

GNSS 측위방법에 따른 해양조석하중 성분 검출 정확도 분석

Accuracy Analysis of Ocean Tide Loading Constituent Detection Using GNSS Positioning

윤하수¹⁾ · 최윤수²⁾ · 권재현³⁾

Yoon, Ha Su · Choi, Yun Soo · Kwon, Jay Hyoun

Abstract

Various space geodetic techniques have been developed for highly precise and cost-efficient positioning solutions. By correcting the physical phenomena near the earth's surface, the positioning accuracy can be further improved. In this study, the vertical crustal deformation induced by the ocean tide loading was accurately estimated through GNSS absolute and relative positioning, respectively, and the tidal constituents of the results were then analyzed. In order to validate the processing accuracy, we calculated the amplitude of eight major tidal constituents from the results and compared them to the global ocean tide loading model FES2004. The experimental results showed that absolute positioning and positioning done every hour during the observation time of 2 hours, which yielded an outcome similar to the reference ocean tide loading model, were better approaches for extracting tide constituents than relative positioning. As a future study, a long-term GNSS data processing will be required in order to conduct more comprehensive analysis including an extended tidal component analysis.

Keywords: Ocean Tide Loading, Tidal Constituent, Tidal Station, GNSS

초 록

오늘날 우주측지기술은 측위정밀도를 높이고 시간과 비용적 측면에서 효율성을 향상시키는 방향으로 발전되고 있다. 정밀측위를 위하여 지구의 물리적 현상을 보정하는 것은 필수적이며, 그 중 해양조석하중의 보정은 중요한 요소이다. 본 연구에서는 인천과 제주의 조위관측소 GNSS 관측데이터를 이용하여 해양조석하중에 의한 수직지각변위를 산출하고 지각변위를 일으키는 각 분조의 조석성분을 검출하였다. GNSS 측위방법과 자료처리 시간에 따른 해양조석하중 성분 검출 정확도를 비교하기 위하여 상대측위와 정밀절대측위로 GNSS 데이터를 처리하여 주요 8개 조석성분의 진폭을 산출하고 전지구 해양조석하중 모델의 진폭과 비교하였다. 연구결과 조석분조 진폭 검출에는 2시간 간격의 자료처리와 정밀절대측위 방법이 해양조석하중 분조 검출에 정확한 것으로 나타났다. 추후에는 장기간 자료를 이용하여 장주기 조석성분에 대한 분석도 이루어져야 할 것이다.

핵심어: 해양조석하중, 조석분조, 조위관측소, GNSS

Received 2016. 04. 26, Revised 2016. 06. 13, Accepted 2016. 06. 23

1) Member, Space Geodesy Group, Korea Astronomy and Space Science Institute (E-mail: hasu9@kasi.re.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics, The University of Seoul (E-mail: choiys@uos.ac.kr)

3) Member, Dept. of Geoinformatics, The University of Seoul (E-mail: jkwon@uos.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

현재 우주측지관련 연구 중 정밀한 측위를 위하여 조석(Tide)이나 대기영향 등의 여러 가지 오차를 보정하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이를 통하여 측위정밀도가 높아지고 있으며, 수요자 입장에서 더 빠르고 정밀한 측위결과를 요구하고 있다.

이러한 시대적 흐름에 따라 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 이용한 측위 시 보정해야 할 오차 중 해양조석하중 오차의 보정은 정밀측위의 중요한 요소이다. 우리나라는 해양조석이 크게 발생하는 지역으로 인천의 경우 조수간만의 차가 8m 정도로 세계에서 2번째로 크게 발생하고 있다. 이처럼 우리나라 서해와 남해는 평균적으로 큰 조석이 발생하고 있으며(Kang, 2012), 해양조석이 크게 발생하면 해양조석하중의 영향이 커지며 해양조석하중에 의한 지각변위도 나타난다. 해양조석하중에 의한 우리나라의 수직지각변위는 서해-남해-제주 지역에서는 최대 3~4cm 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 IERS(International Earth Rotation and Reference Systems Service)에서는 우주측지기술을 이용한 측위 시 조석에 의한 지각변위의 영향을 보정하도록 하고 있다(Petit *et al.*, 2010). 이러한 영향은 조석주기에 따라 발생하므로 짧은 시간에 이루어지는 공공기준점 GNSS 측량이나 RTK(Real Time Kinematic)측량 등의 정밀 측위결과에 영향을 줄 수 있다. 해양조석하중에 의한 지각변위를 관측할 수 있는 방법은 중력관측, VLBI(Very Long Baseline Interferometer), GNSS 등 여러 가지 방법이 이용되고 있으며, 본 연구에서와 같이 GNSS를 이용한 검출도 하나의 방안이 되고 있다. GNSS의 경우 우리나라에 설치된 GNSS 상시관측소를 이용하면 공간적으로 여러 지역에 동시적인 관측과 시간적으로 장기관측이 용이하며, 비용적 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

국내에서 GNSS를 이용한 해양조석하중 성분을 검출하는 연구는 다음과 같이 진행되었다. Yun *et al.*(2007)은 상대측위를 이용하여 대전(DAEJ) 상시관측소를 고정하고 49일간 12개의 해안 및 도서지역의 상시관측소 높이차를 산출하고 CLEAN 알고리즘에 의한 스펙트럼 분석을 통하여 M_2 와 N_2 분조(Constituent)의 위상(Phase)과 진폭(Amplitude)을 NAO99jb 해양조석하중 모델과 비교하는 연구를 수행하였다. Won(2009)은 GIPSY OASIS-II를 이용한 절대측위를 통하여 2곳의 조위관측소와 1곳의 상시관측소에 대하여 8개 분조성분을 검출하고 NAO99jb 및 FES2004 해양조석하중 모델과 비교하였다.

본 연구는 조위관측소 GNSS 자료를 이용하여 절대측위와 상대측위를 수행하고 산출된 수직지각변위에 대하여 조화분해를 실시하여 해양조석하중 영향을 구성하는 각 분조의 진폭성분을 계산한다. 이렇게 계산된 진폭성분을 해양조석하중 모델의 진폭과 비교하여 해양조석하중 성분 검출에 적합한 GNSS 측위방법을 도출하는 것이 연구의 목적이다. 기존의 연구와의 차별성으로는 국내에서는 해양조석하중 영향을 검출하기 위하여 상대측위와 절대측위 방식을 직접적으로 비교한 적이 없으며, 국외에서는 2가지 측위방법에 대하여 짧은 기간의 비교가 이루어진 것으로 조사되었다. 본 논문에서는 세계적으로도 해양조석이 크게 발생하는 큰 인천과 제주 조위관측소의 GNSS 장기간 데이터를 이용한 연구로서의 의미가 있으며, 이를 통하여 우리나라의 정밀한 해양조석모델의 개발을 위한 GNSS 처리방법을 제시하는 것이 목적이다.

2. 연구이론 및 방법

2.1 해양조석하중

조석은 지구와 천체 상호간에 일어나는 물리적인 운동이며, 달과 태양이 큰 영향을 준다. 이러한 현상은 주기적인 지각변동을 발생시키며, 측위 시 보정해주어야 하는 요소로 인식되고 있다(Petit *et al.*, 2010).

이러한 주기적인 변동에는 고체지구조석(Solid Earth Tide), 해양조석(Ocean Tide), 극조석(Pole Tide) 등이 있으며, 해양조석하중(OTL : Ocean Tide Loading)은 해수의 하중변화로 지각변동이 발생하는 것을 의미한다. 아래 그림 Fig. 1은 해양조석하중의 개념을 나타낸 그림이다. 해양조석은 다른 조석영향과는 다르게 수심, 해안선 등 주변의 공간적인 특징에 영향을 받으며, 내륙보다는 해안가와 도서지역에서 영향이 크다. 이처럼 지역적인 특성이 많이 반영되므로, 정밀한 측위를 위해서는 지역에 맞는 해양조석하중 모델의 적용이 필요하다.

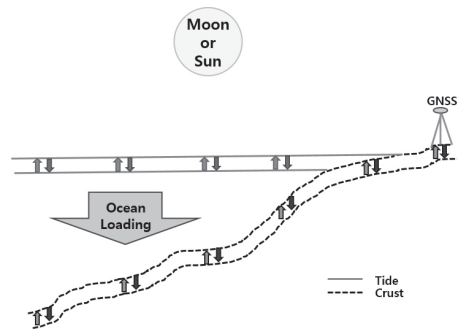


Fig. 1. Concept of ocean tide loading

해양조석하중에 의한 지각변위는 Mccarthy가 IERS Convention에서 규정한 Eq. (1)로 계산이 가능하다.

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

where Δc : Displacement component(radial, west, south), j : Number of tidal constituents, ω_j : Angular velocity, χ_j , f_j , u_j : Astronomical argument, A_{cj} : Amplitude, Φ_{cj} : Phase angle, t : Particular site at time.

본 연구는 GNSS 관측데이터를 이용한 수직변위량(Δc)을 산출하고 조화분해를 실시하여 주요 8개 조석분조의 진폭과 위상을 계산한다.

2.2 조석분조 및 조화분해

해양조석을 분석 및 예보하기 위하여 조석을 무수한 가상 천체에 의하여 규칙적으로 일어나는 조석성분의 합으로 가정하였을 때, 각각의 조석성분을 분조라고 한다(Cho, 2002).

조석은 장주기(Long Period), 일분조(Diurnal), 반일분조(Semi-Diurnal) 3가지 기본주기로 되어있으며, 기본주기에 따라 분조도 3가지로 구분된다. 일분조는 고조에서 고조의 시간이 하루를 주기로 나타나며, 반일분조의 경우 하루에 2번의 완전한 조석현상이 발생하는 것을 의미한다. 우리나라의 서남해의 경우 일 2회의 조석현상이 발생하며, 일조부등(Diurnal Inequality)의 현상이 발생한다. 일조부등이란 각 조석분조의 위상차로 2번의 고조와 저조의 높이가 다르게 나타

나는 것을 의미한다. 현재 전지구 해양조석하중 모델의 경우 3가지 기간의 분조 중 11개의 주요 분조의 진폭과 위상을 제공하고 있다. 아래 Table 1은 모델에서 제공되는 11개 분조의 이름과 주기, 각속도를 나타낸 표이다. 분조는 기호와 첨자로 표기하며 기호 M, N, O는 달의 영향을 의미하고 S, P는 태양의 영향을 K는 달과 태양의 복합적인 영향을 의미한다. 분조의 첨자는 주기를 의미하며 1은 일분조, 2는 반일분조, f는 15일(보름), m은 1개월, sa는 반년을 의미한다.

해양조석분야의 조화분해는 조석을 다수의 규칙적인 조석 성분으로 합성되었다고 가정하고 시간에 따른 해수면의 높이(조위)와 같은 실제 관측 값을 이용하여 조석성분으로 분해하여 조화상수를 계산하는 것을 의미한다. 조화분해를 이용하면, 임의 시간에 발생하는 조석을 예측할 수 있다. 조화분해의 방법으로는 최소제곱법, Darwin의 다원법, Doodson의 T.I 법 등이 있다. 아래 Eq. (2)는 어느 지역의 시간이 t 일 때 조위를 조화분해 형태의 식으로 나타낸 것이다.

$$h_t = A_0 + \sum_{i=1}^N H_i \cos(a_i t + K_i) \quad (2)$$

where h_t : Tide level(radial), t : Particular site at time, N : Number of tidal constituents, A_0 : Mean tide level, a_i : Angular velocity, H_i : Amplitude, K_i : Phase angle.

본 연구에서 사용한 조화분해는 최소제곱법을 이용한 방법이다.

Table 1. Tidal constituents(Jang, 1999)

	Symbol	Term	Period (hour)	Angular Velocity (/hour)
Semi-Diurnal	M_2	Principal lunar	12.42	28.98
	S_2	Principal solar	12.00	30.00
	N_2	Larger lunar elliptic	12.66	28.44
	K_2	Luni-solar semi-diurnal	11.97	30.08
Diurnal	K_1	Luni-solar diurnal	23.93	15.04
	O_1	Principal lunar diurnal	25.82	13.94
	P_1	Principal solar diurnal	24.07	14.96
	Q_1	Larger lunar elliptic	26.87	13.40
Long Period	M_f	Lunar fortnightly	327.9	1.10
	M_m	Lunar Monthly	661.3	0.54
	S_{sa}	Solar Semi-annual	4383	0.08

2.3 연구 범위 및 처리 소프트웨어

본 연구에서는 조위관측소의 GNSS 데이터를 이용하여 지각의 수직변위를 산출하고 조화분해 프로그램을 이용하여 8개 분조의 진폭을 추출하여 전지구 해양조석하중 모델과 비교하여 정확도를 검증한다. 8개 분조는 해양조석에 영향을 많이 미치는 일주조와 반일주조 분조로 대부분의 전지구 해양조석하중 모델에서 제공되는 분조를 산출하고 비교하였다. 장주기 분조의 경우 본 연구의 처리기간이 1년 미만으로 이번 연구에서는 제외하였다.

연구의 공간적 범위는 인천과 제주 조위관측소에 설치된 GNSS 관측데이터를 이용하였다. 조위관측소의 경우 조위를 관측하는 시설물로 해안 및 도서지역에 설치되어 있어 해양조석하중에 의한 지각변위 관측에 용이하다. 우리나라는 2005년부터 인천 조위관측소를 시작으로 현재 12개의 조위관측소에 GNSS 수신기가 설치되어 있으며 이 중 조석현상이 크게 발생할 것으로 예상되고 연속적인 데이터 확보가 가능한 인천 조위관측소와 제주 조위관측소를 연구대상지역으로 선택하였다. 또한 상대측위 처리에 있어 고정점은 상대적으로 해양조석하중이 적을 것으로 예상되는 내륙에 위치한 한국천문연구원의 대전 GNSS 상시관측소를 이용하였다. 아래 Fig. 2는 공간적 범위를 나타낸 그림이다.

연구의 시간적 범위는 조위관측소 GNSS 관측데이터의 유무를 조사하여 연속된 시간으로 범위를 설정하였다. 인천 조위관측소는 2006년 9월부터 2007년 3월까지의 6개월 데이터를 이용하였으며, 제주 조위관측소도 2007년 1월부터 6월까지의 6개월의 관측데이터를 이용하여 비교하였다. 대전 상시관측소의 경우 상대측위를 위해 두 곳의 처리기간을 모두 포함하는 데이터를 확보하여 연구를 진행하였다. 아래 Table 2는 연구 대상지역의 GNSS 수신기, 안테나, 처리기간을 나타낸 표이다.

연구에 사용된 소프트웨어는 GNSS 자료처리를 위하여 과학용 정밀해석프로그램인 Bernese 5.0(이하 Bernese)과 GIPSY OASIS-II(이하 GIPSY)를 이용하였으며, 상대측위(Relative Positioning)는 Bernese BPE(Bernese Processing Engine) 자동처리 프로그램을 이용하였다. 정밀절대측위방식(PPP : Precise Point Positioning)으로는 GIPSY의 gd2p(GNSS data to position) 자동처리방식을 이용하여 데이터를 처리하였다. Bernese의 경우 자동처리에 정밀절대측위방식이 있지만 모호정수 결정과정이 없어 조석성분 산출 낮았다(Yoon and Choi, 2016). 처리간격은 Moving Window기법을 이용한 2시간 단위로 처리하였으며, 이러한 방식을 채택한 원인을 실험결과 분석에서 설명하였다.

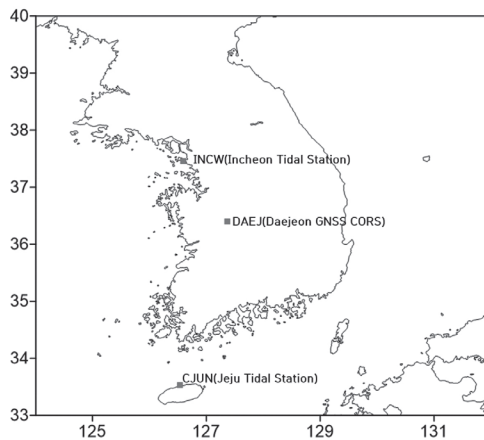


Fig. 2. Study area

Table 2. Study area and description

Station	Receiver Type	Antenna Type	GNSS Observation Data
Incheon(INCW)	ASHTECH UZ-12	ASH701945E_M	2006.07.14.~2007.04.26.(287days)
Jeju(CJUN)	ASHTECH UZ-12	ASH701945E_M	2007.01.01.~2007.08.03.(215days)
Daejeon(DAEJ)	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	2006.07.14.~2007.08.03.(385days)

조화분해는 영국해양연구소(Proudman)에서 개발된 Task-2000 Package의 TIRA(Tidal Institute Recursive Analysis) 프로그램을 이용하여 분석하였다. TIRA는 시간별 조위를 바탕으로 최소제곱법을 이용한 조화분해 프로그램으로 조화분해 시 자유롭게 조화상수의 숫자를 계산할 수 있으며, 수개월에서 수년의 자료처리가 가능하며, 우리나라의 조위 및 조석예측에 사용되는 프로그램 중 하나이다(Cho, 2001).

2.4 자료처리 방법

본 연구는 조위관측소 GNSS 데이터를 이용하여 상대측위와 정밀절대측위 방식으로 수직변위를 추정하고 두 가지 방식을 비교하여 해양조석하중 성분의 검출 정확도를 분석하는 것이 목적이다. 상대측위는 지상의 기준점과 미지점에서 동시에 같은 GNSS 위성신호를 수신하여 미지점의 좌표를 산출하는 방식이다. 단기선의 경우 동시 신호를 수신하는 동안 오차가 같거나 비슷하다고 가정하여 오차를 제거하고, 중·장기선에서는 오차를 최소화하여 위치를 결정하는 방법이다. 상대측위는 정확한 위치결정이 가능하지만 단점으로는 기준점에 대한 GNSS 관측이 필요하며, 미지점의 추정된 좌표는 기준점 좌표의 영향을 많이 받는다. 본 연구에서는 상대측위 방법 중 이중차분(DD : Double Differencing)을 이용한 결과를 산출하였다. 정밀절대측위(PPP)는 차분하지 않은 반송파 위상 및 코드 의사거리를 이용하여 위치를 결정하는 기술로서, 한 대의 수신기를 이용하여 측위결과를 얻을 수 있다. 다양한 오차 요인인 위성, 수신환경, 신호 전파에 따른 영향을 최소화하여 Cm 수준의 측위결과를 획득할 수 있다. 절대정밀측위의 경우 상대측위보다 위치결정 정확도는 낮지만 다른 위치의 관측 값에 대한 영향이 없으며, 해석과정이 상대적으로 쉬워진다.

연구에 사용된 두 가지 GNSS 처리 프로그램은 일반적으로 고체지구조석, 극조석, 해양조석하중에 의한 지각변위를 해당 모델을 이용하여 보정한다. 본 연구에서는 고체지구조석과 극조석은 IERS에서 제공되는 모델을 이용하여 보정하고 해양조석하중 모델은 적용하지 않아 해양조석하중에 의한 수직지각변위를 산출하였다.

3. 실험결과 분석

3.1 전지구 해양조석하중 모델

본 연구에서는 우리나라 조위관측소 GNSS 데이터를 이용하여 산출된 해양조석하중의 분조의 진폭성분을 검증하기 위하여 전지구 해양조석하중 모델과 비교하였다. 비교 대

상이 되는 전지구 해양조석하중 모델을 선정하기 위하여 우리나라 조석처리에 사용되고 있는 지역적 해양조석하중 모델인 NAO99jb와 비교하였다. NAO99jb의 경우 우리나라에 적합한 지역 조석 모델로 알려져 있다. 비교대상 전지구 모델은 GNSS처리에 많이 사용되는 FES2004, GOT4.8, 최근에 발표된 OSU12, DTU10모델 4가지를 비교하였다.

위의 4가지 해양조석하중 모델은 Onsala Space Observatory에서 무료로 제공되는 자료를 이용하여 분석하였다. Onsala Space Observatory에서는 아래 Fig. 3과 같이 각 주요 11개 분조의 진폭과 위상에 대한 정보를 다운로드 할 수 있으며, 현재 최근 모델인 FES2012는 서비스가 되지 않고 있는 것으로 조사되었다.

```

%% Ocean loading displacement
%%
%% Calculated on Ore using olg/olmp of H.-G. Scherneck
%%
%% COLUMN ORDER: M2 S2 N2 K2 K1 O1 P1 Q1 M1 MF MM SSA
%%
%% ROW ORDER:
%% AMPLITUDES (m)
%% RADIAL
%% TANGENTIAL EW
%% TANGENTIAL NS
%% PHASES (degrees)
%% RADIAL
%% TANGENTIAL EW
%% TANGENTIAL NS
%%
%% ICNW ICNW
%% FES2004 PP ID: 2015-03-17 08:00:51
%% Computed by OLMPF by H G Scherneck, Onsala Space Observatory, 2015
%% ICNW ICNW, RADI TANG lon/lat: 126.5921 37.4520 34.274
.01405 .00569 .00199 .00051 .00501 .00455 .00159 .00084 .00027 .00009 .00005
.00199 .00025 .00034 .00019 .00213 .00155 .00070 .00025 .00009 .00003 .00000
.00190 .00081 .00020 .00017 .00177 .00145 .00057 .00026 .00002 .00002 .00002
59.2 104.3 46.4 120.0 -89.0 -105.1 -90.7 -124.4 1.9 -17.3 -7.7
-149.4 -63.1 148.9 53.9 -159.0 174.5 -156.8 172.6 -38.9 -59.1 -68.0
-130.7 -67.6 -121.2 -12.0 112.4 93.2 115.5 79.3 134.4 76.8 8.6
    
```

Fig. 3. FES2004 model of Incheon tidal station(BLQ format)

우리나라에 적합한 전지구 해양조석하중 모델을 선정하기 위하여 서해의 인천 조위관측소, 남해의 통영 조위관측소, 동해의 속초 조위관측소, 제주 조위관측소, 외해의 이어도 종합해양과학기지 5곳의 환경이 다른 지점의 위치를 이용하여 4가지 모델을 다운로드하고 NAO99jb의 8개 분조의 진폭과 비교하였다.

해양조석모델의 비교방법은 8개 분조에 대한 진폭 차이를 평균제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)로 표현하였다. 계산식은 Eq. (3)과 같다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{model_ref} - Z_{model})^2}{n-1}} \quad (3)$$

where Z_{model_ref} : Amplitude of NAO99jb ocean tide loading model, Z_{model} : Amplitude of global ocean tide loading model, n : Number of tidal constituents.

여기서 n 은 8이다.

Table 3. Comparison results of ocean tide loading model

	Incheon		Jeju		Tongyeong		Sckcho		IEDO	
	Model	S(cm)	Model	S(cm)	Model	S(cm)	Model	S(cm)	Model	S(cm)
1st	OSU12	0.254	GOT4.8	0.085	GOT4.8	0.071	DTU10	0.080	DTU10	0.100
2nd	FES04	0.260	FES04	0.098	FES04	0.098	FES04	0.083	FES04	0.125
3rd	GOT4.8	0.270	DTU10	0.138	OSU12	0.124	GOT4.8	0.093	OSU12	0.141
4th	DTU10	0.405	OSU12	0.140	DTU10	0.130	OSU12	0.099	GOT4.8	0.159

위의 Table 3의 결과와 같이 전반적으로 우리나라에 적합한 해양조석하중 모델은 FES 2004 모델로 판단되었으며, 다른 조석모델의 경우 동·남·서해의 지역에 따른 편차가 큰 것으로 나타났다. FES 2004모델은 Hydrodynamic tide model에 TOPEX/POSEIDON 위성고도계 자료동화를 통해 만들어 졌으며, 0.125° × 0.125°의 해상도를 제공한다. 또한 M_3 , M_4 , M_6 분조를 제공하고, 기존의 모델과 비교하여 높은 해상도와 해안가에서도 높은 정확도의 조석정보를 제공한다.

3.2 자료처리 시간 단위에 따른 해양조석하중 검출 분석

본 연구에서는 GNSS 수직변위의 결과를 1시간 단위로 산출하였다. 이는 GNSS 좌표추정의 정밀도와 처리안정성 및 조화분해 프로그램의 입력 데이터 주기를 고려하여 1시간으로 설정하였다. 1시간 간격의 수직변위 산출을 위하여 GNSS 자료처리 시간을 1시간과 2시간 단위로 2가지 방법으로 처리하고 우세주기를 분석하여 해양조석하중 조석성분의 검출 성능을 비교하였다. 2시간 간격으로 처리한 경우 2시간의 중간 시간을 관측 값으로 결정하여 1시간 단위로 수직변위를 도출하였다. 아래 Fig. 4는 2시간 간격으로 자료를 처리하여 1시간 단위로 수직변위 결과를 도출하는 방법을 설명한 그림이다.



Fig. 4. Moving window method

자료처리 시간 단위를 결정하기 위하여 인천 조위관측소를 이용하여 1개월 기간(2007.01.11.~2007.02.09.)에 대하여 자료처리를 실시하였다. 자료처리 결과 산출된 GNSS 수직변위를 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 주기를 계산하였다. 데이터 처리방법은 정밀절대측위방법과 상대측위를 두 가지 방식을 모두 적용하여 해양조석하중 분조 검출 결과를 비교하였다.

3.2.1 정밀절대측위

정밀절대측위 결과 1시간 단위의 처리는 단주기 성분이 크게 검출되는 것을 아래의 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 1시간 간격으로 처리한 결과 4시간 주기와 6시간 주기가 크게 검출되었다. 2시간 단위의 처리는 1시간 간격과 다르게 M_2 분조의 주기인 12.4시간 주기가 검출되는 것을 볼 수 있다(Fig. 6).

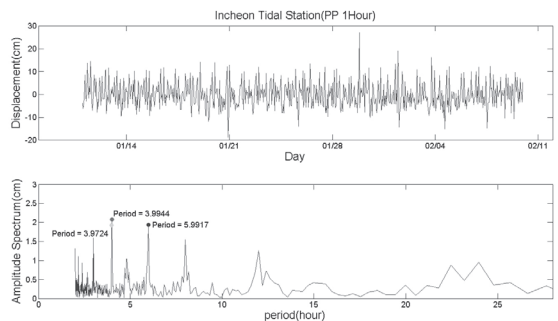


Fig. 5. FFT result of Incheon (PPP, 1 hour, 1 month)

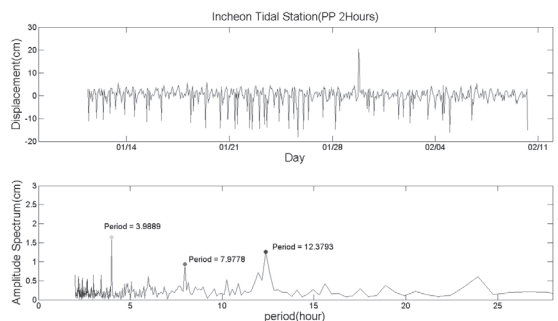


Fig. 6. FFT result of Incheon (PPP, 2 hour, 1 month)

3.2.2 상대측위

상대측위 결과 1시간 단위의 처리는 정밀절대측위와 같이

단주기 성분이 크게 검출되는 것을 아래의 Fig. 7을 통해 알 수 있다. 1시간 단위로 처리한 결과 5시간 이전의 단주기 성분이 강하게 검출되었다. 2시간 단위의 처리는 M_2 분조의 주 주기인 12.4시간 주기가 가장 크게 검출되는 것을 볼 수 있다 (Fig. 8).

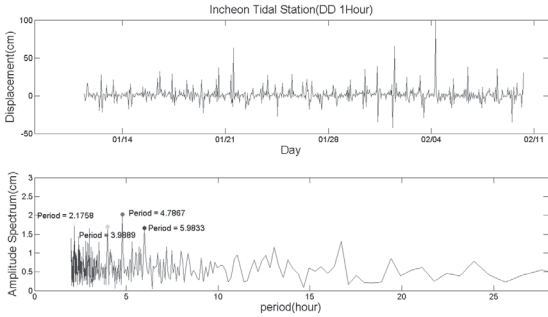


Fig. 7. FFT result of Incheon (DD, 1hour, 1month)

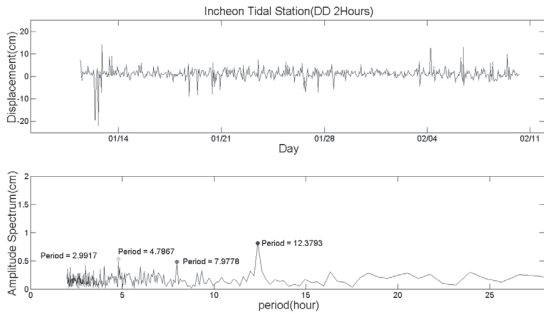


Fig. 8. FFT result of Incheon (DD, 2hours, 1month)

해양조석하중 영향의 구성요소인 분조성분을 검출하기 위하여 조위관측소 GNSS 자료처리 시간을 1시간 간격과 2시간 간격으로 각각 처리하여 FFT를 수행하였다. 처리결과 2시간 간격의 처리에서는 조석분조의 주기가 검출되는 것을 볼 수 있었으며, 1시간 간격에서는 잡음형태의 단주기가 크게 검출되었다. 단주기가 크게 검출된 원인은 측위정밀도와 관계가 있는 것으로 판단하였으며, 이에 대한 근거로 1시간 간격의 처리의 경우 수직변위의 잔차가 2시간 간격의 잔차보다 크게 나타나는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 1시간 단위의 처리는 해양조석하중의 검출에는 적합하지 않은 것으로 판단되었으며, 180일 이상의 GNSS 관측 자료

를 2시간 간격으로 상대측위와 절대측위로 처리하여 조석분조를 분석하였다.

3.3 GNSS 처리방법에 따른 해양조석하중 조화분해 분석

앞에서는 자료처리 시간간격에 대하여 분조성분의 검출정확도를 분석하였으며, 본 절에서는 측위방법에 따른 분조성분 검출 정확도 비교를 위해 6개월 이상의 인천과 제주 조위관측소 GNSS 데이터를 2시간 간격으로 처리하고 GNSS 수직변위에 대하여 TIRA를 이용한 조화분해를 실시하였다. 검출된 8개 분조는 FES 2004 조석모델 진폭과 비교하였다. 비교는 아래의 Eq. (4)와 같이 RMSE 값을 이용하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{GPS_Harmonic} - Z_{model})^2}{n-1}} \quad (4)$$

where $Z_{GPS_Harmonic}$: Amplitude of tidal harmonic analysis, Z_{model} : Amplitude of FES 2004 ocean tide loading model, n : Number of tidal constituents.

3.3.1 인천 조위관측소

아래 Fig. 9와 Table 4에 인천 조위관측소의 처리결과를 나타냈다. 인천 조위관측소의 경우 6개월 이상의 정밀절대측위 (PPP)를 이용한 해양조석하중 진폭의 검출 결과가 FES 2004 해양조석하중 모델과 가장 유사한 것으로 나타났다. 정밀절대측위를 이용하여 검출된 8개 분조의 진폭은 1.5mm이하의 편차를 보여 정확한 진폭 검출을 확인할 수 있었다. 상대측위 (DD)를 이용한 조화분해 결과를 해양조석모델과 비교하면 영향이 가장 큰 M_2 분조의 진폭이 절반정도로 작게 검출되어 RMSE 값이 크게 계산된 것으로 나타났다.

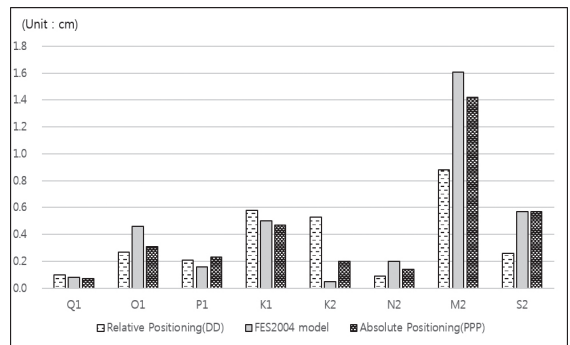


Fig. 9. Tidal harmonic analysis of Incheon(6 months)

Table 4. Tidal harmonic analysis of Incheon (6 months)

(unit : cm)

Tidal Constituents	Relative Positioning (DD)	FES2004	Absolute Positioning (PPP)
Q_1	0.10	0.08	0.07
O_1	0.27	0.46	0.31
P_1	0.21	0.16	0.23
K_1	0.58	0.50	0.47
K_2	0.53	0.05	0.20
N_2	0.09	0.20	0.14
M_2	0.88	1.61	1.42
S_2	0.26	0.57	0.57
S(RMSE)	0.36	-	0.11

3.3.2 제주 조위관측소

제주 조위관측소의 조화분해 결과는 아래의 Fig. 10과 Table 5와 같다. GNSS 수직변위에 대한 조화분해 결과도 정밀절대측위(PPP)를 이용한 조석분조 검출 결과가 상대측위(DD) 검출결과보다 FES 2004 해양조석모델과 유사한 경향이 나타났다. 정밀절대측위를 이용한 진폭 검출결과 K_2 성분은 높게 검출되었으며, K_1 과 O_1 분조는 낮게 검출되었다. 상대측위의 경우 K_1 , O_1 , N_2 , Q_1 은 진폭이 낮게 검출되었으며 K_2 , S_2 , P_1 분조가 크게 검출되어 M_2 분조를 제외한 전체적인 7개 분조의 검출이 정확하지 않았다.

인천과 제주의 전체적인 실험결과로 해양조석모델과 비교하여 K_2 분조가 크게 검출되었으며, 이러한 K_2 분조 과대검출의 원인으로는 위성의 궤도오차 및 GNSS 위성의 공전주기와 분조의 주기가 유사하여 발생한 현상으로 발생한 결과로 이러한 원인은 선행연구에서 제시되었던 결과와 유사하게 도출되었다.

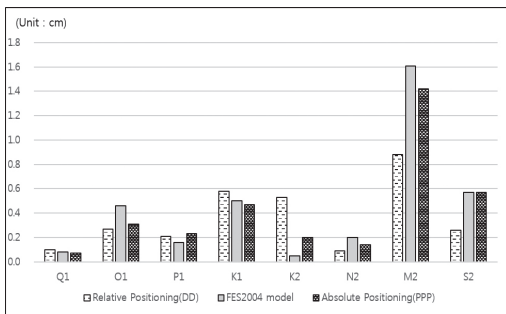


Fig. 10. Tidal harmonic analysis of Incheon(6 months)

Table 5. Tidal harmonic analysis of Jeju(6 months)

(unit : cm)

Tidal Constituents	Relative Positioning (DD)	FES2004	Absolute Positioning (PPP)
Q_1	0.02	0.17	0.17
O_1	0.48	0.85	0.46
P_1	0.68	0.36	0.46
K_1	0.65	1.10	0.59
K_2	0.63	0.18	0.37
N_2	0.07	0.31	0.18
M_2	1.09	1.16	1.05
S_2	1.01	0.48	0.56
S(RMSE)	0.38	-	0.26

3.3.3 기준관측소에 따른 비교

본 연구는 정밀절대측위가 해양조석하중 성분 검출에 적합한 것으로 판단하였으며, 이를 검증하기 위하여 상대측위에 기준이 되는 상시관측소를 교체하여 수직변위에 대한 주기를 검출하였다. 비교대상으로 국토지리정보원의 광주(KWNJ) 상시관측소 자료를 기준으로 제주 조위관측소의 해양조석하중 성분 검출을 실시하였으며, 대전을 기준으로 한 주기 검출 결과와 비교하였다. 비교 결과 대전을 기준으로 하는 FFT 결과에서는 아래 그림 Fig. 11과 같이 일주주 성분의 주기가 검출되고 광주를 기준으로 한 검출에서는 Fig. 12와 같이 단주기 성분이 검출되는 결과가 나타났다. 이를 통하여 상대측위의 경우 기준이 되는 상시관측소의 영향이 해양조석하중 성분 검출에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있었다.

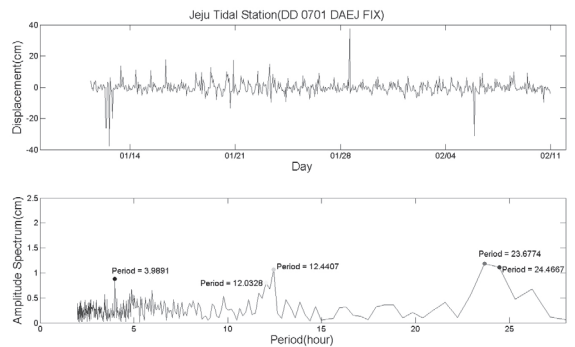


Fig. 11. FFT result of Jeju (DD, 2hours, 1month, DAEJ FIX)

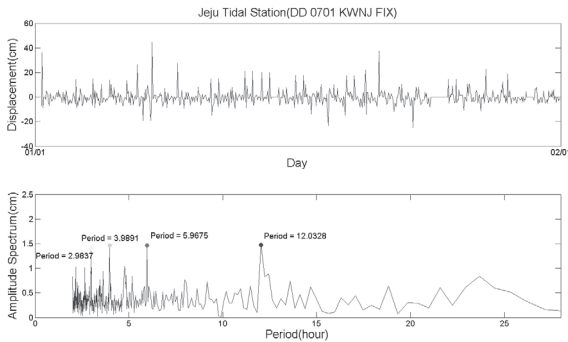


Fig. 12. FFT result of Jeju (DD, 2hours, 1month, KWNJ FIX)

4. 결론

본 연구에서는 GNSS 처리방법과 처리시간 간격에 따른 해양조석하중 조석성분 검출 정확도를 비교하였다. 결과 분석을 위하여 우리나라 인천과 제주 조위관측소 2곳의 GNSS 자료를 상대측위와 정밀절대측위 방법으로 처리하여 해양조석하중에 의한 수직변위를 산출하고 조화분해를 통하여 8개 조석분조에 대한 진폭을 추정하였다. 이렇게 추정된 진폭은 전지구 해양조석하중 모델의 진폭과 비교하여 조석성분의 검출 정확도를 확인하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리나라에 적합한 전지구 해양조석하중 모델을 분석하였다. 현재 Onsala Space Observatory에서 제공되고 있는 모델 중 전반적으로 우리나라에 적합한 해양조석하중 모델은 FES 2004 모델로 판단되었으며, 다른 조석모델의 경우 동·남·서해의 지역에 따른 편차가 나타났다.

둘째, 자료처리 시간 단위에 따른 해양조석하중 조석성분 검출을 분석한 결과 2시간 단위의 처리가 조석성분 검출에 안정적이었다. 실험결과 측위 잔차가 크면 단주기 성분이 검출되는 현상이 나타났으며, 산출된 수직좌표의 FFT 결과 1시간 단위의 처리는 단주기 성분이 조석성분 주기보다 크게 검출되었으며, 2시간 단위의 처리는 단주기가 감소하고 조석성분의 주기가 검출되는 것을 볼 수 있었다. 이는 상대측위와 절대측위에서 동일한 결과를 나타냈으며, 이를 기반으로 2시간 간격의 Moving Window 방법을 이용하여 GNSS 데이터를 처리하였다.

셋째, 정밀절대측위방식과 상대측위방식의 해양조석하중 조석성분 검출 정확도를 비교한 결과 8개 분조의 진폭이 정밀절대측위방식이 상대측위보다 전지구 해양조석하중 모델과

유사하게 검출되었다. 이러한 원인으로서는 상대측위의 경우 기준점이 되는 관측 자료가 수직변위를 산출하는데 영향을 주어 해양조석하중 성분을 검출하는데 영향을 준 것으로 사료되며, 정밀절대측위의 경우 해당지점의 절대적인 수직변위가 측정되어 해양조석하중의 분조 성분을 검출하는데 적절한 것으로 판단되었다. 그러므로 GNSS를 이용한 해양조석하중 성분을 검출하는 처리방식은 정밀절대측위가 더 좋은 처리방법으로 판단되었다.

향후에는 데이터 처리기간을 확대하여 장주기 분조 검출에 대한 연구가 필요할 것이며, 상대측위 시 기준이 되는 지점의 유효성 검사 등을 통하여 해양조석하중 검출에 영향을 주는 요소에 대한 검증이 필요할 것이다. 또한 우리나라의 정밀한 측위 결과를 산출하기 위하여 연구범위를 전국 GNSS 상시관측소로 확대하여 우리나라 해양조석하중 모델 개발을 위한 연구도 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술정보연구원에서(미래창조과학부) 수행하는 '초고성능컴퓨팅기반 국가현안 대응체계 구축사업'의 공동연구로 수행되었습니다. 본 연구의 GNSS Data를 제공해주신 한국천문연구원·국립해양조사원·국토지리정보원에 감사드립니다.

References

- Cho, C. (2002), *Terminology Dictionary of Ocean*, Hansungsa, Seoul, Korea.
- Cho, K. (2001), *Fluctuating Characteristics of Tidal Harmonic Constants and Analysis of Tide Level Prediction at Incheon Harbor*, Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea, 85p. (in Korean with English abstract)
- Jang, S. (1999), *Coastal Oceanography*, Sigma-press, Seoul, Korea.
- Kang, Y. (2012), *Numerical Simulation for Formulation of the Korean Peninsula Shoreline*, Ph.D. dissertation, Chonnam National University, Gwangju, Korea, 124p. (in Korean with English abstract)
- King, M. (2006), Kinematic and static GPS techniques for estimating tidal displacements with application to antarctica, *Journal of Geodynamics*, Vol. 41, No. 1, pp.

77-86.

- Melachroinos, S.A., Biancale, R., Llubes, M., Perosanz, F., Lyard, F., Vergnolle, M., Bouin, M.N., Masson, F., Nicolas, J., Morel, L., and Durand, S. (2008), Ocean tide loading displacements from global and local grids : comparisons to GPS estimates over the shelf of brittany, *Journal of Geodesy*, Vol. 82, No. 6, pp. 357-371.
- Petit, G. and Luzum, B. (2010), *IERS Conventions*, Bureau international des poids et mesures severs, IERS Technical Note No. 36, France.
- Won, J. (2009), *Detection of Ocean Tide Loading Constituents Using GPS Precise Point Positioning*, Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea, 54p. (in Korean with English abstract)
- Won, J. and Park, K. (2009), Detection of ocean tide loading constituents based on precise point positioning by GPS, *Journal of Astronomy and Space Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 511-520. (in Korean with English abstract)
- Yoon, H. (2015), *Determination of Ocean Tide Loading Constituents Using GPS Measurements at Tidal Station*, Ph.D. dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea, 174p. (in Korean with English abstract)
- Yoon, H. and Choi, Y. (2016), Accuracy analysis of ocean tide loading constituents detection by GPS ambiguity fixing, *8th Korea spatial information society workshop*, 29-30 Jan., Jeju, Korea, Vol. 1, pp. 99-100. (in Korean)
- Yuan, L. (2009), *Determination of Tidal Displacements Using the Global Positioning System*, Ph.D. dissertation, The Hong Kong Polytechnic University, China, 203p.
- Yun, H. and Lee, D. (2003), Determination of ocean tidal loading components at GPS permanent stations, *Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 21, No. 4, pp. 317-322. (in Korean with English abstract)
- Yun, H., Lee, D., and Song, D. (2007), Determination of vertical displacements over the coastal area of Korea due to the ocean tide loading using GPS observations, *Journal of Geodynamics*, Vol. 43, pp. 528-541.