

해양조석하중에 의한 지각변위 분석

박관동^{1†}, 원지혜¹, 김호균², 임관창³
¹인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과
²국립해양조사원 해양조사연구실
³국립해양조사원 해양과

ANALYSIS OF CRUSTAL DEFORMATION DUE TO OCEAN TIDE LOADING

Kwan-Dong Park^{1†}, Jihye Won¹, Ho-Kyun Kim², and Kwan-Chang Lim³

¹Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²Ocean Research Lab., National Oceanographic Research Institute, Incheon 400-800, Korea

³Oceanographic Division, National Oceanographic Research Institute, Incheon 400-800, Korea

E-mail: kdpark@inha.ac.kr

(Received July 19, 2007; Accepted August 01, 2007)

요 약

한반도에서 발생하는 해양조석하중(OTL, Ocean Tide Loading)에 의한 지각변위는 수직방향으로 최대 ~3cm에 달한다. 현재 우주측지 기술로 성취할 수 있는 측위 정확도가 mm 수준임을 고려할 때, cm 단위로 발생하는 OTL 지각변위 영향은 정밀하게 모델링하고 측위 시 보정해야 할 대상이다. 이 연구에서는 먼저 OTL 지각변위 보정에 필요한 해양조석 모델들을 서로 비교하고 OTL 지각변위 예측 프로그램을 검증하였다. 경기만 지역의 경우 해양조석 모델에 따라 ~6mm RMS의 수직성분 지각변위 차이가 발생하였다. VLBI 천문대가 설치되는 서울, 울산, 서귀포에서의 OTL 지각변위를 분석한 결과 서귀포는 ~3.5cm, 서울과 울산은 ~2cm 진폭의 수직방향 지각변위가 예측되었다. 또한 GPS 자료 처리에서 OTL 지각변위 영향을 보정하지 않았을 경우 GPS Zenith Wet Delay(ZWD) 추정 값이 달라졌으며, OTL 지각변위와 ZWD간의 배율인자(scale factor)는 3.72로 나타났다.

ABSTRACT

The crustal deformation due to Ocean Tide Loading (OTL) in the Korean peninsula reaches up to ~3 cm in the vertical direction. Considering that the achievable positioning accuracy of current state-of-the-art space geodesy technologies is at the several millimeter level, the centimeter-level OTL effect should be precisely modelled and corrected for. This study begins with comparison of ocean tide models and validation of OTL-prediction softwares. Different ocean tide models caused about ~6 mm RMS differences in the vertical deformation in the Kyung-gi Bay area. When we analyzed the OTL displacements in the Seoul, Ulsan, and Seogwipo areas where three VLBI observatories are planned to be installed, the maximum displacement of

[†]corresponding author

~3.5 cm was predicted in the Seogwipo area and ~2 cm in the Seoul and Ulsan areas. When the OTL corrections were not applied in the GPS data processing, the OTL effect propagates into the Zenith Wet Delay (ZWD) estimates, and the scale factor between ZWD differences and OTL displacements was 3.72.

Keywords: GPS, Ocean Tide Loading, ocean tide, crustal deformation

1. 서 론

우주측지(space geodesy)에 있어 가장 정확한 좌표결정 도구는 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)와 SLR(Satellite Laser Ranging)이다. 이 두 장비를 이용한 관측소 좌표결정 정밀도는 현재 2-3mm 수준이며, 속도결정 정밀도는 1mm/year 이하이다. GPS(Global Positioning System)의 경우에도, VLBI나 SLR에 비해 다소 정밀도가 낮은 하지만, 좌표는 3-8mm, 속도는 ~1mm/year의 정밀도를 달성할 수 있다. 장비의 성능향상과 각종 첨단 관측모델의 개발로 인해 우주측지 기술을 이용한 좌표 및 속도 정밀도는 향후 더욱 향상될 것으로 기대된다. 이러한 높은 정밀도를 달성하기 위해서는 지각변위를 유발하는 각종 요인을 반드시 고려해야 하며, 관련 현상을 정확히 예측할 수 있는 모델을 개발할 필요가 있다(박관동과 임형철 2004). 그 중 흔히 간과하기 쉬운 오차요인은 해양 조석하중(OTL, Ocean Tide Loading)에 의한 수직방향 지각변위이다. 지구는 완벽한 고체가 아니기 때문에 해양조석에 의한 주기적인 해수하중의 변동으로 인해 지각변위가 발생하며, 수평방향의 변위보다 수직방향의 변위가 더 크다. 전 세계적으로 OTL 지각변위가 가장 크게 발생하는 곳은 캐나다 서해안과 프랑스 해안으로 그 진폭은 6-8cm이며, 한반도 서해안의 경우 1-3cm이다. 앞서 언급한 바와 같이 우주측지 기술의 측위 정확도가 2-8mm인 점을 고려한다면 OTL 지각변위를 보정하지 않을 경우 우주측지 장비를 이용한 측위결과의 신뢰성이 저하될 수밖에 없다.

OTL 이외에도 고체지구조석(solid Earth tide)과 극조석(pole tide)에 의한 지각변위도 발생한다. 전 세계적으로 볼 때, 고체지구조석에 의해 최대 60cm 진폭의 변위가 발생하는 지역도 있다. 그러나 고체지구조석에 의한 지각변위는 이를 예측할 수 있는 매우 정확한 모델이 존재하며, 이 모델의 부정확성에서 기인하는 오차는 무시할 수 있는 수준이다(Allinson et al. 2004). 지구 자전축의 변동으로 인한 극조석(pole tide)도 모델을 이용하면 정확하게 보정할 수 있다. 즉 관측소의 위치에 따라 고체지구조석과 극조석은 매우 정확하게 예측할 수 있으므로, 우주측지 자료를 처리할 때 두 조석현상에 의한 지각변위는 각 관측시각마다 보정하는 것이 일반적이다.

OTL, 고체지구조석, 그리고 극조석에 의한 지각변위는 주기적으로 발생하는 현상이기 때문에, 장기간의 우주측지 자료를 처리해 관측소 좌표와 속도를 계산하는 경우 그 영향이 상쇄된다고 판단하는 경우가 있다. 그러나 정확한 좌표와 속도를 산출하기 위해서는 각종 조석현상에 의한 지각변위는 반드시 보정해야한다. 그 이유는 조석현상은 여러 주기를 가지는 성분의 합으로 발생하기 때문에, 일반적인 방법인 24시간 단위의 우주측지 자료 처리에서 조석현상을 보정하지 않으면 좌표시계열에 signal aliasing의 문제가 나타날 수 있다(Penna et al. 2007). 또한 실시간 혹은 준실시간으로 자료를 처리하는 경우에도 각 관측시각마다 다른 크기로 발생하는 조석현상에 대한 정확한 모델링 및 보정이 반드시 필요하다. 일례로 GPS로 대기 중의 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)을

표 1. 해양조석 분조의 구분, 명칭, 그리고 주기.

Classification	Darwin Symbol	Name	Period (h: hour; d: day)
Semi-diurnal (하루에 두 번)	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 (하루에 한 번)	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 (장주기)	M_f	Lunar fortnightly	13.66d
	M_m	Lunar monthly	27.55d
	S_{sa}	Solar semi-annual	182.6d

준실시간으로 결정할 때 OTL 지각변위를 고려하지 않으면 2mm 이상의 가강수량 오차가 발생하게 되고, 결과적으로 전산일기예보에서 요구하는 GPS 가강수량 정밀도인 1-2mm를 달성할 수 없게 된다(Dragert et al. 2000).

한반도 서해안은 약 1-3cm 진폭의 OTL 지각변위가 발생하는 지역이다(Lee & Moon 2001). 그러나 서해안이 복잡한 리아스(rias)식 해안이고, 양질의 조위관측 자료가 부족하며, 인공위성 관측 자료가 충분하지 않은 이유들로 인해 한반도 주변 지역에 대한 정확한 해양조석 모델이 확립되지 않은 상황이다. 2000년을 전후로 많은 수의 GPS 상시관측소가 서해안과 제주도 지역에 설치·운영되고 있고, 3기의 VLBI 안테나 중 2기가 서해안과 제주도 해안에 인접해 설치된다는 사실을 고려할 때 한반도에 적합한 OTL 지각변위 보정모델을 시급히 개발할 필요가 있다.

GPS를 이용한 측위 정확도가 향상됨에 따라 외국에서는 OTL 지각변위가 크게 발생하는 지역에 설치된 GPS 상시관측소 자료를 이용해 해양조석 분조(tidal constituent)를 추정하는 연구가 성공적으로 진행되고 있다(Allinson et al. 2004). 이 연구의 최종 목적은 국내 GPS 관측을 통한 한반도 지역의 해양조석 모델 개선 가능성을 타진하는 것이다. 이 논문에서는 먼저 다양한 해양조석 모델들을 서로 비교하고 OTL 지각변위 예측 프로그램을 검증하였다. 그리고 OTL 지각변위 모델의 적용여부에 따른 GPS 자료 처리 결과를 분석하였다.

2. 해양조석 모델과 OTL 지각변위 계산

해양조석 모델은 각 지역의 조석현상을 설명할 수 있는 수십여 개 분조로 구성되어 있으며, 각 분조는 조석조화상수인 진폭(amplitude)과 위상(phase)으로 표현된다. 대표적인 11개 분조의 명칭과 주기를 표 1에 나타내었다. 11개 분조는 반일주조(semi-diurnal) 성분 4개(M_2, S_2, N_2, K_2), 일주조(diurnal) 성분 4개(O_1, P_1, Q_1, K_1) 그리고 장주기(long-period) 성분 3개(M_f, M_m, S_{sa})로 구성된다. 표 1의 11개 분조 중 가장 큰 지각변위를 생성하는 성분은 12.42시간 주기를 갖는 M_2 분조이다. 한반도 서해안 지역의 경우 경기만 일대가 가장 큰 M_2 분조의 진폭값을 가지며, 그 크기는 약 1.8cm이다. 경기 만에서 멀어질수록 M_2 진폭은 감소한다(Lee & Moon 2001).

표 2는 현재 널리 사용되고 있는 대표적인 해양조석 모델의 명칭과 각각의 생성방법, 그리고 모델의 격자 해상도를 나타낸 것이다. 표 2에 나타낸 T/P(Topex/Poseidon)는 레이더고도계(radar

표 2. 대표적인 해양조석 모델.

Name	Description	Grid Resolution
Schwidorski	Assimilation of tide gauge data into hydrodynamic model	$1^\circ \times 1^\circ$
FES94.1	Pure hydrodynamic tide model	$.5^\circ \times .5^\circ$
FES95.2	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	$.5^\circ \times .5^\circ$
FES98	Assimilation of tide gauge data into hydrodynamic model	$.25^\circ \times .25^\circ$
FES99/02	Assimilation of T/P data into FES98	$.25^\circ \times .25^\circ$
CSR3.0/4.0	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	$.5^\circ \times .5^\circ$
GOT99.2b	T/P data used to adjust the long wavelength of FES94.1	$.5^\circ \times .5^\circ$
GOT00	Assimilation of ERS1/2 data outside the latitude $\pm 66^\circ$	$.5^\circ \times .5^\circ$
NAO.99b/99.5	Assimilation of T/P and tide gauge data into hydrodynamic model	$.5^\circ \times .5^\circ/5' \times 5'$

altimeter)를 사용하여 해수면 높이와 온도를 관측하는 인공위성이며, ERS1/2는 Synthetic Aperture Radar를 장착한 지구관측 인공위성이다. NAO 모델은 NAO.99b와 NAO.99Jb 두 종류가 있는데, NAO.99b는 전지구모델(global model)이고 NAO.99Jb는 한반도와 일본지역의 219개 조위관측소 자료를 통합하여 북동아시아 지역에 보다 적합하도록 개발된 국지모델(local model)이다(Matsumoto et al. 2001). 이 연구에서는 NAO.99Jb 모델을 사용하였다.

일반적으로 시간 t 에서 해양조석하중에 의한 지각변위 Δc 는 McCarthy(1996)가 IERS Conventions에서 규정한 다음의 식 (1)을 이용하여 산출한다.

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (1)$$

여기서 ω_j 는 분조의 각속도, A_{cj} 는 진폭, 그리고 Φ_{cj} 는 그리니치 천문대를 기준으로 하는 위상을 나타내며, j 는 각 조석분조를 의미한다. 근지점 각거리로 표현되는 천체인수(astronomical argument) χ_j 는 해당 시간의 연도와 날짜를 입력해 McCarthy(1996)가 작성한 ARG 프로그램으로 산출할 수 있다. f_j 와 u_j 는 황도와 달 궤도가 이루는 교점의 위치에 따른 함수이며, 각각은 nodal factor와 nodal angle을 나타낸다. 8개의 분조($M_2, S_2, N_2, K_2, O_1, P_1, Q_1, K_1$)의 f_j 와 u_j 는 Doodson(1928)의 공식을 이용해 계산할 수 있다.

이 연구에서는 NAO.99Jb 국지모델을 적용할 수 있는 GOTIC2 프로그램을 사용해 OTL에 의한 지각변위를 계산하였다(Matsumoto et al. 2001). OTL에 의한 지각변위를 계산하는 프로그램은 GOTIC2외에도 OLFQ(Scherneck 1991), NLOADF(Agnew 1997), LOADSDP(Pagiatakis 1992) 등이 있다. 이들 프로그램에서 계산한 OTL 수직방향 지각변위의 차이는 0.2mm 정도로, 프로그램에 의한 계산결과 차이는 무시할 수 있다(Scherneck & Bos 2002).

다른 해양조석 모델을 사용함에 따라 발생하는 OTL 지각변위 차이를 비교해보기 위해 표 2의 CSR4.0, GOT99.2b, NAO.99Jb를 사용하였다. 비교분석에는 일주조 성분 4개와 반일주조 성분 4개를 포함시켜 총 8개의 분조를 사용하였으며, OTL 지각변위 예측지점은 인천항에 위치한 국립해양조사원 조위관측소로 선택하였다. 분석기간은 2005년 10월 20일부터 4일간이다. 그림 1을 보면 CSR 모델과 GOT 모델의 차이는 크지 않은 반면, 이 두 모델과 NAO.99Jb 모델과는 다소 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 정량적으로 비교해보면, CSR과 NAO.99Jb 모델의 RMS 차이는 6.5mm, CSR과 GOT 모델의 RMS 차이는 1.0mm이다. NAO.99Jb 모델이 다른 모델과 큰 차이를 보이는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 NAO.99Jb 모델은 일본과 한국의 조위관측소 자료를 이용한 국지모델이기 때

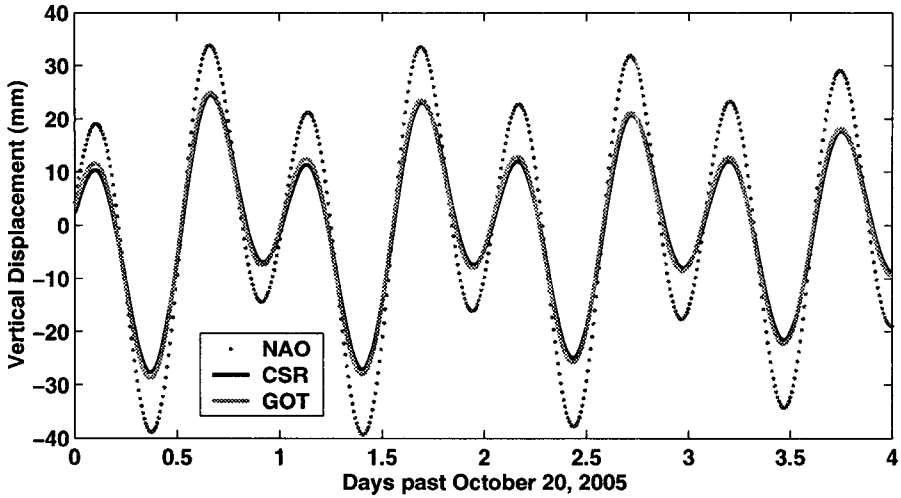


그림 1. ICNW 조위관측소 OTL 지각변위 모델 비교.

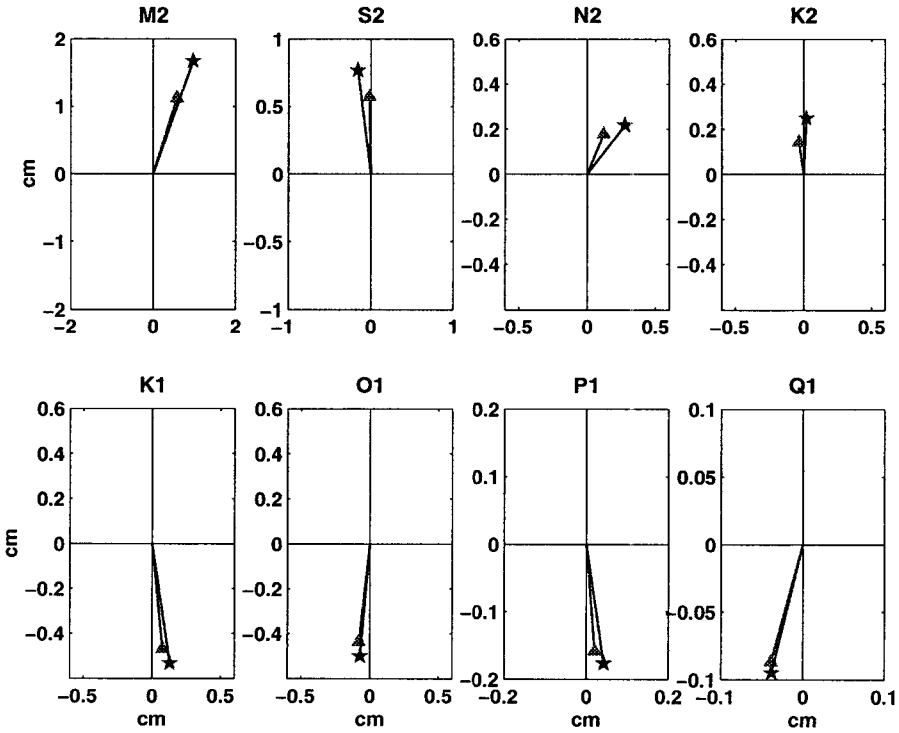


그림 2. phasor를 이용한 ICNW 조위관측소 OTL 지각변위 모델 8개 분조 비교(★: NAO.99Jb, ▲: CSR/GOT).

표 3. GPS 상시관측소 세 곳에서의 해양조석모델 차이 비교.

Site	Location			M ₂ (mm)	RMS Differences (mm)		
	위치	경도(°E)	위도(°N)		CSR-NAO	NAO-GOT	GOT-CSR
ICNW	대한민국 인천	126.5921	37.4520	19.3	5.8	5.3	0.6
USNA	미국 동해안	283.5206	38.9834	8.56	0.7	0.9	0.5
BRST	프랑스 서해안	355.5034	48.3805	40.6	1.3	0.5	1.1

문이다. 전지구모델과 국지모델의 차이는 사용된 격자의 해상도로 설명할 수 있다. CSR과 GOT 모델은 격자해상도가 0.5°이지만, NAO.99Jb의 해상도는 5' (= 1/12°)으로 한반도와 일본 인근 지역을 보다 조밀하게 격자화했다.

앞서 언급한 세 가지 모델의 8개 분조의 진폭과 위상을 개별적으로 비교하기 위하여 각 분조를 phasor로 그림 2에 나타내었다. phasor는 사인함수(sinusoidal function)의 진폭과 위상 정보를 나타내는 복소수(complex number)로, 조석의 각 분조를 phasor로 표현할 경우 그 특성을 시각적으로 쉽게 파악할 수 있다. 세 모델 중 GOT와 CSR 모델은 진폭과 위상이 동일한 값을 가지고 있어 삼각형 1개로 표현하였고, NAO.99Jb 모델은 별 모양으로 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 M₂ 분조의 경우 NAO.99Jb와 CSR 모델의 위상은 큰 차이가 없지만 진폭에서는 그림 1과 같이 NAO.99Jb 모델의 진폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 나머지 반일주조 분조 3개(S₂, N₂, K₂)에서는 진폭과 위상 모두 차이가 나는데, 특히 위상은 약 10-20°의 차이가 발생하였다. 그러나 일주조 분조 4개(K₁, O₁, P₁, Q₁)의 진폭과 위상은 큰 차이를 보이지 않는다.

NAO.99Jb 모델이 일본과 한국의 조위관측 자료를 포함한 국지모델이기 때문에 CSR이나 GOT 모델과 큰 차이를 보이고 있다는 사실을 입증하기 위해 미국과 프랑스의 GPS 관측소 두 지점을 선택하여 세 모델간의 차이를 비교하였다. 그 결과를 조석에 가장 큰 영향을 미치는 M₂ 분조의 진폭과 같이 표 3에 정리하였다. 표 3의 비교에는 그림 1과 마찬가지로 총 8개의 분조를 사용하였으며, 기간은 2006년 1월 1일부터 30일 동안이다. 표 3에서 USNA는 미국 동해안 Annapolis시 미국해군사관학교(United States Naval Academy)에 위치한 관측소이며, BRST는 프랑스 서해안 Brest에 설치된 관측소이다. OTL 지각변위는 대륙과 반도의 동해안이 서해안에 비해 훨씬 그 크기가 작으며, 프랑스 서해안은 전 세계적으로 가장 높은 OTL 지각변위를 나타내는 곳 중의 하나로 알려져 있다. 이러한 이유들로 인해 USNA의 M₂ 분조 진폭이 1cm 이하인 반면, BRST의 M₂ 분조 진폭은 약 4cm 정도로 나타난다. 표 3을 보면 ICNW에서는 NAO.99Jb 모델과 나머지 두 모델의 RMS 차이가 5.3mm 이상인 반면, USNA와 BRST에서는 모든 모델이 1.3mm 이하의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 NAO.99b 전지구모델과 GOT/CSR 전지구모델의 차이는 크지 않으며, 한반도 지역의 연구에는 한국의 조위관측 자료가 반영된 NAO.99Jb 모델이 적절하다는 판단으로 이 연구의 나머지 부분은 모두 NAO.99Jb 모델을 사용하였다.

3. 해양조석하중(OTL) 지각변위 분석

국내 설치 예정인 3개 VLBI 천문대 주변지역의 OTL 지각변위를 분석하고, 그 영향을 평가하였다. 그리고 인천 조위관측소에 설치된 GPS 상시관측소에서의 OTL 지각변위 예측치와 실제 GPS 관측결과를 비교한 뒤 OTL 보정이 GPS 자료처리에 미치는 영향을 분석하였다.

표 4. VLBI 천문대에 인접한 GPS 상시관측소의 명칭, 위치, 그리고 M_2 진폭.

VLBI Site	Nearby GPS Site		Location		M_2 (mm)
	명칭	소재지	경도(°E)	위도(°N)	
연세대학교	SKMA	서울시 기상청	126.9180	37.4935	9.0
울산대학교	WOLS	울산시 동구청	129.4173	35.5057	6.3
탐라대학교	JEJU	탐라대학교	126.4622	33.2883	11.1

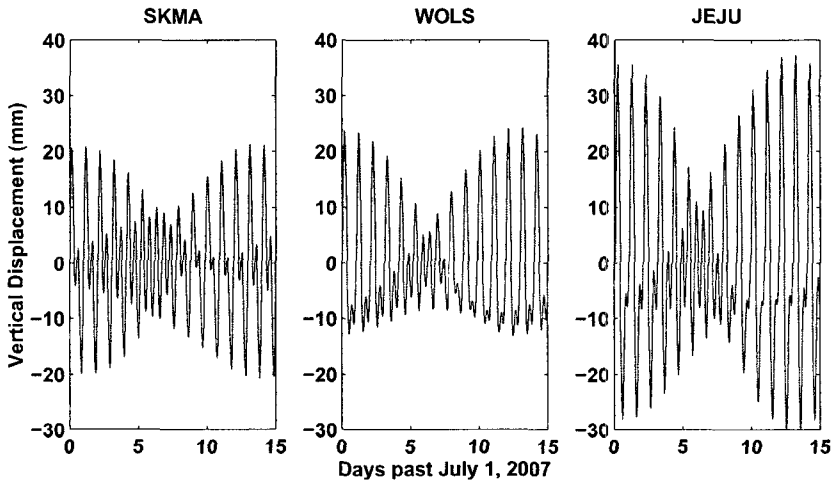


그림 3. 서울, 울산, 제주 VLBI 천문대의 OTL 지각변위 예측.

3.1 VLBI 천문대 OTL 지각변위 예측

한국천문연구원은 현재 2008년 완공을 목표로 서울, 울산, 서귀포 등 세 곳에 VLBI 천문대를 건설하고 있다. 전파천문학에서 요구하는 정확한 관측결과와 2-3mm 수준의 측지 VLBI 측위 정확도를 고려할 때, VLBI 천문대가 설치되는 지역의 OTL 지각변위 보정을 위한 정확한 모델이 필요한 실정이다. 특히 서울 천문대는 서해안에 인접하고, 울산 천문대는 동해안에 설치되기 때문에 OTL 지각변위가 상이하게 나타날 것이다. 그리고 서귀포 천문대는 제주도 남단에 위치하고 있기 때문에 2-3cm 이상의 OTL 지각변위가 발생할 것으로 예상되었다. 이 연구에서는 GOTIC2 프로그램에 11개 분조(표 1)를 사용하여 이들 3개 VLBI 천문대와 인접한 GPS 상시관측소에서 발생하는 OTL 지각변위를 예측하였다.

VLBI 천문대의 예정위치는 연세대학교, 울산대학교, 그리고 탐라대학교이다. 탐라대학교 VLBI 천문대에서의 OTL 지각변위 예측에는 탐라대학교 구내에 설치된 천문연구원의 GPS 상시관측소 JEJU의 좌표를 사용하였다(표 4). 그러나 연세대학교와 울산대학교에 설치될 VLBI 천문대는 정확한 좌표를 알 수 없기 때문에 서울 기상청 본청에 설치된 천문연구원 GPS 관측소(SKMA)와 울산광역시 동구청에 위치한 행정자치부 GPS 관측소(WOLS)의 좌표를 사용해 OTL 지각변위를 계산하였다. 표 4에 나타낸 바와 같이 OTL의 최대 성분인 M_2 분조의 진폭은 JEJU에서 11.1mm로 가장 높으며, 동해안에 위치한 WOLS에서 가장 낮은 6.3mm이다.

그림 3은 표 4에 나타낸 3개 천문대에서 발생하는 OTL 지각변위를 11개 분조를 이용해 2007년 7월 1일부터 15일간 예측한 결과를 보여주고 있다. 그림 3의 첫 번째 그래프를 보면 SKMA 관측소가 경기만을 기준으로 내륙으로 수십 km 떨어져 있음에도 불구하고 약 2cm 진폭의 지각변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 동해안에 위치하고 있는 WOLS에서는 예상대로 SKMA보다 작은 크기의 지각변위가 발생하는 것으로 예측되었다. 그러나 탐라대학교에 위치한 JEJU의 경우에는 그 변동폭이 SKMA에 비해 약 1.5배 정도 크게 나타난다. 이는 제주도 인근에서의 해양조석 분조의 크기가 표 4의 M_2 진폭에서 보는 것처럼 다른 지역에 비해 상대적으로 높기 때문이다.

3.2 인천 조위관측소 OTL 지각변위 분석

GOTIC2 프로그램으로 예측한 OTL 지각변위를 GPS 관측결과와 비교하는 연구는 국립해양조사원이 인천 조위관측소에 설치한 GPS 상시관측소 ICNW를 그 대상으로 하였다. 국립해양조사원은 국가수직기준면 모니터링망 구축사업의 일환으로 인천항 조위관측소와 제주항 조위관측소에 GPS 상시관측소를 설치해 지각의 수직변위를 조사하고 이를 통해 조위관측 자료에 포함된 지각움직임을 보정하는 연구를 진행하고 있다(이윤균 외 2005). 이 연구에서는 인천 조위관측소를 대상으로 NAO.99Jb 모델을 적용한 GOTIC2 프로그램 결과와 GPS 자료 처리 결과를 비교하였다. GPS 자료 처리에는 고정밀 과학기술용 GPS 자료처리 프로그램인 GIPSY(Webb & Zumberge 1993)를 사용하였으며, 수직좌표 변동을 모니터링하기 위해 10분마다 좌표를 산출하고 이를 OTL 지각변위 예측치와 비교하는 방법을 채택하였다.

GIPSY를 이용해 GPS 자료를 처리할 때 OTL에 의해 발생하는 주기적인 지각변동은 매 관측시각마다 보정할 수 있다. 즉 해당 관측소 위치에서의 11개 분조를 GIPSY에 적용하면 각 관측 시각의 3차원 OTL 지각변위를 보정할 수 있다. 그러므로 OTL 지각변위 보정 적용여부를 제외하고 동일한 방법으로 산출한 두 좌표시계열을 비교했을 때 좌표 추정치의 차이는 곧 OTL 지각변위의 영향이라 할 수 있다. 이러한 비교를 통해 GIPSY 자료 처리과정에서 OTL 지각변위 보정이 적절히 이루어졌는지 알 수 있다.

이 연구에는 2006년 1월 1일에서 9일까지 9일 동안의 ICNW 관측소 자료를 사용하였다. 그림 4에 실선으로 나타낸 것은 NAO.99Jb 모델을 적용하여 GOTIC2 프로그램으로 OTL 수직방향 지각변위를 예측한 결과이다. 그리고 점(●)은 10분 간격으로 ICNW 관측소 수직좌표를 산출할 때, OTL 지각변위 보정을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 수직좌표 차이를 나타낸 것이다. 날짜 경계선에서 GPS 좌표가 연결되지 않는 것은 GIPSY 자료 처리 시 관측소 좌표를 random walk process로 추정하였기 때문이다(하지현 외 2005). 날짜 경계선에서 발생하는 점프현상을 제외할 경우 두 시계열이 매우 잘 일치하고 있기 때문에 GIPSY 자료 처리에서 OTL 지각변위 보정 과정이 제대로 적용되고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 4의 피크(peak) 부분에서는 주기적으로 GPS 수직좌표의 차이가 OTL 지각변위 예측치보다 다소 그 크기가 작게 나타나는 현상이 발생한다. 그 이유는 GPS 자료 처리에서 OTL 지각변위가 급격히 변동하는 부분에서 좌표추정치에 반영되어야 할 변동량의 일부분이 다른 추정 매개변수로 흡수되기 때문인 것으로 추측된다.

3.3 OTL 보정과 ZWD의 상관관계

앞서 3.2절에서 OTL 지각변위 보정 적용여부에 따른 수직좌표 차이를 살펴보았다. 3.3절에서는 10분 간격이 아니라 일반적인 GPS 자료처리 방식인 24시간 단위로 GPS 자료를 처리하고 OTL 지

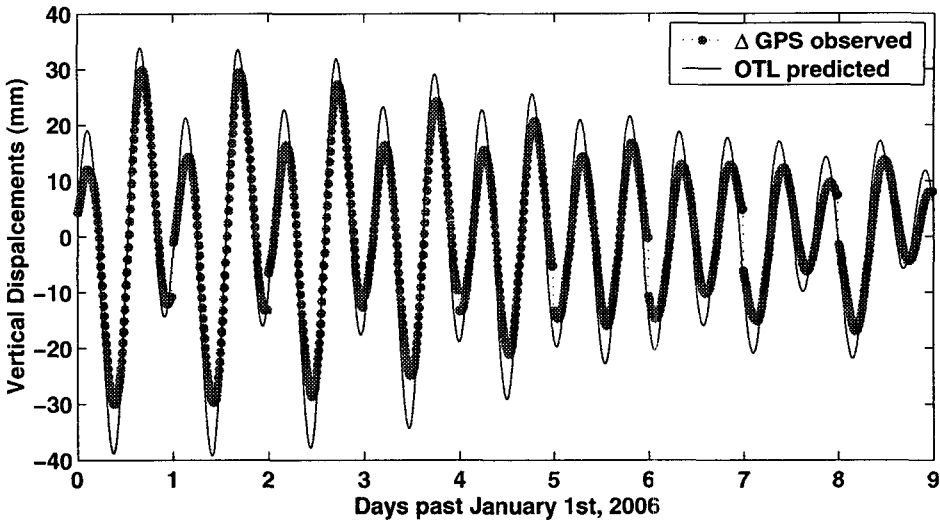


그림 4. OTL 지각변위 보정 적용 여부에 따른 GPS 수직좌표 차이와 OTL 지각변위 예측치 비교.

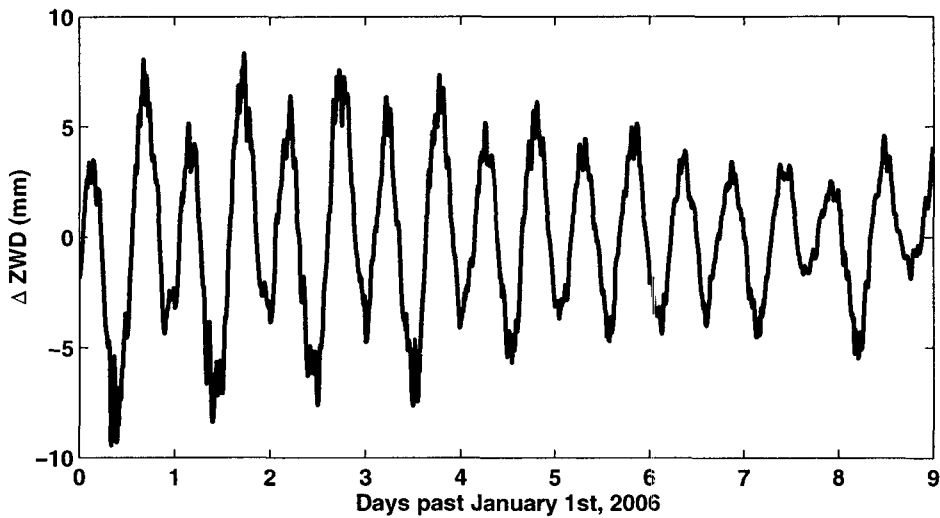


그림 5. OTL 지각변위 보정 적용여부에 따른 ZWD 차이.

각변위 보정 적용 여부에 따른 ZWD(Zenith Wet Delay) 차이를 분석하였다. ZWD란 GPS 신호가 대류권을 통과하면서 대기 중의 수증기에 의해 발생하는 신호지연(signal delay) 시간을 거리로 환산하여 연직방향으로 나타내는 것이다. GPS 관측으로 ZWD를 결정하면 대기중의 수증기량을 파악할 수 있어 기후연구와 전산일기예보 등에 활용할 수 있다(하지현 외 2006). 그림 5는 3.2절과 동일

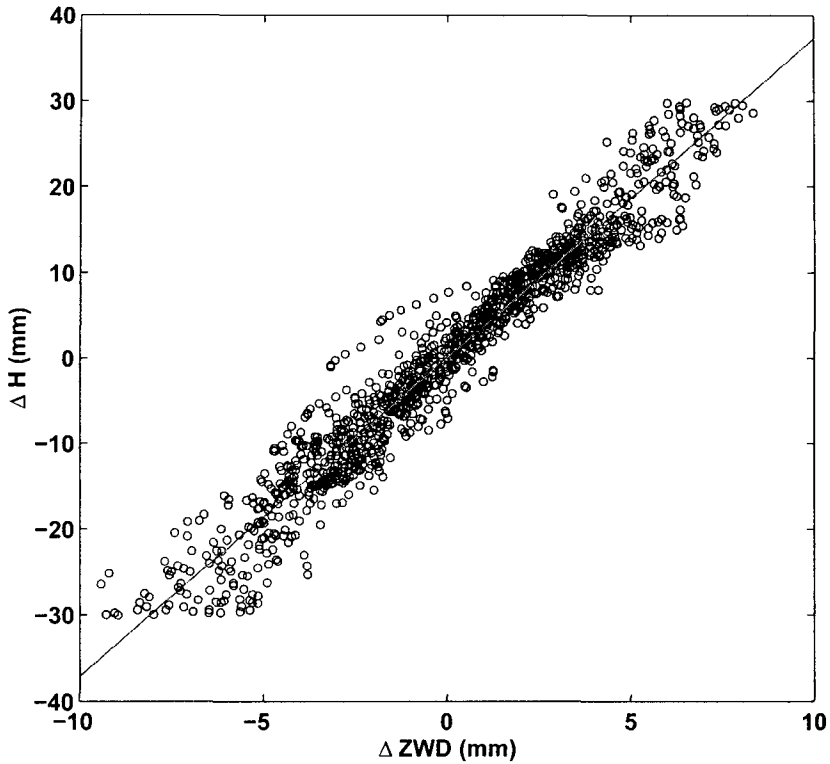


그림 6. OTL 지각변위 보정 적용여부에 따른 ZWD 차이와 GPS 수직좌표 차이의 상관관계.

한 기간의 ICNW 관측소 자료를 24시간 단위로 처리할 때 OTL 지각변위 적용여부에 따른 ZWD 차이(ΔZWD)를 10분 간격 시계열로 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 ΔZWD 가 그림 4에 실선으로 나타낸 OTL 지각변위와 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 OTL 지각변위의 크기가 ΔZWD 보다 약 4배 정도 크다. 이를 정량적으로 분석하기 위해 OTL 지각변위와 ΔZWD 수치간의 상관관계를 배율인자(scale factor)로 표현할 필요가 있다.

그림 6은 가로축에 ΔZWD , 세로축에 OTL 지각변위 보정여부에 따른 수직좌표 차이 ΔH 를 나타내었다. ΔZWD 와 ΔH 의 상관계수는 0.97로 매우 높으며, 실선으로 표시한 선형함수를 곡선점합(curve fitting)한 뒤 그 기울기인 3.72로 배율인자를 결정하였다. 이 경우 3.72mm의 ΔH 는 대략 1mm의 ΔZWD 에 해당한다. 즉 OTL 지각변위가 2.2cm라면 대략 6mm 정도의 ZWD 오차가 발생하는 것이다. 전산일기예보의 입력 매개변수로 사용되는 가강수량은 ZWD 값의 약 1/6에 해당하므로 OTL 지각변위 2.2cm는 가강수량 오차 1mm로 환산된다(하지현 외 2006). 전산일기예보에 요구되는 GPS 가강수량의 정확도가 1-2mm 수준이므로, OTL 지각변위가 2cm 이상 발생하는 서해안의 경우 OTL 지각변위를 보정하지 않을 경우 가강수량 결정 정확도를 떨어뜨리는 영향을 미칠 수 있다. 따라서 가강수량 결정에 GPS를 활용하기 위해서는 GPS 자료 처리에 OTL 지각변위를 보정하는 것이 바람직하며, 더 높은 정확도를 달성하기 위해서는 보다 정확한 해양조석 모델이 개발되어야 한다.

4. 결 론

OTL과 같은 조석현상에 의한 지각변위 보정은 우주측지 기술의 정밀도를 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 이 논문에서는 먼저 한반도 지역의 OTL 영향을 평가하고, 이를 보정하기 위한 해양조석 모델간의 차이를 비교하였다. 인천 조위관측소를 대상으로 8개 분조에 대하여 NAO.99Jb, GOT, 그리고 CSR 모델을 비교한 결과 GOT와 CSR 모델은 1.0mm의 RMS 차이를 나타낸 반면 NAO.99Jb 모델과 나머지 두 모델은 6.5mm의 RMS 차이를 나타내었다. 이러한 현상은 NAO.99Jb 모델에 한반도와 일본지역의 조위관측소 자료가 사용되어 한반도와 일본 연안에서의 NAO.99Jb 모델의 격자크기가 상대적으로 조밀하기 때문에 발생한 것이다.

2008년 완공을 목표로 진행되고 있는 서울과 울산 그리고 서귀포의 VLBI 천문대를 대상으로 OTL 지각변위를 분석한 결과, 세 천문대의 지각변위 진폭과 주기의 차이를 확인 할 수 있었다. VLBI 천문대에 인접한 GPS 상시관측소 좌표를 사용하여 M_2 분조를 비교할 때, 서울이 9.0mm, 울산이 6.3mm 그리고 서귀포가 11.1mm로 다르게 나타났다. 이와 같은 결과는 mm 수준의 정밀도를 달성해야 하는 우주측지 기술에 조석현상을 보정하지 않거나 OTL 지각변위의 크기가 다른 관측소들로 관측망을 구성할 경우 무시할 수 없는 크기의 오차가 발생할 수 있음을 입증한다. 또한 인천 조위관측소에 설치된 GPS 상시관측소를 대상으로 분석한 결과, OTL 지각변위를 고려하지 않을 경우 ~3cm의 수직변위 오차가 발생하며 이는 1mm 이상의 가강수량 오차로 직결되는 것을 확인하였다. 따라서 우주측지 기술을 활용함에 있어 한반도 지역에 대한 정확한 해양조석 모델을 사용하여 OTL 변위를 보정해야 함은 물론, GPS 관측을 이용하여 해양조석 모델을 개선하기 위한 노력이 계속되어야 할 것이다.

감사의 글: 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다. 두 분 심사위원의 세심한 검토에 감사드립니다.

참고문헌

- 박관동, 임형철 2004, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집 (서울: 한국측량학회), p.33
- 이운균, 김용환, 심상진, 문진호, 김혜향, 임영훈, 남수용, 김종인, 이효진, 김평중, 박창욱 2005, 국가 수직기준면 모니터링망 구축 결과보고서 (인천: 국립해양조사원)
- 하지현, 박관동, 이창복 2005, 한국우주과학회지, 22, 491
- 하지현, 박관동, 허복행 2006, 한국우주과학회지, 23, 373
- Agnew, D. C. 1997, JGR, 102, 5109
- Allinson, C. R., Clarke, P. J., Edwards, S. J., King, M. A., Baker, T. F., & Cruddace, P. R. 2004, Geophys. Res. Lett., 31, L15603, doi:10.1029/2004GL020538
- Doodson, A. T. 1928, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 227, 223
- Dragert, H., James, T. S., & Lambert, A. 2000, Geophys. Res. Lett., 27, 2045
- Lee, H. C. & Moon, W. M. 2001, Geosciences J., 5, 319
- Matsumoto, K., Sato, T. Takanezawa, T., & Ooe, M. 2001, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243
- McCarthy, D. D. 1996. IERS Technical Note 21
- Pagiatakis, S. D. 1992, Manuscripta Geodaetica, 17, 315

- Penna, N. T., King, M. A., & Stewart, M. P. 2007, *JGR*, 112, B02402, doi:10.1029/2005JB004047
- Scherneck, H. G. 1991, *Geophys. J. Int.*, 106, 677
- Scherneck, H. G. & Bos, M. S. 2002, in *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, eds. N. R. Vandenberg & K. D. Baver (Washington, D.C.: NASA), p.205
- Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, *An introduction to the GIPSY/OASIS-II* (Pasadena: JPL)