J. Korean Soc. Oceanogr. Vol.24, No.4, pp.495-508, 2019 FREE ACCESS

Article

https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.4.495
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

# 서해안과 남해안에서 1999년부터 2017년까지 최저와 최고 천문조위 계산

변도성[1*] · 최병주[2] · 김효원[1]
[1]국립해양조사원 해양과학조사연구실, [2]전남대학교 해양학과

# Estimation of the Lowest and Highest Astronomical Tides along the west and south coast of Korea from 1999 to 2017

DO-SEONG BYUN[1*], BYOUNG-JU CHOI[2] AND HYOWON KIM[1]
[1]Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Busan 49111, Korea
[2]Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

***Corresponding author:** dsbyun@korea.kr
**Editor** Jong Jin Park
**Received** 25 August 2019; **Revised** 26 November 2019; **Accepted** 26 November 2019

**ABSTRACT**

조석현상이 뚜렷한 연안에서 항해, 연안 구조물 설계, 해양영토 획정, 침수범람 예보 등을 위하여 여러 조위 기준면들(tidal datums)이 사용된다. 우리나라 수로학 분야와 해안공학 분야에서는 수심을 측량하는 기본 수준면(datum level)으로 약최저저조위(ALLW)를 사용하고, 해안선과 안전수직높이(vertical clearances) 기준면으로는 약최고고조위(AHHW)를 사용하고 있다. 그러나 최근에 미국, 호주, 영국을 포함하여 국제적으로는 최저 천문조위(LAT)와 최고 천문조위(HAT)를 기본 수준면과 안전수직높이의 기준면으로 사용하고 있다. 이 연구에서는 서해안과 남해안 9개 조위 관측소에서 19년(1999-2017년) 동안 1시간 간격으로 관측한 해수면 높이 자료를 '19년 벡터평균 분석', '19년 연속 분석', '1년 연속 분석' 방법으로 각각 1분 간격으로 19년간 예측한 조위로부터 LAT와 HAT를 계산하였다. 이 연구에서는 19년 연속 관측자료의 조석 조화분해와 19년 연속 조석 예측에 모두 적합한 UTide 프로그램을 사용하였다. 각 조위 관측소에서 '19년 벡터평균 분석'과 '19년 연속 분석' 방법으로 각각 계산한 LAT 또는 HAT 값들의 차이는 대부분 ±1 cm 미만으로 큰 차이를 보이지 않았으며, 이 두 방법은 서로 거의 일치하는 결과를 생산하였다. 반면에 각 조위 관측소에서 19년간 연속 관측한 자료를 연별로 19개로 나누어 각각 1년 자료씩 조석 조화분해한 후 각각 19년간 조위를 예측한 '1년 연속 분석' 방법은 서로 크게 다른 19개의 LAT와 HAT 값들을 산출하였으며, 그 19개들의 표준편차는 3~7 cm이었다. '1년 연속 분석' 방법으로 구한 이들 값들은 '19년 연속 분석' 방법으로 산출 값과 비교하면 서해안과 남해안에서 LAT는 -16.4~10.7 cm의 차이를 보였으며, HAT는 −8.2~14.3 cm의 차이를 보였다. 계산된 LAT와 HAT를 ALLW와 AHHW와 정량적으로 비교했을 때, 서해안과 남해안에서 LAT는 ALLW보다 평균적으로 46.2 cm 더 낮았으며, HAT는 AHHW보다 평균적으로 33.6 cm 더 높았다. 이러한 차이에 가장 크게 기여하는 분조는 ALLW와 AHHW 계산에 고려되지 않은 진폭이 비교적 큰 $S_a$와 $N_2$ 분조이었다. 또한 천해분조가 강하게 발달한 내만에서는 $M_4$와 $MS_4$ 분조가 추가적으로 그 차이에 상당히 기여하였다. LAT와 ALLW 간 차이와 HAT와 AHHW 간 차이가 같지 않은 이유는 ALLW와 AHHW를 계산할 때는 주요 4대 분조의 진폭만을 사용하지만 LAT와 HAT를 계산할 때는 실질적으로 67개 분조의 진폭뿐만 아니라 지각도 사용하기 때문이다.

Tidal datums are key and basic information used in fields of navigation, coastal structures' design, maritime boundary delimitation and inundation warning. In Korea, the Approximate Lowest Low Water (ALLW) and the Approximate Highest High Water (AHHW) have been used as levels of tidal datums for depth, coastline and vertical clearances in hydrography and coastal engineering fields. However, recently the major maritime countries including USA, Australia and UK have adopted the Lowest Astronomical Tide (LAT) and the Highest Astronomical Tide (HAT) as the tidal datums. In this study, 1-hr interval 19-year sea level records (1999-2017) observed at 9 tidal observation stations along the west and south coasts of Korea were used to calculate LAT and HAT for each station using 1-minute interval 19-year tidal prediction data yielded through three tidal harmonic methods: 19 year vector average of tidal harmonic constants (Vector Average Method, VA), tidal harmonic analysis on 19 years of continuous data (19-year Method, 19Y) and tidal harmonic analysis on one year of data (1-year Method, 1Y). The calculated LAT and HAT values were quantitatively compared with the ALLW and AHHW values, respectively. The main causes of the difference between them were explored. In this study, we used the UTide, which is capable of conducting 19-year record tidal harmonic analysis and 19 year tidal prediction. Application of the three harmonic methods showed that there were relatively small differences (mostly less than ±1 cm) of the values of LAT and HAT

Copyright © 2019 Journal of the Korean Society of Oceanography.

calculated from the VA and 19Y methods, revealing that each method can be mutually and effectively used. In contrast, the standard deviations between LATs and HATs calculated from the 1Y and 19Y methods were 3~7 cm. The LAT (HAT) differences between the 1Y and 19Y methods range from −16.4 to 10.7 cm (-8.2 to 14.3 cm), which are relatively large compared to the LAT and HAT differences between the VA and 19Y methods. The LAT (HAT) values are, on average, 33.6 (46.2) cm lower (higher) than those of ALLW (AHHW) along the west and south coast of Korea. It was found that the $S_a$ and $N_2$ tides significantly contribute to these differences. In the shallow water constituents dominated area, the $M_4$ and $MS_4$ tides also remarkably contribute to them. Differences between the LAT and the ALLW are larger than those between the HAT and the AHHW. The asymmetry occurs because the LAT and HAT are calculated from the amplitudes and phase-lags of 67 harmonic constituents whereas the ALLW and AHHW are based only on the amplitudes of the 4 major harmonic constituents.

**Keywords:** Sea level change, Tidal observation station, High tide, Low tide, Datum level

## 1. 서 론

조석 현상이 뚜렷한 연안해역에서 조위 기준면들은 항해 안전(수심), 각종 연안(항만) 건설 · 매립 공사, 해양경계 획정, 해안선 결정 등에 사용되는 매우 중요한 기본 정보이다. 이와 관련하여 국제수로기구(International Hydrographic Organization, IHO)는 해도의 기준면(기본 수준면)으로 최저 천문조위(Lowest Astronomical Tide, LAT)를, 항해 안전을 위하여 연육교 등을 통항하는 선박의 높이를 제한하기 위한 안전수직높이(vertical clearances)의 기준면으로 최고 천문조위(Highest Astronomical Tide, HAT) 또는 매우 유사한 높이의 기준면 사용을 결의하였다(IHO, 2018). 현재 미국, 영국, 호주, 뉴질랜드, 프랑스 등 여러 나라에서 수로업무에 LAT와 HAT를 조위 기준면으로 채택하여 사용하고 있다. 또한 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission)에서도 연안풍력 발전단지(offshore wind turbine system) 설계에 기초적으로 필요한 수위(water level)의 기준면으로 LAT와 HAT 사용을 제안하고 있다(Ko et al., 2018).

한편 우리나라의 국가 수로업무를 담당하고 있는 국립해양조사원에서는 현재까지 '인도양대조저조면(Indian Spring Low Water)'이라 부르는 '약최저저조위(Approximate Lowest Low Water, ALLW)'를 해도와 조석표의 조위 기준면으로 사용해 오고 있으며, 해안선과 안전수직높이의 기준면으로 '약최고고조위(Approximate Highest High Water, AHHW)'를 사용해 오고 있다. 이들 기준면은 각각 그 해역의 평균해수면을 기준으로 주요 조석 4대 분조 진폭들의 합만큼 내리거나 올린 면이다. 특히, AHHW는 조석 또는 폭풍해일에 의한 해안 해수침수의 위험을 알리는 해수위 정보 제공시스템의 위험 정도의 단계를 결정하는 기초 정보로 활용되고 있다.

기준면과 수준점(datums and benchmarks) 산출과 관련하여 IHO의 회원국들은 "LAT와 HAT는 최소 1년 동안 관측된 해수면 자료로부터 산출된 조석 조화상수를 사용하여 최소 19년 동안 예측한 조위 값으로부터 구해야 한다."고 결의하였다(IHO, 2018). 이 결의에는 LAT와 HAT를 산출하는 방법에 관해 최소한의 규정을 담고 있다. 지금까지 국내에서 조위 관측소 자료들을 이용한 LAT와 HAT 산출과 관련한 연구들이 수행되었지만(Kim et al., 2008; Jeong et al., 2016; Ko et al., 2018), 산출 방법에 관한 구체적인 설명이 없었으며, 더욱이 여러 산출 방법들의 결과를 서로 비교한 연구도 없었다. 이점이 이 연구를 수행하게 된 동기이다. Jeong et al.(2016)과 Ko et al.(2018)는 결측이 많은 해를 제외한 여러 해에 걸쳐 각 해 1년 관측자료로부터 조석 조화분해 · 예측방법을 통해 그 해의 1년 조석을 예측하여 각 해마다 LAT와 HAT를 산출한 후 이들 조위 기준면 각각에 대하여 95% 신뢰구간을 추정하고 이 신뢰구간의 하한(lower limit)을 LAT로, 상한(upper limit)을 HAT로 정하는 방법을 제시하였으나, 이들 연구 또한 각 해에 대한 LAT와 HAT 산출 방법에 대한 구체적인 설명은 없으며, 특히 이 방법은 그 해역에서 주요 분조의 교점 인자(nodal factor) 값이 큰 해에 다량의 결측이 발생하여 그 해의 자료를 분석에 사용할 수 없을 경우에는 LAT와 HAT 산출 값이 과대·과소평가 될 수 있다.

IHO 회원국들이 LAT와 HAT를 조위 기준면으로 사용하는 것에 대하여 1997년에는 '권고' 수준(Jeong et al., 2016)으로 결의하였으나 2018년에는 '사용'(IHO, 2018)으로 결의한 상황이다. 이 연구는 현재 국립해양조사원에서 조위 기준면으로 사용 중인 ALLW (AHHW)가 주요 해양 국가에서 사용 중인 방법에 따라 산출된 LAT (HAT)와 어느 정도 차이를 보이는지를 조사하고, 이를 통해 현재 사용 중인 ALLW (AHHW)가 IHO(2018)에서 결의한 '매우 유사한 기준면'에 해당하는지를 객관적으로 알아보고자 한다. 이를 위해 먼저 제2장에서 주요 해양 국가들의 LAT와 HAT 산출 방법들에 관해 조사하였다. 파악된 이들 방법들에 따라 제4장에서 우리나라 주요 항만에 위치한 조위 관측소들에서 19년 연속 관측한 장기 해수면 높이 자료를 사용하여 LAT와 HAT를 각각 구하고, 이들 조석 조화분해 진폭 결과를 이용하여 ALLW과 AHHW를 산출한 후에 LAT와 ALLW 간 차이 그리고 HAT와 AHHW 간 차이를 비교하였다. 아울러 일반적으로 많이 사용되고 있는 조석 조화분해 프로그램들이 장기 연속 관측자료를 조석 조화분해할 수 있는 능력이 있는지와 장기 연속 조위를 예측할 수 있는지 그 성능을 조사하였다.

## 2. 미국, 호주, 영국의 LAT와 HAT 산출 방법

해도의 기준면으로 LAT를 채택한 대표적인 해양국가인 미국, 호주, 영국의 수로 업무를 담당하고 있는 해당 기관의 담당자들에게 서면 질의하여 LAT와 HAT를 산출하는 방법에 관해 조사하였다. 각 기관이 조석 분석에 사용하는 해수면 높이 관측자료 간격 · 기간, LAT와 HAT 산출방법, 분석 프로그램에 대해 조사하였다. 먼저, 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 국립해양서비스(National Ocean Service, NOS)는 'tidal datum epoch'라 부르는 특정 19년 기간(1983-2001년) 동안 1시간 간격으로 관측한 해수면 높이 자료 전체를 조석 조화분해한 후, 이 결과를 이용하여 해수면 높이의 고조와 저조만의 시계열을 직접 계산하는 고·저조 예측프로그램을 사용하여 LAT와 HAT를 산출하고 있다. 전체 표준 조위 관측소에서 동일한 기간 동안 관측한 해수면 높이 자료를 사용하여 이들 값들을 산출한다는 것이 특징적이다. NOS는 'tidal datum epoch'를 2019년 현재 1983~2001년에서 2~3년 후에는 2002~2020년으로 바꿀 계획이다. 이처럼 'tidal datum epoch'를 매 20년마다 재설정하여 조위 기준면 산정 시에 기후변화에 의한 해수면 변동을 고려해 주고 있다.

두 번째로, 호주 수로국(Australian Hydrographic Office, AHO)은 호주 기상청(Bureau of Meteorology, BoM)으로부터 제공받은 LAT를 1994년부터 해도 기준면으로 사용해 오고 있다. 1시간 간격으로 특정 20년 동안 관측한 해수면 높이 관측자료를 조석 조화분해한 후 이들 조화상수들을 이용하여 1분 간격으로 조석을 예측하여 LAT와 HAT를 구한다. 이들 값들을 구할 때 미국 NOAA NOS와 유사하게 1992년부터 2011년까지 20년 간 'tidal datum epoch'를 설정하여 산출하고 있다. 호주 기상청이 사용하는 또 다른 방법은 'tidal datum epoch' 기간의 20년 관측자료를 1년씩 조석 조화분해한 후, 이렇게 연별로 구한 분조별 진폭과 지각을 극좌표계 상에서 거리와 각도로 보고 표시한 후에 직각좌표계 상에서 x-방향 성분과 y-방향 성분 값으로 나누어 각각 벡터 평균(vector average)한 결과를 다시 극좌표계 상의 값(진폭과 지각)으로 변환하여 조석 조화상수를 구하는 방법이다. 이렇게 구한 분조별 조석 조화상수를 사용하여 1분 간격으로 20년 동안 조석을 예측하여 예측 조위 중에서 최솟값을 LAT와 최댓값을 HAT로 정의하여 구한다.

마지막으로 전 세계 해도와 항해용 책자를 제작 · 공급을 담당하고 있는 영국 수로국(UK Hydrographic Office, UKHO)은 LAT와 HAT를 산출할 때 과거에는 호주처럼 벡터 평균한 방법을 사용하였으나 최근에는 새로운 방법을 사용한다. 영국 수로국은 LAT와 HAT를 장기관측 자료가 있는 표준 조위 관측소(standard ports)뿐만 아니라 단기간 관측이 수행된 보조 조위 관측소(secondary ports)에 대해서도 계산하는 것이 특징적이다. 과거에는 장기 해수면 높이 관측자료(최소 2년에서 최대 19년까지)의 확보가 가능한 표준 조위 관측소의 경우 호주 기상청에서처럼 1시간 간격의 관측자료를 연별로 조석 조화분해한 후, 연별로 산출된 각 분조별 조화상수를 벡터 평균한 후, 이 벡터 평균한 분조별 조화상수를 이용하여 19년 간 조석을 예

측하였다. 19년 동안 매년 1분 간격으로 예측한 조석자료로부터 매 조석 주기별로 가장 작은 값(저조)과 큰 값(고조)을 저장하고, 이들 저장된 저·고조 값들 중에 가장 작은 값(LAT)과 가장 큰 값(HAT)을 구하였다. 그러나 최근에는 조석 예측에 필요한 조석 조화상수들을 벡터 평균한 방법으로 구하지 않고, 영국 해양센터(UK National Oceanography Centre)에서 개발한 윈도우 버전의 'Tidal Analysis Software Kit (TASK)' (UK National Oceanography Centre, 2015)를 사용하여 19년 관측자료를 통째로 조석 조화분해하여 예측에 필요한 조화상수를 산출하고 있다. 이 조석 조화분해 소프트웨어는 포트란(Fortran) 버전의 TASK-2000 (Bell et al., 1999) 소프트웨어의 계산 알고리즘을 수정하여 19년 이상의 장기 연속 관측자료에 대해서도 조석 조화분해가 가능하도록 개선되었다. 또한 조석 조화분해에 사용되는 관측자료는 동일 시간 간격인 1시간 간격뿐만 아니라 6분, 10분, 12분, 15분, 30분 간격도 가능하다. 한편, 단기 해수면 높이 관측이 이루어진 보조 조위 관측소의 경우, 이들 관측자료를 조화분해하여 각 분조에 대하여 조석 조화상수들을 찾고 그 결과만을 사용하여 19년 동안의 조석을 1분 간격으로 예측하여 LAT와 HAT를 구하고 있다. 영국 수로국은 매년 발간하는 조석표에 발간 해부터 향후 19년 동안에 대하여 추산한 LAT와 HAT를 싣고 있다. 예를 들어, 2019년에 발간하는 2020년 조석표에 이들 값을 싣기 위해 2019년부터 2037년까지 예측한 1분 간격 조석자료로부터 LAT와 HAT를 구한다. 이때 계산에 사용되는 조석 조화상수는 매년 재산정하지 않고, 해수면 높이 관측자료가 새로 분석해야 할 정도로 충분히 확보될 때에 조석 조화분해를 다시 실시하여 LAT와 HAT를 구하고 있다. 참고로, 영국 수로국에서 사용하는 해도의 기준면은 엄밀히 말해서 LAT 조위면이 아닌 대략적인 LAT면(the approximate level of LAT)이다. 그 이유는 해도 기준면(chart datum)을 결정할 때 계산된 LAT에 여유고(safety buffer)로 20 cm를 추가적으로 더 낮추어 해도의 기준면을 삼음으로써 항해 안전을 도모하고 있기 때문이다.

## 3. 자료 및 방법

이 연구에서는 LAT와 HAT의 산출 대상 조위 관측소로 19년 이상 연속 해수면 높이 관측이 이루어진 국립해양조사원의 9개 조위 관측소(인천, 안흥, 보령, 목포, 완도, 여수, 통영, 부산, 제주)를 선정하였다(Fig. 1). 보통 조석 조화분해 시에 사용되는 1시간 간격의 해수면 높이 관측자료를 사용하였으며, 일반적인 조석 예측과 유사한 방법으로 해수면 높이 관측자료를 조석 조화분해한 후 그 결과로 조석을 예측하는 과정을 따랐다(Byun, 2007). 분석에 사용된 해수면 높이 관측자료는 국립해양조사원의 1차 자동 품질관리(오류값 검사, 한계범위 검사, 튄 값 검사 등)와 2차 수동 품질관리(인근 조위 관측소 자료 비교, 결측 구간 보간 등)를 거친 자료들이다. 조석 조화분해 · 예측을 위해 19년 이상 장기 관측자료의 조석 조화분해와 예측이 가능한 MATLAB 소프트웨어 기반의 UTide (Codiga, 2011) 프로그램을 사용하였다. UTide는 조석 조화분해를 위해 사용되는 'ut_solv.m'와 조석 예측을 위해 사용되는 'ut_reconstr.m'으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 편의상 임의로 1999년부터 2017년까지 19년간을 'tidal datum epoch'으로 설정하였다. 앞에서 살펴본 미국(NOS), 호주(BoM), 영국(UKHO)의 추산 방법과 더불어 IHO(2018)의 산출 규정을 바탕으로 다음과 같이 세 가지 조석 조화분해 방법들을 도출하였으며, 이 방법들을 바탕으로 LAT와 HAT를 산출하였다.

UTide는 1년 해수면 높이 자료를 조석 조화분해하면 기본적으로 $S_a$, $M_2$, $S_2$, $K_1$, $O_1$ 등의 분조들을 포함한 총 67개 분조들에 대한 조화상수가 산출되며, 이 67개 분조들의 조화상수를 사용하여 조석을 예측하였다. 그러나 19년 해수면 높이 자료를 조석 조화분해하면 상대적으로 진폭이 크지 않은 28.9112506°/hr의 각속도를 갖는 $\gamma_2$ 분조를 하나 더 포함한 총 68개 분조들에 대한 조화상수가 산출되며, 이 68개 분조들의 조화상수를 사용하여 조석을 예측하였다.

임의 관측지점에 대한 조석 조화분해 결과인 분조별 조화상수를 이용한 그 지역 표준시($t$) 기준의 평균해수면을 기준으로 한 예측 조위($H(t)$)는 다음과 같이 표현할 수 있다(Byun and Cho, 2009).

$$H(t) = \sum_{i=1}^{n} f_i(t) a_i \cos[Greenwich\,(V_0(t) + u(t))_i - g_i] \tag{1}$$
$$= \sum_{i=1}^{n} f_i(t) a_i \cos[\omega_i \tau + Greenwich\,(V_0(t_0) + u(t))_i - g_i]$$

여기서, $n$은 예측에 사용된 조석 분조 총 개수, $f_i$와 $u_i$는 각각 달 교점의 경도에 따라 18.61년 주기로 변하는 분조(constituent) $i$의 평균진폭($a_i$)을 보정하기 위한 교점 인자(nodal/satellite factor)와 교점 각(nodal/satellite factor)이다. $a_i$와 $g_i$는 각각 분조 $i$의 평균 진폭(amplitude)과 한국 표준시간대 지각(local time zone phase), $\omega_i$(°/hr)는 분조 $i$의 각속도, $\tau$는 기준 시각($t_0$)으로부터 경과된 시각($t - t_0$), $V_{0_i}$는 (가상)천체(분조 $i$)의 위치를 나타내는 천문 위상각(astronomical argument)이다.

조석을 예측하는 첫 번째 방법으로, 1999년부터 2017년까지 19년 동안 매년(369일) 1시간 간격의 해수면 높이 관측자료를 조석 조화분해한 후, 이들 19개의 1년 조석 조화분해 결과를 각 분조별 조화상수를 벡터 평균(vector average)하였다(Fig. 2).

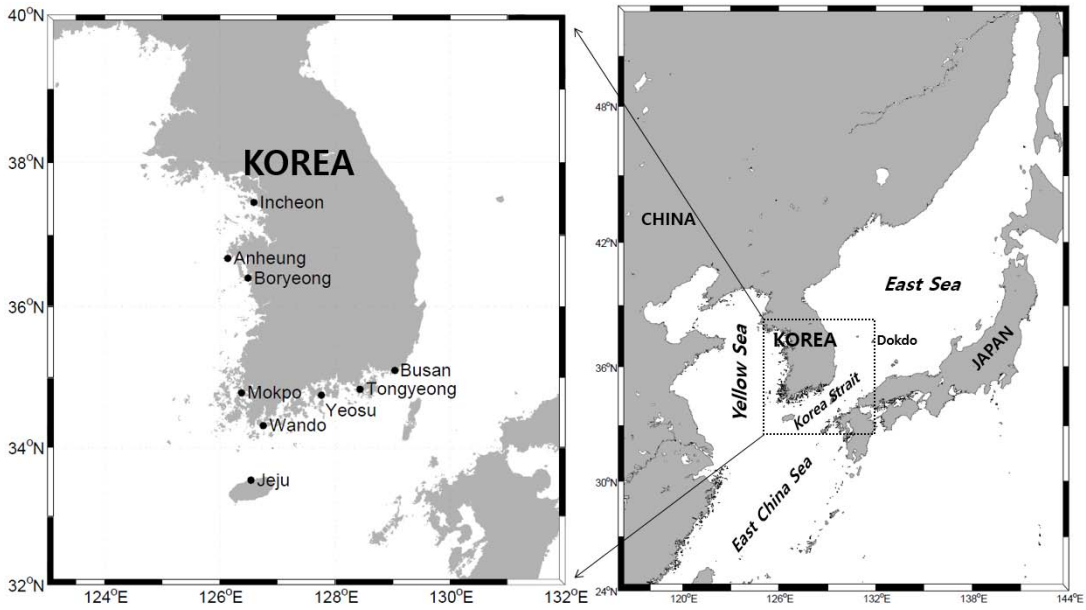


Fig. 1. Locations of the tidal observation stations (●) along the west and south coasts of Korea.

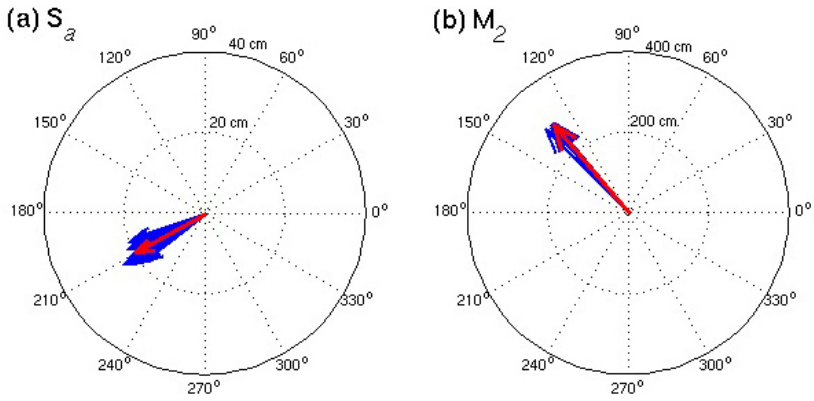


Fig. 2. Examples of vector averaging for (a) the $S_a$ and (b) the $M_2$ tidal constants derived from tidal harmonic analysis on annual Incheon sea level data over 19 years (1999-2017). Blue vectors are 19 vectors of annual tidal constants and red vector is the average vector.

조석 조화상수를 벡터 평균하는 예시로 인천 조위 관측소에 대한 19년간 연별 $S_a$와 $M_2$ 분조 조화상수들의 벡터 평균을 제시하였다. 우리나라 서해안과 남해안에 위치한 조위 관측소들에 대하여 19년 동안 각 연도별로 조석 조화상수들을 구하고, 이들 67개 분조별 조화상수를 벡터 평균한 조석 조화분해 결과를 사용하여 19년 동일 기간 동안 1분 간격으로 조석에 의한 해수면 높이를 예측하여 LAT와 HAT를 산출하였다. 편의상 앞으로 이 방법을 '19년 벡터평균 분석(Vector Average Method, VA)'으로 부르도록 하겠다. 두 번째 방법으로, 1999년부터 2017년까지 19년 동안 1시간 간격으로 관측된 해수면 높이 자료를 전체 사용하여 조석 조화분해한 후, 이들 68개 조석 조화분해 결과를 이용하여 19년 동일 기간 동안 1분 간격으로 조석을 예측하여 LAT와 HAT 값을 산출하였다. 앞으로 이 방법을 '19년 연속 분석(19-year Method, 19Y)'으로 부르도록 하겠다. 세 번째 방법으로, 1999년부터 2017년까지 19년 동안 매년(369일) 1시간 간격의 해수면 높이 관측자료를 사용하여 조석 조화분해한 후, 이들 각 해의 1년 조화분해 결과로 동일한 19년 기간에 대하여 1분 간격으로 조석을 예측하여 LAT와 HAT를 산출하였다. 편의상 이 방법을 '1년 연속 분석(1-year Method, 1Y)'으로 부르도록 하겠다.

정리하면, 이들 세 가지 조석 예측 방법의 주된 차이는 조석 예측을 위해 사용할 분조별 조화상수를 결정하는 과정과 관측자료의 길이에 있으며, 조석에 의한 해수면 높이 예측자료를 생산하는 과정과 방법은 동일하다.

## 4. 결 과

### 4.1 조화상수 결정 방법별 LAT와 HAT

선정된 9개의 조위 관측소들(Fig. 1)을 대상으로 19년 연속 관측자료의 조석 조화분해와 19년 연속 조석예측이 가능한 UTide (Codiga, 2011) 프로그램을 사용하여 앞에서 설명한 세 가지 LAT와 HAT 산출 방법(19년 벡터 평균 분석, 19년 연속 분석, 1년 연속 분석)에 따라 이들 값들을 구하였다. 먼저, 공통적으로 19년 관측자료를 사용하는 두 가지 방법('19년 벡터평균 분석', '19년 연속 분석')에 의한 산출 결과를 비교하였다(Table 1). 전체 대상 조위 관측소 중 인천 · 안흥 조위 관측소를 제외한 '19년 벡터평균 분석' 결과와 '19년 연속 분석' 결과 간 LAT 차이(△LAT)는 −0.8~0.4 cm이었으며, 인천 조위 관측소를 제외한 이들 HAT 차이(△HAT)는 -0.3~0.7 cm로 두 방법으로 계산한 LAT와 HAT가 모두 ±1 cm 미만의 매우 유사한 결과를 보였다. 가장 큰 차이 값을 보인 인천 조위 관측소의 경우, △LAT와 △HAT는 각각 −1.7 cm와 1.4 cm이었다(Table 1).

Table 1. LAT and HAT values for 9 Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA) tidal observation stations, calculated using 1-minute interval tidal prediction data (1999-2017) produced via two different approaches: the 19-year Method (19Y) and the Vector Average Method (VA)

| Station | 19-year (19Y) | | Vector Average (VA) | | Difference (VA-19Y) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | LAT (cm) | HAT (cm) | LAT (cm) | HAT (cm) | △LAT (cm) | △HAT (cm) |
| Incheon | -532.7 | 509.8 | -534.4 | 511.2 | -1.7 | 1.4 |
| Anheung | -394.0 | 385.3 | -395.1 | 386.0 | -1.1 | 0.7 |
| Boryeong | -424.9 | 420.0 | -425.5 | 420.7 | -0.6 | 0.7 |
| Mokpo | -315.8 | 279.5 | -316.6 | 280.0 | -0.8 | 0.5 |
| Wando | -239.7 | 226.7 | -240.2 | 226.8 | -0.5 | 0.1 |
| Yeosu | -212.5 | 211.4 | -212.7 | 211.5 | -0.2 | 0.1 |
| Tongyeong | -169.9 | 169.1 | -170.3 | 169.3 | -0.4 | 0.2 |
| Busan | -85.2 | 84.9 | -84.8 | 84.6 | 0.4 | -0.3 |
| Jeju | -182.8 | 157.5 | -182.9 | 158.2 | 0.1 | 0.7 |

따라서, 해수면 높이 관측자료의 품질이 좋다면 LAT와 HAT 산출에 있어서 '19년 벡터평균 분석'과 '19년 연속 분석' 방법이 비슷한 결과를 낸다는 것을 알 수 있다.

그렇다면, '19년 연속 분석'과 '19년 벡터평균 분석' 방법이 각각 어떠한 경우에 더 적절히 사용될 수 있는지를 알아보기 위해서 두 방법의 장 · 단점을 간단히 살펴볼 필요가 있다. '19년 연속 분석' 방법의 경우 '19년 벡터평균 분석' 방법과 달리 관측 시설이나 관측 장비 이상 또는 점검 등으로 19년 관측 기간 중 한두 달 이상 결측이나 자료 품질이 안 좋은 구간이 있어도 상대적으로 조석 조화분해 산출 결과에 큰 영향 없이 LAT와 HAT의 산출이 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 모든 조석 조화분해 프로그램이 19년 이상 연속 관측한 자료를 적절하게 조화분해 할 수 있는 것은 아니기 때문에 프로그램 사용상 제약이 있다. 이점에 관해선 제4.3절에서 자세히 살펴보겠다.

반면에, '19년 벡터평균 분석' 방법은 기본적으로 19년간 연도별로 1년간의 관측자료를 조석 조화분해하기 때문에 기존 고전적인 조석 조화분해 프로그램들을 그대로 사용할 수 있다는 강점이 있다. 또한 19년 동안 매년 1년 조석 조화분해 결과를 분조별로 비교할 수 있기 때문에 분석에 사용된 관측자료의 품질이 안 좋거나 결측이 많은 해를 쉽게 확인할 수 있다. 하지만 연별 관측자료 중 한두 달 이상 결측 구간이 있거나 자료의 품질이 안 좋아 분석에 사용할 수 없을 때에는 그 해 분석 결과를 신뢰할 수 없어 제외해야 하는 단점이 있다. 따라서, 특정 기간을 'tidal datum epoch'으로 설정하여 LAT와 HAT를 계산할 경우 상대적으로 '19년 연속 분석' 방법이 좀 더 사용하기 편한 방법이다.

더불어 19년 이상 장기 해수면 관측이 이루어지지 않은 조위 관측소의 경우에 부득이 하게 IHO(2018)에서 결의한 최소 기간인 1년(369일)간의 해수면 높이 자료를 사용하여 LAT와 HAT를 산출할 수밖에 없다. 이와 관련하여 '1년 연속 분석' 방법의 적합 정도를 알아보기 위해, 이 방법으로 19년(1999-2017년) 동안 각 해의 관측자료를 조화분해한 후, 동일한 조석예측 방법으로 19년간 조석을 추산하였다. 1분 간격으로 예측된 19년간의 조위자료로부터 LAT와 HAT를 각각 산출하고 이들을 통계 분석(평균, 표준편차, 최솟값, 최댓값)하여, 이들 조위 기준면(LAT와 HAT) 값들의 안정성(stability) 또는 불확실성(uncertainty)을 알아보았다. Table 2에 제시된 것처럼, 각 조위 관측소별로 산출된 19년 동안 각 해의 자료를 조석 조화분해하여 산출한 분조별 조화상수를 이용하여 만든 19개 LAT의 표준편차는 3.1~6.8 cm이었으며, 이들 HAT의 표준편차는 3.8~6.3 cm이었다. 산출된 LAT 값들의 최댓값과 최솟값의 차이는 12.0~26.3 cm의 범위를 보였으며, HAT 값들의 최댓값과 최솟값의 차이는 12.7~22.5 cm의 범위를 보였다. 이들 결과로부터 '1년 연속 분석' 방법은 LAT와 HAT 산출에 있어서 '19

**Table 2.** Statistical comparison of LAT and HAT variability (mean, standard deviation, maximum and minium) for 1-minute interval 19 year long tidal predictions (1999-2017) generated using the 1-year Method (1Y). max, min, and std stand for maximum, minium, and standard deviation, respectively

| Station | LAT (cm) | | | HAT (cm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | mean±std | min | max | mean±std | min | max |
| Incheon (IC) | -535.3±6.8 | -549.1 | -522.8 | 512.8±6.3 | 501.6 | 524.1 |
| Anheung (AH) | -396.0±3.1 | -402.3 | -390.3 | 386.0±4.1 | 380.1 | 396.2 |
| Boryeog (BR) | -426.7±3.4 | -433.4 | -420.8 | 420.8±4.5 | 413.6 | 432.4 |
| Mokpo (MP) | -318.3±6.0 | -329.3 | -305.1 | 281.0±5.8 | 271.7 | 292.0 |
| Wando (WD) | -240.8±3.4 | -246.1 | -234.2 | 227.0±4.3 | 220.1 | 234.0 |
| Yeosu (YS) | -213.4±4.3 | -222.7 | -206.1 | 211.6±4.6 | 204.0 | 218.5 |
| Tongyeong (TY) | -170.8±3.7 | -179.4 | -164.3 | 169.5±4.3 | 162.4 | 176.6 |
| Busan (BS) | -85.9±3.3 | -92.3 | -79.1 | 84.9±3.8 | 78.3 | 91.0 |
| Jeju (JJ) | -182.9±3.6 | -189.7 | -175.9 | 158.2±4.3 | 150.8 | 164.5 |

년 벡터평균 분석'과 '19년 연속 분석' 방법에 비해 상대적으로 안정도가 떨어진다(또는 불확실성이 크다)는 것을 알 수 있다. 즉, '1년 연속 분석' 방법은 사용된 관측 자료가 상대적으로 짧아서 우리나라 서해안과 남해안에서 19년 동안의 LAT와 HAT를 추정하면 각각 −16.4~10.7 cm와 −8.2~14.3 cm의 오차를 보인다(Tables 1, 2).

### 4.2 LAT와 ALLW 그리고 HAT와 AHHW의 관계

ALLW와 AHHW는 조석 조화분해로 산출된 주요 4대 조석 분조들의 진폭 값들만을 이용해서 구한다. 그 해역의 평균 해수면을 기준으로 그 해역의 주요 조석 4대 분조들($M_2$, $S_2$, $K_1$, $O_1$)의 진폭의 합만큼 내린 면이 ALLW이고 올린 면이 AHHW이다. 앞에서 9개 조위 관측소를 대상으로 '19년 연속 분석' 방법으로 구한 LAT와 HAT 값들과 이들 조석 예측에 사용된 조석 조화상수 중 주요 4대 분조들의 진폭의 합으로 구한 ALLW와 AHHW 값들을 각각 비교하여, 이들 값들이 서로 어느 정도 차이가 있는지 알아보았다(Table 3). 해역에 따라 LAT와 ALLW 간 차이(LAT-ALLW)는 −23.9 cm에서 −70.4 cm이었다. LAT-ALLW는 평균적으로 −46.2 cm이다. 이처럼 LAT가 ALLW보다 더 낮은 이유는 ALLW는 조석 조화분해 결과로 얻은 주요 4대 분조들만의 진폭 값들을 더하여 가상적으로 조석에 의해 대략적으로 가장 낮아질 수 있는 해수면 높이를 계산한 값이고, LAT는 모든 분조들의 조화상수를 사용하여 조석을 예측하여 19년 동안 조석에 의해 해수면이 가장 낮아지는 때의 높이를 계산한 것이기 때문이다. HAT 값과 AHHW 값 간 차이(HAT-AHHW)는 22.4 cm에서 42.7 cm이었다. HAT-AHHW는 평균적으로 33.6 cm이다. 특징적인 것은 정도에 차이가 있으나 9개 조위 관측소 모두 LAT와 ALLW 간 높이 차이가 HAT와 AHHW 간 높이 차이보다 더 크다.

추가적으로, 그 지역 평균 해수면을 기준으로 19년 동안 1분 간격으로 예측된 조위 값으로부터 저조 값과 고조 값들을 구하였다(Table 3). 이렇게 구한 저조(고조) 값들을 각각 가장 작은(큰) 순으로 나열하여, ALLW (AHHW)가 전체 저조(고조) 값들 중에서 상위 몇 % 위치에 있는지 알아보았다. 각 조위 관측소에서 계산된 ALLW는 전체 19년 동안 저조 값들 중에서 크기가 작은 순서로 상위 2.3~12.7% 사이에 속한 반면에, AHHW들은 고조 값 중에서 크기가 큰 순서로 상위 2.0~10.4% 사이에 속하였다.

**Table 3.** The values of ALLW (AHHW), height difference between LAT (HAT) and ALLW (AHHW), and low-tide (high-tide) exceedance (%) below (above) ALLW (AHHW) height which were calculated from the 19 year (1999-2017) of observation data at 9 tidal observation stations. The tidal harmonic analysis and tidal prediction were made over the same period. The LAT and HAT were calculated by the 19-year Method

| Station | Low tides | | | | High tides | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | LAT by 19Y Method (cm) | ALLW (cm) | Difference (LAT - ALLW) (cm) | % of low tide below ALLW height | HAT by 19Y Method (cm) | AHHW (cm) | Difference (HAT − AHHW) (cm) | % of high tides above AHHW height |
| Incheon (IC) | -532.7 | -467.5 | -65.2 | 4.5 | 509.8 | 467.5 | 42.2 | 2.0 |
| Anheung (AH) | -394.0 | -355.1 | -38.9 | 2.3 | 385.3 | 355.1 | 30.2 | 1.4 |
| Boryeong (BR) | -424.9 | -380.0 | -44.9 | 2.8 | 420.0 | 380.0 | 40.0 | 2.5 |
| Mokpo (MP) | -315.8 | -245.5 | -70.4 | 11.3 | 279.5 | 245.5 | 34.0 | 3.0 |
| Wando (WD) | -239.7 | -193.5 | -46.1 | 4.3 | 226.7 | 193.5 | 33.1 | 3.7 |
| Yeosu (YS) | -212.5 | -168.7 | -43.8 | 6.0 | 211.4 | 168.7 | 42.7 | 6.3 |
| Tongyeong (TY) | -169.9 | -134.7 | -35.2 | 6.0 | 169.1 | 134.7 | 34.4 | 6.2 |
| Busan (BS) | -85.2 | -61.3 | -23.9 | 12.7 | 84.9 | 61.3 | 23.6 | 10.4 |
| Jeju (JJ) | -182.8 | -135.2 | -47.6 | 6.2 | 157.5 | 135.2 | 22.4 | 2.4 |

이들 결과로부터 현재 우리나라에서 조위 기준면으로 사용 중인 ALLW (AHHW)는 IHO(2018)에서 결의한 LAT (HAT)에 상응하는 '매우 유사한 기준면'으로 보기 어렵다는 것을 확인할 수 있다(Table 3). 부산 조위 관측소의 경우, ALLW (AHHW) 값이 각각 전체 저조위에서 크기가 작은(큰) 순으로 상위 12.7% (10.4%)에 속하여 다른 조위관측소에 비하여 상대적으로 가장 큰 차이를 보였다(Figs. 3a and 3b). 그 이유는 $S_a$ 분조의 진폭이 10.9 cm로, $M_2$ 진폭(37.5 cm)과 $S_2$ 진폭(17.7 cm)에 이어 세 번째로 큰 분조임에도 불구하고 ALLW 값 계산 시에 이 분조를 사용하지 않기 때문이다(Table 4). 또한 목포 조위 관측소의 경우, AHHW는 전체 고조위 상위 3%로 다른 조위 관측소와 큰 차이를 보이지 않지만, ALLW 값은 전체 저조위 상위 11.3%로 부산 조위 관측소에 이어서 두 번째로 큰 차이를 보였다(Figs. 3c and 3d). 그 이유는 다른 조위 관측소와 달리 이곳은 조석 비대칭 현상을 생성하는 천해 분조가 잘 발달한 해역으로 $M_4$와 $MS_4$의 진폭이 각각 21.5 cm와 16.5 cm로 전체 분조 중 일곱 번째와 아홉 번째로 진폭이 크다(Table 4). 이와 더불어 $M_2$와 $M_4$ 분조의 지각 차이($2g_{M_2} - g_{M_4}$)는 242° (Table 4)로, 이들 지각 관계로 인해 고조보다 저조가 더 내려가게 된다(Fig. 4a). 또한 추가적으로 $MS_4$ 분조를 고려했을 때, $M_4$ 분조만을 고려했을 때보다 저조가 더 내려가는 것을 알 수 있다(Fig. 4b). 그럼에도 불구하고 ALLW 값 계산 시에 천해 분조 효과가 전혀 고려되지 않아 ALLW 값과 LAT 값 간 차이가 −71.5 cm로 상대적으로 가장 크게 나타나게 된다. 이 결과는 목포 조위 관측소 조석표에서 전형적으로 ALLW 이하의 조위 값들이 대조기 저조 때에 빈번하게 나타나는 이유를 잘 설명해 주며, 천해 조석이 강하게 발달한 해역의 조위 기준면 결정에 있어서 반일주조($M_2$, $S_2$)와 일주조($K_1$, $O_1$) 진폭만의 합으로 이루어진 ALLW 계산식 사용이 적절하지 않다는 것을 잘 보여준다. ALLW (AHHW)와 LAT (HAT) 간에 큰 차이가 나는 또 하나의 공통적인 이유는 $N_2$분조의 진폭이 주요 일주조($K_1$, $O_1$)의 진폭만큼 크다는 것이다(Table 4).

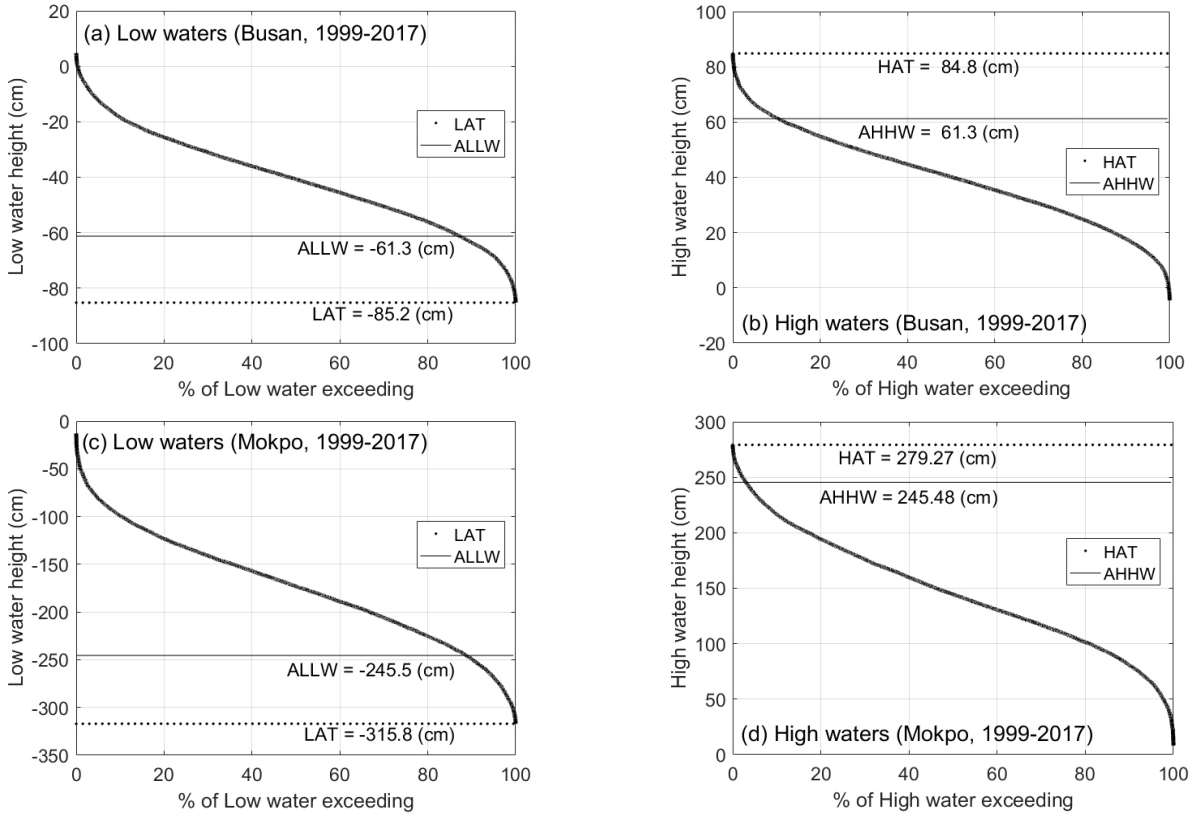


Fig. 3. (a, c) low-water and (b, d) high-water height exceedance curves relative to local mean sea level derived from the 19 years (1999-2017) data for Busan and Mokpo tidal stations.

**Table 4.** The eight major tidal harmonic constants estimated using the harmonic analysis on the hourly sea-level observation records from 1999 to 2017 (19 years) for nine tidal observation stations

| Constituent \ Station | | IC | AH | BR | MP | WD | YS | TY | BS | JJ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| amplitude (cm) | $M_2$ | 285.1 | 210.1 | 228.3 | 142.3 | 102.8 | 93.7 | 75.3 | 37.5 | 67.7 |
| | $S_2$ | 114.1 | 82.4 | 88.9 | 48.6 | 44.3 | 43.3 | 34.9 | 17.7 | 27.7 |
| | $N_2$ | 51.3 | 38.8 | 42.3 | 28.3 | 21.9 | 19,1 | 15.2 | 7.3 | 15.5 |
| | $K_1$ | 39.3 | 35.6 | 35.6 | 30.6 | 26.8 | 18.8 | 14.7 | 4.4 | 22.8 |
| | $O_1$ | 29.1 | 27.0 | 27.1 | 23.6 | 20.0 | 12.9 | 9.8 | 1.7 | 17.0 |
| | $S_a$ | 18.7 | 17.8 | 18.7 | 18.1 | 15.8 | 16.0 | 13.8 | 10.9 | 17.5 |
| | $M_4$ | 6.6 | 4.4 | 14.5 | 21.5 | 4.8 | 1.8 | 1.8 | 0.8 | 3.6 |
| | $MS_4$ | 6.2 | 3.2 | 10.4 | 16.5 | 3.2 | 1.3 | 1.2 | 0.5 | 2.4 |
| phase-lag (deg.) | $M_2$ | 130 | 102 | 94 | 38 | 297 | 260 | 252 | 239 | 315 |
| | $S_2$ | 187 | 155 | 148 | 88 | 330 | 295 | 288 | 276 | 344 |
| | $N_2$ | 110 | 80 | 73 | 18 | 283 | 249 | 242 | 229 | 300 |
| | $K_1$ | 303 | 290 | 286 | 252 | 206 | 183 | 180 | 147 | 220 |
| | O1 | 264 | 251 | 248 | 218 | 172 | 149 | 148 | 109 | 190 |
| | $S_a$ | 212 | 213 | 212 | 219 | 222 | 222 | 223 | 221 | 225 |
| | $M_4$ | 129 | 84 | 103 | 194 | 127 | 268 | 250 | 237 | 134 |
| | $MS_4$ | 194 | 135 | 152 | 260 | 185 | 306 | 288 | 270 | 196 |

Note that phase-lag is referenced to the local time zone (Korea Standard Time, KST).

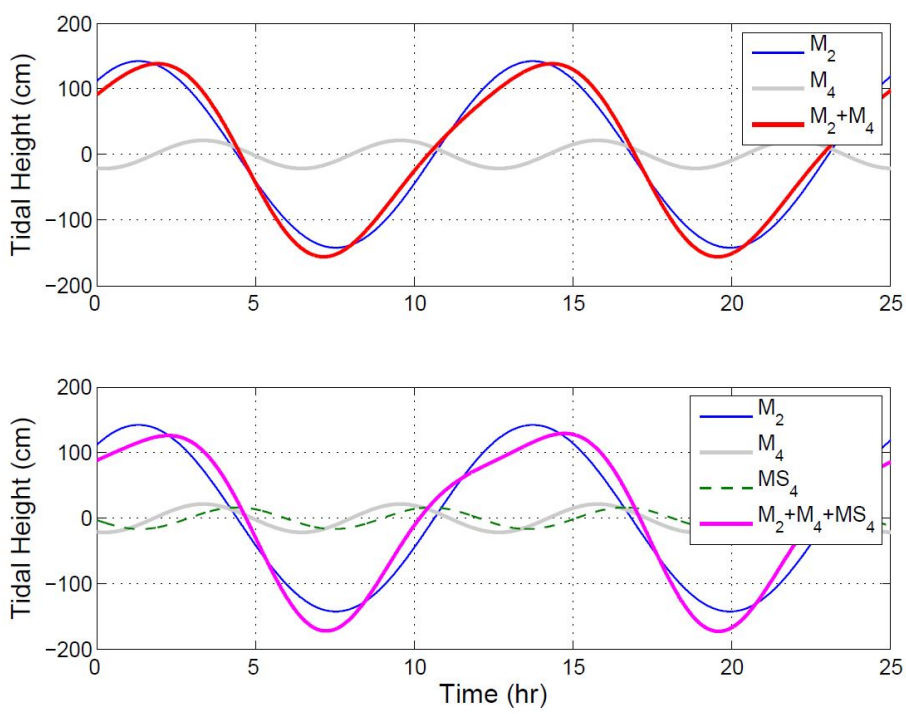


**Fig. 4.** Tidal heights of the (a) $M_2$, $M_4$ and $M_2$+$M_4$ tides; and (b) of the $M_2$, $M_4$, $MS_4$ and $M_2$+$M_4$+$MS_4$ tides generated from Mokpo tidal station 19 year tidal harmonic analysis results.

### 4.3 조석 조화분해 · 예측 프로그램 비교

19년 동안의 LAT와 HAT를 산출하는 데 있어서 '1년 연속 분석'보다 '19년 연속 분석'과 '19년 벡터평균 분석'에 의한 결과가 더 안정적이어서 더 유용하다는 사실을 알았다. 그러나 모든 조석 조화분해 · 예측 프로그램이 UTide (Codiga, 2011)처럼 장기간의 긴 자료를 조석 조화분해할 수 있는 것은 아니다. 보통의 경우 1~2년 정도의 해수면 높이 자료만을 조석 조화분해할 수 있고 그 결과를 이용하여 1~2년 연속으로 조석을 예측할 수 있는 성능을 갖고 있다. 따라서 사용하기 편리한 '19년 연속 분석' 방법을 사용하여 LAT와 HAT를 산출하기 위해서는 기본적으로 조석 조화분해 · 예측 프로그램의 성능이 뒷받침 되어야 한다. 이와 관련하여 일반적으로 해양 · 수로 분야에서 많이 사용되어 오고 있는 공개된 조석 조화분해 프로그램들을 대상으로 19년 이상 연속 관측된 해수면 높이 자료의 조석 조화분해 능력과 함께 19년 이상 연속 조석 예측 성능을 살펴보았다. 이를 위해 캐나다 해양연구원(Institute of Ocean Sciences; IOS)의 IOS tidal package (Foreman, 1977)와 영국 National Oceanography Centre(구 Proudman Oceanographic Laboratory)의 Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000; Bell et al., 1999), IOS tidal package에서 조화분해 프로그램의 분석 성능을 크게 향상시킨 Versatile Harmonic Tidal Analysis (VHTA; Foreman et al., 2009), IOS tidal package의 MATLAB 버전인 T_TIDE (Pawlowicz et al., 2002), 이어서 Codiga(2011)에 의해서 개발된 'Unified Tidal analysis and prediction (UTide)' 프로그램들의 조석 분석 · 예측 성능을 조사하고 그 결과를 Table 5와 Table 6에 제시하였다.

먼저 장기 연속 관측자료에 대한 조석 조화분해가 가능한지 각 프로그램의 성능을 조사하였다(Table 5). 고전적인 조석 조화분해 프로그램인 IOS tidal package (Foreman, 1977)의 'tide1_r2.f', TASK-2000 (Bell et al., 1999)의 'tira.f', T_TIDE (Pawlowicz et al., 2002)의 't_tide.m' 모두 1년에서 최대 2년 이내의 관측자료 분석에 적합하고, 이 기간을 초과한 장기 연속 관측자료 분석에 적합하지 않다. 그 주된 이유는 해수면 높이 자료를 조석 조화분해할 때 관측자료의 길이와 상관없이 자료 중간 해당 시각의 분조별 교점 인자와 교점 각을 구한 후 분석할 자료의 전 기간에 걸쳐 동일한 값을 적용하기 때문이다.

**Table 5.** Capability of five publically available and commonly used tidal harmonic analysis programs across different tidal analysis lengths (i.e., timescales of 1-2 y; 2-18.61 y; and >18.61 y)

| Harmonic analysis Program | Data Record Length (DRL) | | | Reference |
|---|---|---|---|---|
| | 1 or 2 years | 2 < DRL < 18.61 years | DRL ≥ 18.61 years | |
| Task-2000 | appropriate | inappropriate | inappropriate | Bell et al.(1999) |
| IOS | appropriate | inappropriate | inappropriate | Foreman(1977) |
| T_TIDE | appropriate | inappropriate | inappropriate | Pawlowicz et al.( 2002) |
| VHTA | appropriate | appropriate | appropriate | Foreman et al.(2009) |
| UTide | appropriate | appropriate | appropriate | Codiga(2011) |

**Table 6.** Capability of four publicly available and commonly used tidal harmonic prediction programs across different tidal prediction lengths (i.e., timescales of 1-2 y; 2-18.61 y; and >18.61 y)

| Harmonic prediction Program | Tidal Prediction Length (TPL) | | | Nodal/satellite modulation correction frequency (day) |
|---|---|---|---|---|
| | 1 or 2 years | 2 < TPL < 18.61 years | TPL ≥ 18.61 years | |
| Task-2000 | appropriate | appropriate | appropriate | every 3 days |
| IOS | appropriate | appropriate | appropriate | about every 30 days |
| T_TIDE | appropriate | inappropriate | inappropriate | just once |
| UTide | appropriate | appropriate | appropriate | every prediction interval |

이 방법은 과거 컴퓨터 연산 속도가 빠르지 않았던 시기에 추산한 조석 예측 정확도를 최소로 잃으면서 계산 속도를 높인 최적화된 기법이다(Murray, 1964). 따라서 이들 고전적인 조화분해 프로그램을 사용할 경우, 앞에서 언급한 '19년 벡터평균 분석' 방법으로 LAT와 HAT 계산에 필요한 매년 분조별 조화상수 값을 산출하는 것이 바람직하다. 한편, VHTA와 UTide는 고전적인 조화분해 프로그램들이 갖는 이러한 문제점을 해결하기 위해 관측된 시각마다 분조별로 교점 인자와 교점 각을 계산함으로써 19년 이상의 연속자료에 대해서도 조석 조화분해가 가능하다(Foreman et al., 2009; Codiga, 2011; Byun and Hart, 2019).

조석 조화분해 프로그램들과 달리, T_TIDE의 't_predic.m'를 제외한 조석 조화예측 프로그램들은 19년 이상 연속 조석 예측이 가능하다(Table 6). 그 이유는 식 (1)의 조석 분조별 교점 인자와 교점 각을 아주 빈번하게 갱신해서 조위를 예측하기 때문이다. 즉, TASK-2000 (Bell et al., 1999)의 'marie.f'는 분조별 교점 인자와 교점 각을 3일 간격으로 갱신하고, IOS tidal package (Foreman, 1977)의 'tidel_r4.f'는 매월 16일 00:00시 마다 갱신하며, UTide (Codiga, 2011)는 매 예측 간격마다 갱신한다. 참고로, T_TIDE의 't_predic.m'은 조석 조화분해와 마찬가지로 예측 기간에 상관없이 예측 전체 기간 중 중간 기간에 한 번 계산한 분조별 교점 인자와 교점 각을 전 예측기간에 동일하게 적용하기 때문에 장기 연속 조석 예측에 적합하지 않다(Byun and Hart, 2019).

## 5. 결론 및 토의

우리나라는 현재까지 조석 수준면으로 ALLW와 AHHW를 사용해 오고 있으나 국제적으로 LAT와 HAT를 사용하는 추세이다. 이 연구는 세 가지 방법(19년 벡터평균 분석, 19년 연속 분석, 1년 연속 분석)으로 해수면 높이 자료를 조석 조화분해하고 19년 간 조석을 예측하여 LAT와 HAT 값을 산출한 후 그 결과를 서로 비교하였다. 이들 방법들은 관측자료의 길이 · 품질과 사용 가능한 조석 조화분석 프로그램 환경에 따라 다르게 사용될 수 있다.

서남해안 9개 조위 관측소에서 1999년부터 2017년까지 19년 동안 관측한 1시간 간격 해수면 높이 자료를 이용하여 '19년 벡터평균 분석'과 '19년 연속 분석' 방법으로 산출한 LAT와 HAT는 이들 조위 관측소에서 그 차이가 대부분 ±1 cm 미만이었다. 그러나 해수면 관측 자료가 1년(369일)만 있다고 가정하고 '1년 연속 분석' 방법으로 구한 LAT와 HAT 값은 '19년 벡터평균 분석'과 '19년 연속 분석' 방법으로 산출 LAT 값들과 비교하여 -16.4~10.7 cm의 오차를 가질 수 있고, HAT 값들은 −8.2~14.3 cm의 오차를 가질 수 있다. 따라서 단기 해수면 높이 자료를 분석하여 LAT와 HAT를 추정할 때 세심한 주의가 필요하다.

또한 우리나라 수로 부문에서 현재 사용 중인 조위 기준면인 ALLW (AHHW)와 국제적으로 사용 추세에 있는 LAT (HAT) 간 높이 차이는 해역에 따라 23.9~70.4 cm이었다. 이렇게 비교적 큰 차이가 나는 이유는 ALLW는 주요 조석 4대 분조 진폭들만은 더하여 가상적으로 가장 낮아질 수 있는 해수면 높이를 계산한 값이고, LAT는 67개 조석 분조들의 조화상수를 사용하여 19년 동안 해수면이 가장 낮아지는 때의 높이를 계산한 것이기 때문이다. AHHW와 HAT 간 차이는 22.4~42.7 cm로 상대적으로 ALLW와 LAT 간 차이보다 크지 않은 것이 특징이다. 한편, 공개되어 많이 사용되고 있는 조석 분석 · 예측 프로그램들(Task-2000, IOS, T_TIDE, UTide) 중에서 19년 이상 연속 관측된 해수면 높이 자료의 조석 조화분해와 19년 연속 조석 예측을 동시에 수행할 수 있는 것은 UTide가 유일했다.

세계 각국 간 교역량이 증가함에 따라 선박은 더욱 대형화되어 가고 항로는 더욱 복잡해져 가는 추세이다. 이에 발맞추어 2018년 IHO 회원국들은 해상 교통안전을 위하여 해도 수심과 선박의 안전수직높이에 대한 조위 기준면으로 각각 LAT와

HAT 또는 매우 유사한 기준면을 사용하기로 결의하였다. 수로학 부문뿐만 아니라 연안과 항만에 대한 공학적 측면에서 해안에 구조물을 설치하고, 천해에 해상풍력 발전시설 등을 세울 때 30년 또는 50년 범위에서 예상되는 HAT와 LAT를 예측하는 일이 필요하다(Jeong et al., 2016; Ko et al., 2018). 또한 연안 해역별 HAT와 LAT 정보는 조위 관측소가 운영되는 곳에서 해안 저지대 해수침수 발생 가능성을 실시간으로 제공하는 국립해양조사원의 '실시간 4단계 고조 정보(관심, 주의, 경계, 위험)' 기준 갱신에도 활용할 수 있다. 즉, HAT면과 19년 기간의 전체 고조위를 활용하면 현 AHHW에 임의의 상수 값을 해역별로 일률적으로 빼거나 더한 4단계 고조 정보 기준 계산 방법보다 더 과학적이고 체계적으로 정보를 산출하여 제공할 수 있다. 나아가, 이 방법은 연안에서 폭풍해일로 인해 해수가 육지로 범람하는 지를 예측하는 운용해양학 시스템에서 제공하는 단계별 조위 정보 정확도 향상에도 활용될 수 있다.

우리나라는 설계 고조위와 설계 저조위의 결정을 위한 조위 기준면으로 AHHW와 ALLW를 사용해 왔으며, 또한 ALLW를 해도의 기본 수준면으로 사용하고 있다(MMAF, 2014). 국제적으로 항해 안전과 관련하여 IHO 회원국들을 중심으로 조위 기준면을 LAT와 HAT 조위면 사용으로 변화하는 추세에 있다(Gill and Schultz, 2001; IHO, 2018). 또한 해안공학 분야의 기준을 선도하는 International Electrotechnical Commission (IEC, 2009)와 Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (DNV · GL)에서도 LAT를 기본 수준면으로 사용하고 있다. 이들 조위 기준면은 기본적으로 수심뿐만 아니라 해안선, 나아가 영해 범위(Kim et al., 2008) 등을 결정하는데 기초자료로 사용되기 때문에, 현 ALLW (AHHW)를 LAT (HAT)로 변경하기 위해서는 이들 기준면 산출 방법뿐만 아니라 사전에 기준 변경에 따른 물리적 비용과 가치적 비용을 면밀히 조사할 필요가 있다. 물리적 비용 측면에서 한 예로, 해도 기준면 변경에 따라 전체 해도를 어떤 식으로 변경하는 것이 해도 사용자들의 불편과 혼란, 나아가 재구매에 따른 경제적 부담을 줄일 수 있는지에 대해 보다 세심한 검토가 필요하다. 이와 관련하여 LAT (HAT) 도입에 따른 시행착오를 줄이기 위해 우선적으로 검토할 사항 중 하나는 조위 기준면을 LAT (HAT)로 변경한 해양 선진국들을 벤치마킹(benchmarking)하여 조위 기준면 변경 과정과 더불어 이로 인해 발생한 문제점과 그 대응 등에 관해 세심히 조사하는 일이다. 또한 영해 기선의 기준을 LAT로 변경하는 경우에 영해 면적의 변화 정도와 이에 따른 주변국과의 이해관계에 미치는 영향도 검토가 필요하다.

## 사 사

자국의 LAT와 HAT 계산 방법 등에 관해 친절히 답해 주신 국제수로기구(IHO)의 TWCWG 회원들인 호주 기상청(BoM)의 Bill Mitchell, 미국 해양대기청(NOAA)의 Peter Stone, 영국 수로국(UKHO)의 Christopher Jones께 고마움을 전합니다. 원고를 꼼꼼히 읽고 유익한 의견들을 주신 두 분의 심사위원 덕분에 논문 내용이 더 명확히 정리되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌(References)

Bell, C., J.M. Vassie and P.L. Woodworth, 1999. POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000). Permanent Service for Mean Sea Level, CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, UK, 20 pp.

Byun, D.-S., 2007. Overview of tidal phase-lag references used in Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography (The Sea), **12**(3): 234-238.

Byun, D.-S. and C.-W. Cho, 2009. Exploring conventional tidal prediction schemes for improved coastal numerical forecast modeling. Ocean Modelling, **28**: 193-202.

Byun, D.-S. and D. E. Hart, 2019. On robust multi-year tidal prediction using T_TIDE. Ocean Science Journal (in press).

Codiga, D.L., 2011. Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions. University of Rhode Island Graduate School of Oceanography Tech. Rep. 2011-01, 59 pp.

Foreman, M.G.G., 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Institute of Ocean Sciences Pacific Marine Science Rep. 77-10, 97 pp.

Foreman, M.G.G., J.Y. Cherniawsky and V.A. Ballantyne, 2009. Versatile harmonic tidal analysis: Improvements and applications. J. Atmos. Oceanic Technol., **26**: 806－817, doi:10.1175/2008JTECHO615.1.

Gill, S.K. and J.R. Schultz, 2001. Tidal datums and their applications. Silver Spring MD, NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Services, (NOAA Special Publication NOS CO-OPS 1), 102 pp. & Appendix.

IEC (International Electrotechnical Commission), 2009. IEC 61400-3: Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines. National Standards Authority of Ireland. 132 pp.

IHO (International Hydrographic Organization), 2018. Resolution on datums and benchmarks A2.5 3/1919. In: Resolutions of the International Hydrographic Organization Publication M-3 (2nd Edn), Monaco. Retrieved from: https://www.iho.int/iho_pubs/misc/M3-E-AUGUST18.pdf.

Jeong, S.T., J.T. Yoon, H.Y. Cho, D.H. Ko and K.S. Kang, 2016. Analysis on the estimation error of the lowest and highest astronomical tides using the Wido tidal elevation data. J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng. **28**(2): 101-108.

Kim, B.S., Y.S. Choi, B.M. Park and C.D. Jeon, 2008. The study on the Base point and baseline in Korea, Japan, and China. The Journal of Geographic Information System Association of Korea **16**(3): 331-342.

Ko, D.H., S.T. Jeong, H.-Y. Cho and K.-S. Kang, 2018. Analysis on the estimation errors of the lowest and highest astronomical tides for the southwestern 2.5 GW offshore wind farm, Korea. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, **10**: 85-94.

MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 2014. Harbor and fishery design criteria.

Murray, M.T., 1964. A general method for the analysis of hourly heights of tide. International Hydrographic Review, **41**(2): 91-101.

Pawlowicz, R., B. Beardsley and S. Lentz, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Comput. Geosci., **28**: 929－937, doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4.

UK National Oceanography Centre, 2015. TASK － Windows Edition, version 2.0.0 107 pp.