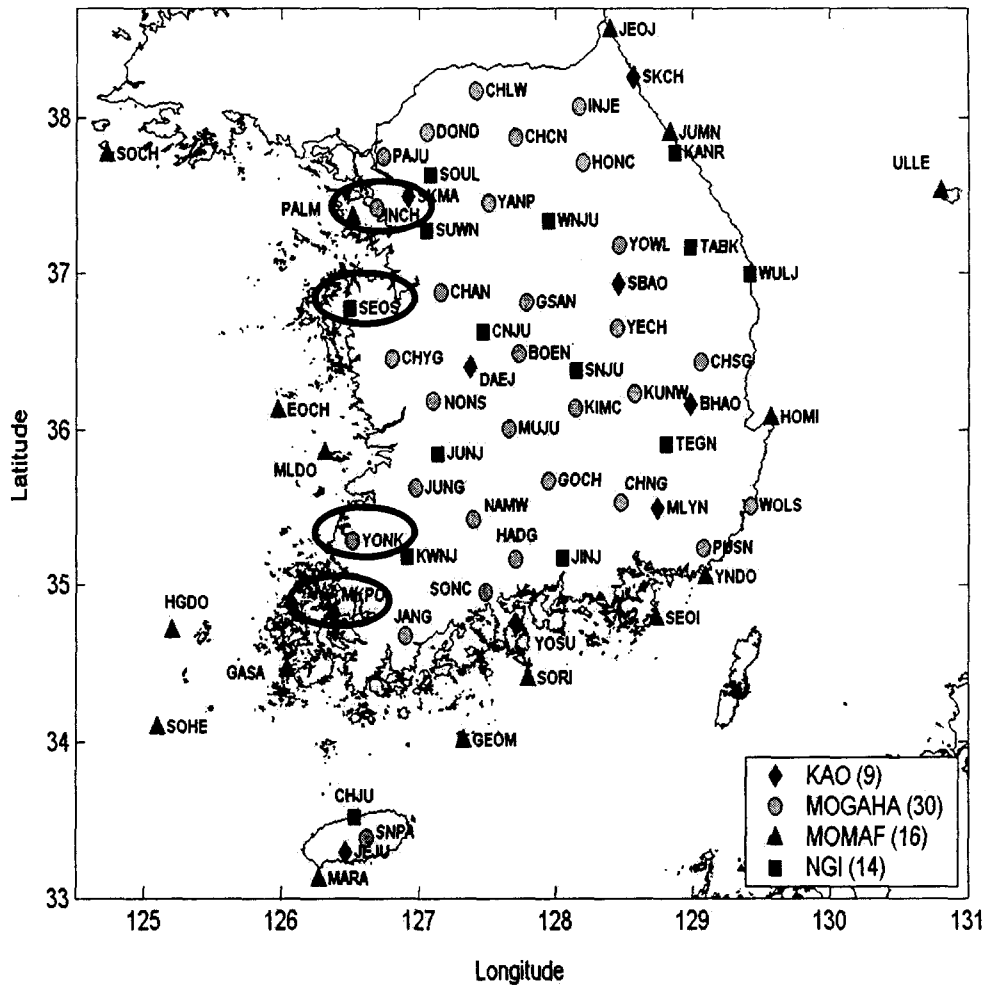


그림 1. Korean GPS Network and four sites used for this study

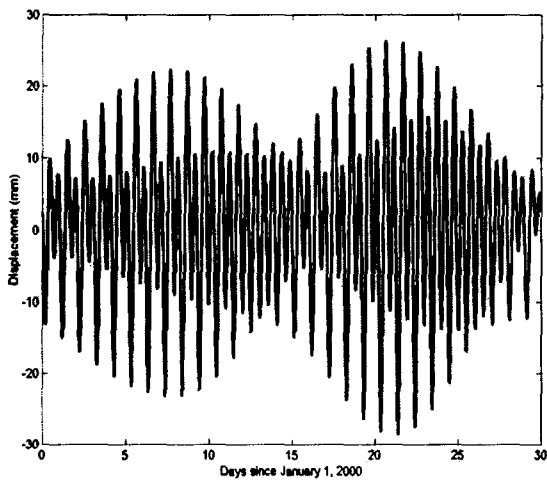


그림 2. Ocean loading displacements at INCH

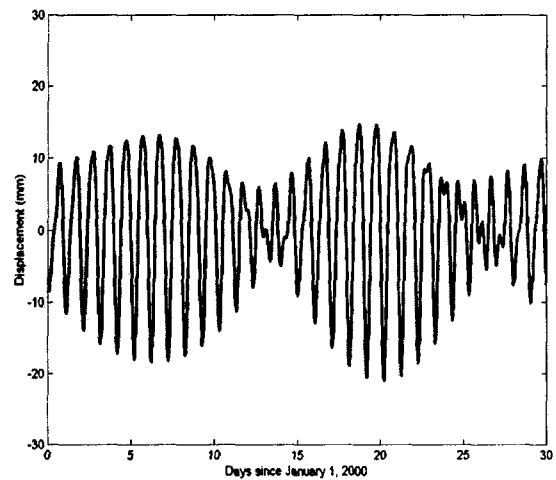


그림 3. Ocean loading displacements at MKPO

3. GPS 관측과 해양 Tide 모델 비교

3.1 비교 방법 및 결과

비교 대상으로 선택한 날은 2003년 4월 10일부터 2일간이다. 가장 변위가 큰 INCH 관측소의 해수 하중에 의한 지각변위를 GOTIC2와 NAO99Jb를 이용하여 10분 단위로 계산하였다. INCH GPS 상시관측소의 좌표를 GIPSY를 이용하여 10분 간격으로 추정하고, 이를 GOTIC2가 계산한 예상 지각변위와 비교하였다. 그 결과는 그림 4에 보는 바와 같다. 그림에서 가로축은 4월 10일 0시를 기준으로 나타낸 시간이며, 세로축은 수직방향 지각변위(mm 단위)를 보여준다. GPS 데이터 처리를 통해 10분마다 계산한 관측소 좌표 값은 4시간 단위로 평균치로 나타내었다.

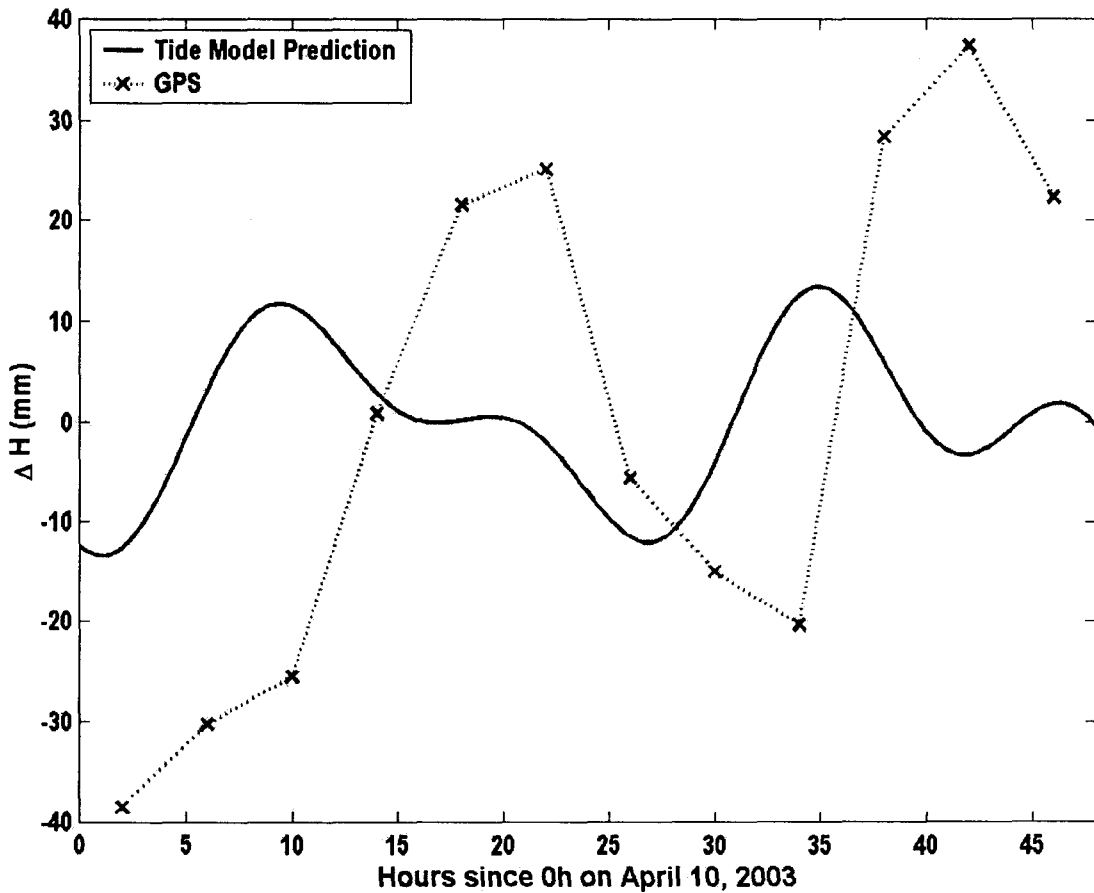


그림 4. Comparison between GPS-derived and model-predicted heights

3.2 결과 분석

그림 4에서 보면, GPS로 계산한 수직좌표 성분이 모델 예측 값보다 진폭이 다소 높은 것으로 나타나지만, 전체적인 경향은 6-8시간 정도의 시간차를 고려하면, 비슷하다는 것을 알 수 있다. 캐나다와 프랑스의 서해안과는 달리 한반도 서해안에서 발생하는 해수하중의 지각변위 정도가 작기 때문에(최대 2-3cm의 진폭이 예상됨) 이 정도의 일치는 매우 의미 있는 결과라고 해석될 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

한반도 서해안 지역의 부정확한 해양 Tide 모델을 개선하기 위해 GPS 상시관측소 데이터를 이용할 수 있는 가능성을 타진해 보았다. 해양 Tide 모델은 일본의 Matsumoto 등(2000)이 개발한 모델과 프로그램을 이용하였으며, 서해안 지역의 GPS 상시관측소 데이터를 GIPSY로 고정밀 처리하여 비교하였다. 다소간의 진폭과 위상(phase) 차를 보이지만, 해수하중에 의한 대략적인 지각변위 경향이 일치함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 단 2일간의 데이터를 이용하였지만, 더 많은 관측소 데이터를 오랜 기간 분석하면, 의미 있는 결과가 나올 수 있다는 가능성을 인지하게 되었다. 또한 본 연구에서는 적용하지 않은 안테나 위상중심변화를 적용하여 보다 정확한 GPS 데이터 처리를 수행할 계획이다.

참고문헌

- Lee, H. C. and Moon, W. M. (2001), Ocean tidal loading displacement around Korean Peninsula, *Geosciences Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 319-326.
- Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000), Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydroynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Vol. 56, pp. 567-581.
- Park, K.-D., Kim, K. N., Lim, H. C. and Park, P. H. (2002), Evaluation of data quality of permanent GPS stations in South Korea, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 19, No. 4, pp. 367-376.