

GPS 정밀단독측위기법을 이용한 해양조석하중 분조성분 검출

원지혜[†], 박관동
인하대학교 지리정보공학과

Detection of Ocean Tide Loading Constituents Based on Precise Point Positioning by GPS

Jihye Won[†] and Kwan-Dong Park

Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
E-mail: jhwon1021@inha.edu

(Received November 2, 2009; Accepted November 16, 2009)

요 약

이 연구에서는 GPS(Global Positioning System) 정밀단독측위 기법을 이용하여 해양조석하중(Ocean Tide Loading, OTL) 분조성분을 검출하고, 그 결과를 조석모델에 의한 예측값과 비교하였다. 고정밀 GPS 자료처리 프로그램인 GIPSY를 사용하여 인천, 서산, 제주 GPS 상시관측소를 대상으로 10분 단위의 수직좌표 시계열을 산출하였으며, 시계열의 조석조화분해를 통해 OTL 지각변위를 일으키는 주요 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 진폭과 위상을 검출하였다. 조석모델의 예측값을 기준으로 GPS로 산출한 OTL 분조의 정확도를 평가한 결과 진폭은 제주관측소, 위상은 인천관측소에서 가장 높은 정확도를 나타내었다. 주요 11개 분조 중 최대비율을 차지하는 M_2 분조의 경우 진폭성분에서 평균 23.8%의 상대오차를 보였다.

Abstract

In this study, the Ocean Tide Loading (OTL) constituents were detected by the Precise Point Positioning (PPP) technique using GPS. Then, the GPS estimates of OTL constituents were compared with the predictions of the ocean tide models. We picked three permanent GPS stations as test sites and they are ICNW, SEOS, and CJUN. To detect the OTL constituents using GPS, we created vertical coordinate time series at 10-minute intervals using the PPP approach implemented in the GIPSY software. Through the tidal harmonic analysis of this height time series, the four major constituents (M_2, S_2, K_1, O_1) were determined. The amplitude obtained from the GPS height time series of the OTL constituents showed best match with the model predictions at CJUN, while the phase showed closest match at ICNW. The amplitude accuracy of the M_2 , which is the dominant factor out of the 11 major constituents, was 24.8% on average.

Keywords: GPS, ocean tide loading, FES2004, NAO.99Jb, tidal constituent

[†]corresponding author

1. 서 론

국제지구자전국 IERS 협약(International Earth rotation and Reference systems Service Conventions)은 우주측지 기술의 정확도 향상을 위해 고체지구조석(Solid Earth Tide)과 해양조석하중(Ocean Tide Loading, OTL)에 의한 지각변위를 보정하도록 명시하고 있다(McCarthy & Petit 2003). 고체지구조석은 일주기와 반일주기 성분에서 최대 ~40cm에 이르는 변위가 발생하며(Lambeck 1988), 모델을 이용할 경우 진폭 2mm 수준으로 예측 가능하다(Baker et al. 1991). 그러나 OTL 지각변위의 경우 고체지구조석보다 변위의 크기는 작으나 해양조석현상이 지역적으로 다르기 때문에 정확하게 예측하는 것이 어려운 실정이다. OTL 지각변위를 보정하는 방법으로는 해양조석모델을 이용한 컨볼루션(convolution) 적분법이 대표적이다(박관동 외 2007). 그러나 해양조석모델은 수심이 1km 이상인 대양에서는 매우 정확하지만, 수심이 얇은 연안과 복잡한 지형일수록 정확도가 낮아지는 것으로 알려져 있다(Shum et al. 1997). 한반도 서해안의 경우 인천만과 경기만의 조차는 세계에서 두 번째로 큰 값으로 알려져 있을 뿐만 아니라(Lee & Moon 2001), 리아스(rias)식 해안의 복잡한 지형으로 구성되어 해양조석모델을 이용한 OTL 지각변위의 보정이 어려울 것으로 예측된다.

해양조석모델의 부정확성에서 기인하는 OTL 지각변위 예측오차를 보정하기 위해 우주측지 기술을 이용하여 OTL 분조성분을 직접 검출하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. Sovers(1994)는 최초로 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 자료를 이용하여 분조성분의 진폭을 추정하였으며, 이후 Scherneck et al.(2000)은 GPS 단독측위방식으로 OTL 분조성분의 검출이 가능함을 확인하였다. Schenewerk et al.(2001)은 GPS 상대측위방식으로 OTL 분조성분 검출을 시도하여 지구모형이나 조석모델을 사용하지 않고, OTL에 의한 지각변위를 검출할 수 있음을 증명하였다.

GPS를 이용한 OTL 분조성분의 검출은 자료처리기법에 따라 크게 두 가지로 구분된다. Bernese 프로그램(Khan & Tscherning 2001) 또는 GAMIT 프로그램(Vergnolle et al. 2008)을 이용한 상대측위기법과 GIPSY 프로그램(Thomas et al. 2007, King 2006)을 이용한 단독측위기법이 대표적이다. 이중 단독측위기법에 의한 분조성분의 검출은 OTL 지각변위의 절대적인 양을 검출하기 때문에 상대처리기법을 이용한 방법보다 활용성이 높을 것으로 판단된다. 국내에서는 윤홍식과 이동하(2003)가 GIPSY를 이용한 상대측위 방식으로 M_2 , N_2 분조성분을 검출하여 일본과 한반도 주변의 지역모델인 NAO.99Jb의 예측값과 비교한 연구사례가 있다. 그러나 분조의 개수가 제한적이었으며, 전지구모델을 이용한 정확도 평가가 이루어지지 않았다.

이 연구에서는 한반도에 위치한 GPS 상시관측소를 대상으로 정밀단독측위기법을 적용하여 OTL 수직지각변위를 일으키는 주요 4대 분조의 진폭과 위상을 검출하였다. 검출된 분조성분은 최신 조석모델인 FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델의 예측 값을 기준으로 검출 정확도를 평가하였다.

2. GPS 자료 처리

2.1 분석대상 선정

한반도는 수심이 깊고 해안선이 단조로운 동해안에서 최대 0.7m의 조차가 발생하며, 남해안에서는 최대 4.5m의 조차가 발생한다. 그러나 수심이 얇고 해안선이 복잡한 서해안에서는 최대 10m의 조

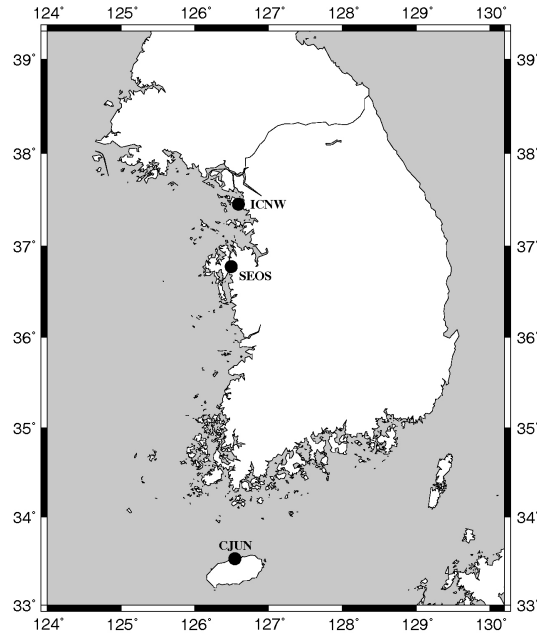


그림 1. 분석대상 GPS 상시관측소의 위치(인천, 서산, 제주).

표 1. GPS 상시관측소 좌표 및 분석기간.

SITE	Latitude(°N)	Longitude(°E)	Height(m)	Start Date	Days
ICNW	37.4520	126.5921	35.295	January 17, 2006	83
SEOS	36.7764	126.4942	49.335	January 1, 2006	33
CJUN	33.5275	126.5432	46.285	April 1, 2007	52

차가 발생한다(김명규 2007). 특히 인천만과 경기만의 조차는 세계에서 두 번째로 큰 값으로 알려져 있으며(Lee & Moon 2001), 황해의 M_2 분조는 전체 조석현상의 65%를 차지하는 것으로 보고된 바 있다(Choi 1980). 따라서 이 연구에서는 국내 약 90여개 GPS 상시관측소 중 조석현상이 크게 나타나는 서해안에 위치한 2개 GPS 상시관측소와 제주 해안에 위치한 1개 GPS 상시관측소를 대상으로 OTL 지각변위 분조성분을 검출하였다.

연구대상 관측소로는 인천(ICNW), 서산(SEOS) 그리고 제주(CJUN)를 선정하였다(그림 1). 인천과 제주관측소는 조위관측소의 수직기준면 모니터링을 위해 국립해양조사원에서 운영하고 있으며, 서해안의 태안반도 부근에 위치한 서산관측소는 서산 기상관측소에 설치되어, 측량 기준점 관리 및 응용분야 지원사업의 일환으로 국토지리정보원에서 운영하고 있다. 그림 1을 통해 인천과 서산 관측소가 위치한 서해안은 제주 관측소가 위치한 제주 해안보다 복잡한 해안선으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

표 1은 연구에 사용된 GPS 상시관측소 위치와 자료의 분석기간을 나타낸 것이다. 자료 처리를 통해 산출된 GPS 수직좌표 시계열은 조석조화분해를 통해 OTL 분조성분으로 검출된다. 정확한 검출 결과를 획득하기 위해서는 조석조화분해 시 결측 구간이 없는 연속된 GPS 수직좌표 시계열을 사

용해야 한다. 따라서 이 연구에서는 GPS로부터 최종 산출된 10분 간격의 시계열 중 자료의 누락이 없는 표 1의 기간을 조석조화분해에 사용하였다.

2.2 GPS 자료 처리기법

GPS를 이용한 OTL 분조성분의 검출을 위해 GIPSY 프로그램의 키네매틱(kinematic) 기법을 이용하여 10분 단위의 수직좌표 시계열을 산출하였다. GPS 위성의 궤도력과 시계오차는 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 non-fiducial 산출물을 사용하였다. OTL 지각변위를 제외하고 고체지구조석과 극조석 등의 고체지구운동에 관련된 보정모델은 IERS2003을 사용하였고, GPS 안테나의 위상중심 오프셋(phase center offset) 보정에는 절대보정모델을 적용하였다. 자료 처리를 위한 임계 고도각 설정은 10° 를 적용하였으며, 관측소 움직임에 대한 random walk sigma는 $24.0\text{mm}/\sqrt{h}$ 를 적용하였다. 대류권 오차는 습윤지연과 건조지연으로 구분한 뒤 각각에 대한 선형적 수치로 초기값을 설정한 다음 잔여오차를 random walk process로 추정하였다(Webb & Zumberge 1993). 잔여오차 추정에 사용되는 random walk sigma는 $7.2\text{mm}/\sqrt{h}$ 를 적용하였다. 시선방향과 천정방향의 대류권 지연량 변환에는 Niell 사상함수를 사용하였으며, 방위각에 따른 대류권 굴절률 변동량은 추정하지 않았다.

GIPSY를 이용한 키네매틱 기법에서 관측소 좌표변동과 대류권 지연량 추정에 사용되는 random walk sigma는 각각 $30.0\text{mm}/\sqrt{h}$ 와 $10.2\text{mm}/\sqrt{h}$ 의 기본 값으로 설정되어 있다. 사용자는 자료 처리 시 관측환경을 고려하여 임의로 값을 조절할 수 있으며, 이 연구에서는 경험적 수치를 적용하였다. 자료 처리 시 관측소 움직임에 대한 random walk sigma는 낮게 설정할수록 좌표 정밀도가 높아진다. 그러나 너무 작은 값을 설정할 경우 일부 분조의 진폭성분이 작게 검출되는 현상이 발생한다.

JPL의 non-fiducial 위성좌표를 이용하여 산출된 3차원 좌표시계열은 ITRF 좌표계로 변환이 필요하다. JPL은 x-file 형식으로 매일의 좌표변환계수를 제공한다. ITRF 좌표계는 2006년 11월 6일을 기준으로 ITRF2000에서 ITRF2005로 변환되었기 때문에, 2006년 11월 이전의 자료를 사용한 인천과 서산은 ITRF2000으로 변환하였고, 2007년 자료를 이용한 제주는 ITRF2005로 변환하였다. GIPSY로부터 산출된 GPS 수직좌표 시계열은 그림 2에 나타내었다.

2.3 OTL 분조성분 검출

이 연구에서는 조석조화분해 프로그램인 T.TIDE(Rich et al. 2002)를 이용하여 ITRF 좌표계로 변환된 GPS 수직좌표시계열에서 OTL 분조성분의 진폭과 그리니치 본초자오선 기준의 위상을 검출하였다. GPS로부터 검출된 진폭과 위상은 FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델의 예측값을 이용하여 검출 정확도를 평가하였다. FES2004는 CODE IGS 분석센터에서 공식적으로 사용하고 있는 전지구모델이며(Schaer & Hugentobler 2006), NAO.99Jb는 일본과 한반도 주변의 지역모델이다(Matsumoto et al. 2000). FES2004는 FES(Finite Element Solution)계열의 가장 최신모델이며, TOPEX/Poseidon과 ERS-2 자료뿐만 아니라 조위관측자료가 동화기법(assimilation method)으로 적용되었다(Lyard et al. 2006). 그 격자 해상도는 $1/8^\circ$ 이다. NAO.99Jb는 한반도 64개 조위관측자료에서 추출된 4대 분조가 사용되었으며, 격자 해상도는 $1/12^\circ$ 이다(Matsumoto et al. 2000).

GPS를 이용한 OTL 분조성분 검출 결과를 해양조석모델을 이용한 예측 결과와 비교하기 위해 OTL 분조성분을 계산하는 두 개 프로그램을 사용하였다. FES2004 전지구모델은 M. S. Bos & H. -G. Scherneck이 운영하는 웹서비스(www.oso.chalmers.se/~loading/)를 이용하여 계산하였고,

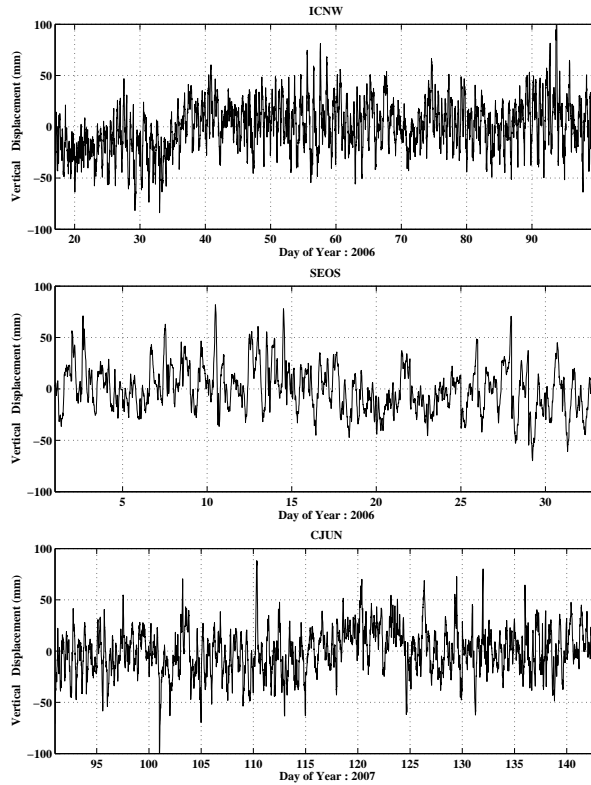


그림 2. GPS로 산출한 수직좌표시계열.

NAO.99Jb 지역모델은 GOTIC2(Matsumoto et al. 2001) 프로그램을 이용하여 계산하였다. OTL 예측 프로그램에 의한 차이는 미미한 것으로 알려져 있으므로(Scherneck & Bos 2002), 이 연구에서는 검출 결과의 정확도 평가 과정에서 예측 프로그램에 의한 차이는 고려하지 않았다.

3. 분조성분 검출 결과 비교 및 분석

3.1 조석모델에 의한 OTL 분조성분 예측

우주측지 기술에서 OTL 보정을 위해 대표적으로 사용되는 총 11개 분조성분을 FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델을 이용하여 예측한 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 $|\Delta|$ 는 두 모델 차이의 절댓값을 나타낸 것이며, 진폭차는 [mm], 위상차는 [$^{\circ}$] 단위로 나타내었다. 전지구모델과 지역모델의 경우 모두 M_2 분조에 의한 OTL 지각변위가 가장 크고, 모델간의 차이도 M_2 분조에서 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 전지구모델과 지역모델에 의한 진폭 차이는 인천의 M_2 분조에서 최대 3.5mm, 위상 차이는 서산의 K_2 분조에서 최대 36.7 $^{\circ}$ 가 발생하였다. 조석모델에 의한 차이는 인천, 서산의 반일분조 진폭성분에서 크게 나타났으며, NAO.99Jb로 예측한 진폭 값이 FES2004로 예측한 진폭 값보다 대체로 큰 것으로 나타났다.

조석모델을 이용하여 총 11개의 OTL 분조성분을 예측한 결과 주요 4개 분조에서 진폭 성분이 크

표 2. 조석모델에 의한 OTL 분조성분 예측결과(FES:FES2004, NAO:NAO.99Jb).

		인천(ICNW)			서산(SEOS)			제주(CJUN)		
		FES	NAO	\Delta	FES	NAO	\Delta	FES	NAO	\Delta
Amplitude [mm]	M_2	15.9	19.4	3.5	11.5	12.9	1.4	11.3	11.7	0.4
	S_2	5.7	7.8	2.1	4.6	5.4	0.8	4.7	4.7	0.0
	N_2	2.0	3.5	1.5	1.4	2.2	0.8	3.0	2.8	0.2
	K_2	0.5	2.5	2.0	0.7	1.7	1.0	1.7	1.2	0.5
	K_1	5.0	5.5	0.5	5.8	5.9	0.1	10.9	10.7	0.2
	O_1	4.5	5.0	0.5	5.1	5.2	0.1	8.4	8.5	0.1
	P_1	1.6	1.8	0.2	1.8	1.9	0.1	3.6	3.6	0.0
	Q_1	0.8	1.0	0.2	0.9	1.1	0.2	1.7	1.7	0.0
	M_f	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0
	M_m	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
	S_{sa}	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	Phase [°]	M_2	59.6	60.0	0.4	47.9	45.9	2.0	194.4	195.6
S_2		104.8	101.5	3.3	88.8	86.5	2.3	195.7	220.4	24.7
N_2		46.9	38.4	8.5	44.4	29.3	15.1	187.8	186.8	1.0
K_2		120.7	85.4	35.3	112.2	75.5	36.7	229.4	218.6	10.8
K_1		270.7	283.8	13.1	270.5	275.7	5.2	254.8	257.0	2.2
O_1		254.6	261.9	7.3	253.0	256.1	3.1	238.0	238.7	0.7
P_1		268.9	283.6	14.7	269.9	275.6	5.7	256.2	255.4	0.8
Q_1		235.4	248.0	12.6	235.9	244.9	9.0	227.0	232.0	5.0
M_f		0.6	4.3	3.7	359.0	3.3	4.3	337.6	347.7	10.1
M_m		342.0	343.4	1.4	335.7	338.4	2.7	249.5	273.8	24.3
S_{sa}		352.2	350.3	1.9	347.2	344.5	2.7	191.5	194.8	3.3

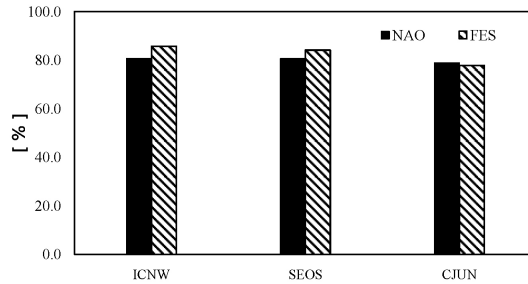


그림 3. 11개 분조에 대한 주요 4대 분조의 비율.

게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. M_2, S_2, K_1 그리고 O_1 분조는 한반도 수직기준면 결정에 이용되는 주요 4대 분조로 한반도 주변의 조석현상을 대표하는 분조성분이다. 그림 3은 주요 4대 분조의 진폭 합을 전체 11개 분조의 진폭 합에 대한 백분율로 나타낸 것이다. M_2, S_2, K_1 그리고 O_1 분조는 전체 11개 분조의 최대 진폭에 대하여 약 80%를 차지한다. 이는 한반도의 서해안과 남해안에서 GPS를 이용하여 정확하게 OTL 4대 분조성분을 예측할 경우 OTL 지각변위의 약 80%를 보정할 수 있음을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 주요 4대 분조에 대해서만 GPS 기반 OTL 분조성분 검출을 시도하고, 조석모델의 예측 결과와 비교하여 검출 정확도를 평가하였다.

3.2 GPS에 의한 OTL 분조성분 검출

표 3은 인천, 서산 그리고 제주 관측소의 GPS로부터 검출된 OTL 분조성분을 나타낸 것이다. 이 표를 표 2와 비교해 보면, 세 관측소에서 모두 GPS로 검출한 OTL 분조성분의 진폭과 위상이

표 3. GPS를 이용한 OTL 분조성분 검출 결과.

	인천(ICNW)		서산(SEOS)		제주(CJUN)	
	amplitude [mm]	phase [°]	amplitude [mm]	phase [°]	amplitude [mm]	phase [°]
M_2	12.9	54.6	9.1	34.9	9.2	189.7
S_2	4.0	125.0	10.0	22.0	3.3	218.1
K_1	13.8	271.3	10.1	278.0	6.9	297.0
O_1	3.1	271.2	3.7	291.0	7.9	251.3

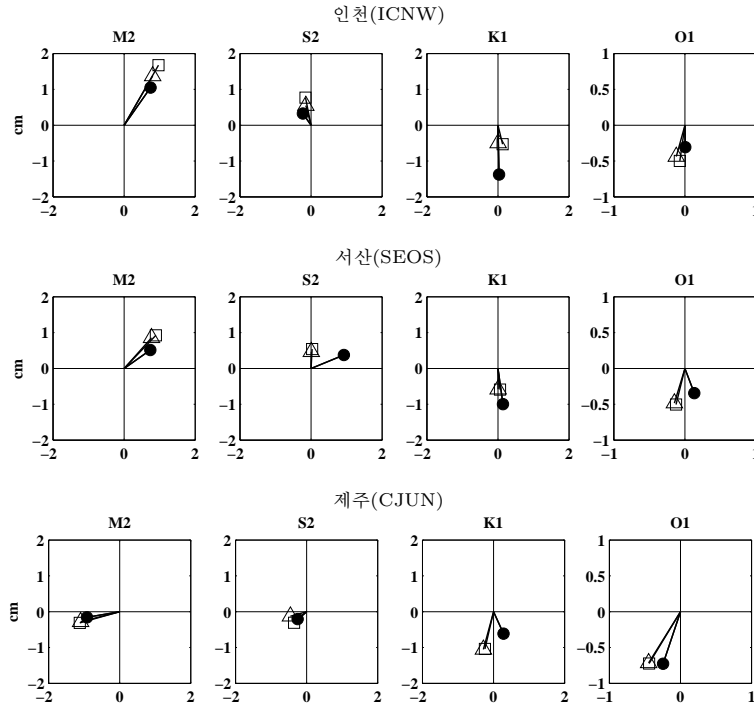


그림 4. 3개 관측소의 OTL 분조 phasor plot 비교: GPS(원), NAO.99Jb(사각형), FES2004(삼각형).

조석모델에 의한 예측값과 전반적으로 일치하나, 인천과 서산에서 K_1 분조의 진폭이 M_2 분조의 진폭보다 크게 검출되어 조석모델에 의한 예측결과와 차이가 있음을 알 수 있다. 선행연구(Khan & Scherneck 2003)에서도 GPS 위성의 공전주기(11.9660h)와 비슷한 주기를 갖는 K_2 분조(11.9672h)와 K_1 분조(23.9345h)는 주기적으로 반복되는 GPS 위성의 궤도오차와 다중경로오차의 영향으로 정확한 검출이 쉽지 않음을 지적한 사례가 있다. 그러나 제주 관측소의 경우 인천과 같은 기종의 GPS 안테나와 수신기를 사용하며, 데이터 처리 기법 또한 동일하게 적용되었음에도 불구하고, 약간의 위상 차이만 발생할 뿐 K_1 분조의 검출 결과가 양호한 것으로 나타났다. 이 연구에서는 3개 관측소의 분석 기간이 서로 다르다는 점과 관측환경의 상이성 등이 K_1 분조 검출에 추가적인 영향을 준 것으로 판단된다.

그림 4는 표 2와 표 3의 결과 중 주요 4대 분조의 진폭과 위상을 phasor plot으로 나타낸 것이다. phasor plot은 분조의 진폭과 위상을 효과적으로 표현할 수 있는 그래프이다. 진폭은 선분의 길이로

표 4. FES2004 기준 GPS 검출 결과의 오차 비교[단위 %].

	인천(ICNW)		서산(SEOS)		제주(CJUN)	
	ϵ_A	ϵ_ϕ	ϵ_A	ϵ_ϕ	ϵ_A	ϵ_ϕ
M_2	18.9	2.8	20.9	7.2	18.6	2.6
S_2	29.8	11.2	117.4	37.1	29.8	12.4
K_1	176.0	0.3	74.1	4.2	36.7	23.4
O_1	31.1	9.2	27.5	21.1	6.0	7.4
Average	64.0	5.9	60.0	17.40	22.8	11.4

나타내고, 위상은 3시를 기준으로(0°) 반시계 방향으로 표현한다. 그림 4에서 상대적으로 진폭의 크기가 작은 O_1 의 경우에는 M_2, S_2, K_1 과 달리 축의 범위를 -1에서 1까지 표시하였다. FES2004의 예측값은 삼각형으로, NAO.99Jb 모델의 예측값은 사각형으로 표시하였으며, GPS 검출 결과는 원으로 표시하였다.

그림 4를 통해 전지구모델과 지역모델의 예측결과는 대체로 일치하지만, 3.1절에서 설명한 바와 같이 인천의 반일분조성분에서 진폭 크기는 지역모델의 예측결과가 전지구모델의 예측결과보다 다소 큰 것을 확인할 수 있다. GPS 검출 결과 중 특히 M_2 분조는 모든 관측소에서 진폭과 위상 성분이 모델과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. M_2 분조는 주요 4대 분조를 이루는 구성요소로서 해양 조석 현상을 일으키는 가장 중요한 성분이다. M_2 분조가 주요 11개 분조에 대하여 차지하는 비율은 모델 예측결과를 기준으로 인천, 서산, 제주에서 각각 평균 42.5%, 35.5%, 25.4%이다. 따라서 GPS를 이용하여 M_2 분조성분을 정확히 검출할 경우 OTL 지각변위를 최대 42.5% 까지 보정할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 그림 4를 통해 인천의 K_1 분조는 진폭성분에서 모델과 비교적 차이가 크고, O_1 분조는 상대적으로 작은 진폭임에도 불구하고 모델과 비교적 잘 일치하는 것이 확인되었다. 서산에서는 S_2 분조가 진폭과 위상성분 모두 모델과 차이가 있고, K_1 분조의 경우 대체로 모델과 일치하는 것으로 나타났다. 마지막으로 제주의 경우 K_1 분조의 위상 차이를 제외하면 거의 모든 분조성분에서 모델 예측결과와 GPS 검출 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.3 검출 정확도 평가

GPS로부터 검출된 OTL 분조성분의 정확도 평가를 위해 조석모델의 예측결과를 기준으로 진폭과 위상의 오차를 평가하였다. 식 (1)은 진폭과 위상의 오차 산출에 사용된 식이다. 진폭은 모델이 예측한 값을 기준으로 상대오차를 계산하였으며, 위상은 가장 크게 발생할 수 있는 차이인 180° 를 기준으로 오차를 나타내었다. 따라서 위상 오차는 수치상으로 다소 작은 값으로 표현될 수 있다. 그러므로 위상 오차는 진폭의 상대오차와 직접 비교할 수 없다. 식 (1)에서 진폭은 A 로, 위상은 ϕ 로 표시하였으며, 모델로 예측한 값은 M , GPS로 검출한 값은 G 로 나타내었다.

$$\epsilon_A = \frac{|A_M - A_G|}{A_M} \times 100, \quad \epsilon_\phi = \frac{|\phi_M - \phi_G|}{180^\circ} \times 100 \quad (1)$$

FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델을 기준으로 GPS 검출 정확도를 평가한 결과는 각각 표 4와 표 5에 나타내었다. FES2004 전지구모델을 이용한 검출 정확도 평가에서 진폭의 상대오차는 제주에서 평균 22.8%, 위상오차는 인천에서 평균 5.9%로 가장 낮은 오차를 나타내었다. 또한, NAO.99Jb 지역모델을 기준으로 분석한 결과 진폭의 상대오차는 제주에서 평균 23.4%로 가장 낮고,

표 5. NAO.99Jb 기준 GPS 검출 결과의 오차 비교[단위 %].

	인천(ICNW)		서산(SEOS)		제주(CJUN)	
	ϵ_A	ϵ_ϕ	ϵ_A	ϵ_ϕ	ϵ_A	ϵ_ϕ
M_2	33.5	3.0	29.5	6.1	21.4	3.3
S_2	48.7	13.1	85.2	35.8	29.8	1.3
K_1	150.9	6.9	71.2	1.3	35.5	22.2
O_1	38.0	5.2	28.8	19.4	7.1	7.0
Average	67.8	7.0	53.7	15.7	23.4	8.4

위상오차는 인천에서 평균 7.0%로 가장 낮게 나타났다. 모델에 의한 차이를 고려하더라도 진폭성분의 경우 제주, 위상성분의 경우 인천의 검출 결과가 가장 정확함을 알 수 있다.

인천의 K_1 분조는 진폭성분에서 FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델에서 모두 150% 이상의 상대오차를 나타내어 검출 정확도가 낮은 것으로 나타났다. 서산의 S_2 분조는 진폭성분에서 FES2004와 117.4%의 차이를 나타내었으며, NAO.99Jb와는 85.2%를 나타내어 모델에 따라 검출 정확도에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 서산의 S_2 분조는 위상성분에서 모델에 관계없이 가장 낮은 검출 정확도를 나타내었다. S_2 분조(12.0000h)의 경우 K_2 분조(11.9672h)와 매우 비슷한 주기를 갖기 때문에 이들을 정확하게 분리하기 위해서는 6개월 이상의 연속된 자료가 필요하다(Khan & Tscherning 2001). 따라서 이 연구에서는 6개월 미만의 GPS 자료를 이용함으로써 S_2 분조와 K_2 분조의 정확한 분리가 이루어지지 않아 검출 정확도에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 해양조석모델의 예측결과를 기준으로 GPS를 이용한 OTL 분조성분의 검출 정확도를 평가하였다. 그러나 FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델의 정확도를 실제 조위자료와의 비교를 통해 평가한 사례가 없다. 그러므로 모델 예측결과와 GPS 검출 결과의 차이를 전적으로 GPS 검출오차로 볼 수 없다. 조위자료를 이용한 추가연구를 통해 조석모델의 오차를 정량적으로 평가함으로써 보다 정확한 비교가 가능할 것으로 판단된다. 또한 이 연구에서는 3개월 미만의 비교적 짧은 기간의 GPS 수직좌표 시계열이 조석화분해에 사용되어 S_2 와 K_2 등의 유사한 주기를 갖는 분조성분이 정확하게 분리되지 않음으로써 검출 정확도가 다소 낮아진 것으로 추정된다. 향후 1년 이상의 연속적인 자료가 확보될 경우 보다 정확하고 많은 수의 분조성분을 검출할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 연구는 해양조석모델을 이용한 정확도 평가를 통해 GPS 정밀단독측위기법을 적용하여 OTL 분조성분의 검출이 가능함을 확인하였다. FES2004 전지구모델과 NAO.99Jb 지역모델은 제주보다 인천과 서산에서 모델에 의한 차이가 상대적으로 크고, 특히 일본조보다는 반일본조성분에서 차이가 더 큰 것을 확인하였다. 조석모델을 이용한 분석에서 주요 4대 분조는 전체 11개 분조성분의 약 80%를 차지하는 것으로 나타나 GPS를 이용하여 주요 4대 분조성분을 정확히 검출할 경우 OTL 수직지각변위의 약 80%를 보정할 수 있을 것으로 기대된다. 조석모델의 예측결과를 기준으로 오차 분석을 수행한 결과 GPS로 검출한 OTL 분조 중 진폭성분은 제주에서, 위상성분은 인천에서 모델과 가장 근접한 것으로 나타났다. 그러나 GPS 위성궤도의 섭동과 주기가 가까운 K_1 분조는 선행 연구

사례와 같이 검출 정확도가 높지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글: 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김명규 2007, 석사학위논문, 관동대학교 국토방재대학원
박관동, 원지혜, 김호균, 임관창 2007, 한국우주과학회지, 24, 249
윤홍식, 이동하, 2003, 한국측량학회지, 21, 317
Baker, T. F., Edge, R. J., & Jeffries, G. 1991, *Geophys. J. Int.*, 107, 1
Choi, B. H. 1980, A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea (Ansan: Korea Ocean Research and Development Institute)
Khan, S. A. & Scherneck, H. -G. 2003, *J. Geodesy*, 77, 117
Khan, S. A. & Tscherning, C. C. 2001, *GRL*, 28, 2249
King, M. 2006, *J. Geodynamics*, 41, 77
Lambeck, K. 1988, *Geophysical Geodesy: The Slow Deformations of the Earth* (Oxford: Oxford Science Publications), p.718
Lee, H. C. & Moon, W. M. 2001, *Geosciences J.*, 5, 319
Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. 2006, *Ocean Dyn.*, 56, 394
Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., & Ooe, M. 2000, *J. Oceanography*, 56, 567
Matsumoto, K., Sato, T., Takanezawa, T., & Ooe, M. 2001, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 243
McCarthy, D. D. & Petit, G. 2003, *IERS Technical Note 32*
Rich, P., Bob, B., & Steve, L. 2002, *Computers & Geosciences*, 28, 929
Schaer, S. & Hugentobler, U. 2006, *IGSMail-5518*
Schenewerk, M. S., Marshall, J., & Dillinger, W. 2001, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 237
Scherneck, H. G. & Bos, M. S. 2002, in *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, eds. N. R. Vandenberg & K. D. Baver (Washington, D.C.: NASA), pp.205-214.
Scherneck, H. G., Johansson, J. M., & Webb, F. H. 2000, *Ocean loading tides in GPS and rapid variations of the frame origin* (Heidelberg: Springer Berlin), pp.32-40
Shum, C. K., Woodworth, P. L., Andersen, O. B., Egbert, G., Francis, O., King, C., Klosko, S., Le Provost, C., Li, X., Molines, J., Parke, M., Ray, R., Schlax, M., Stammer, D., Tierney, C., Vincent, P., & Wunsch, C. 1997, *JGR*, 102, 25173
Sovers, O. J. 1994, *GRL*, 21, 357
Thomas, I. D., King, M. A., & Clarke, P. J. 2007, *J. Geodesy*, 81, 359
Vergnolle, M., Bouin, M. -N., Morel, L., Masson, F., Durand, S., Nicolas, J., & Melachroinos, S. A. 2008, *Geophys. J. Int.*, 173, 444
Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, *An introduction to the GIPSY/OASIS II* (Pasadena: JPL Publication), D-11088