

## 조화분해법을 이용한 19세기 이전 고조석 및 고조류 추산 고찰

변도성\*

국립해양조사원 해양과학조사연구실

### Exploring Estimation of Paleo-tides and -tidal Currents Using a Harmonic Analysis Method in pre-19th Century

DO-SEONG BYUN\*

Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Seohae-ro, Jung-gu, Incheon 400-800, Korea

전통적 조화분해 방법을 이용한 명량해전(1597년 음력 9월 16일)과 같은 19세기 이전 역사적 해전 당시의 고조석(고조류) 추산과 관련하여 조석(조류) 조화분해와 예측에 많이 사용되고 있는 IOS tidal package(IOS)와 Task-2000 tidal package(Task2K)의 5가지 천문변수 계산식을 살펴보았다. 이로부터 IOS와 달리 Task2K가 1801년 이전 시기에 대한 조석(조류) 추산이 불가능한 원인을 파악하였다. 즉, 임의의 19세기 이전 시점(1801년, 1800년, 1597년 1월 1일 자정)에 대하여 구한 천문변수 값을 비교한 결과, 1801년은 거의 일치하였으나, 나머지 해의 천문변수 값은 차이가 컸다. 이는 1900년을 기준으로 그레고리력(양력)을 직접 사용하여 천문변수 값을 구하는 Task2K의 계산식이 1801~2099년 범위를 벗어난 해에 대해서 윤년을 정확히 계산하지 못함으로써 발생하는 문제이다. 따라서 그레고리력을 바탕으로 0000년 1월 1일 자정을 기준으로 누적된 일자로 환산한 시간을 사용한 IOS의 천문변수 계산식을 사용함으로써 Task2K에서도 고조석(고조류)을 추산할 수 있다.

We examined five astronomical variables formulas of the two conventional harmonic prediction programs (IOS tidal package (IOS) and Task-2000 tidal package (Task2K)) in relation to hindcast of paleo-tides and -tidal currents on historical navel battlefields such as Myeongryang Naval Battle (September 16th, 1597 according to the lunar calendar). Through the comparison of the resultant values in a certain time (00:00 January 1) of each year (1801, 1800 and 1597) calculated from the two different formulas, we understood that the reason why Task2K is incapable of hindcasting them in pre-19th century. Specifically, we found that the Task2K formulas directly using the Gregorian calendar date did not identify leap years in calculating astronomical variables beyond the period of 1801-2099. Therefore, the IOS's formulas, which use the day number referenced on mid-night 1/1/0000, are recommended for use in hindcasting paleo-tides and -tidal currents on historical navel battles in pre-19th century.

**Keywords:** 고조석, 고조류, 조화분해, 명량해전, 천문변수

## 서론

조석현상이 우세한 우리나라 서·남해안에서 일어난 역사적 해전 당시의 조석과 조류에 대한 정확한 추산은 과거 기록자료를 이해하고 승패요인을 분석하는데 있어서 필수정보 중 하나이다. 천문현상에 의해 일어나는 조석은 자연현상 중 가장 정확하게 예측 가능한 현상 중 하나이다. 일반적으로 관측자료로부터 관측지점에 대한 조석(조류)을 예측하기 위하여 조석(조류) 조화분해(harmonic analysis)방법이 사용되고 있으며, 캐나다 IOS tidal package(Foreman, 1977; 1978)와 영국 Task-2000 package(Bell *et al.*, 1999)가 가장 많이 사용되고 있다. 우리나라 조석·조류 예보기관인 국립해양조

사원은 Task-2000 package(Task2K)와 IOS tidal package(IOS)를 각각 사용하여 조석과 조류를 예보하고 있다. 이들 예측알고리즘을 수치모델에 적용하면 모델 영역에 대한 조석(조류)을 예측할 수 있다(Byun and Cho, 2009). 유사하게, 이 예측 원리를 수치모델링에 적용하면 고조석(고조류)에 대한 추산(hindcast)도 가능하다.

Task2K는 IOS에 비하여 예측알고리즘이 간단하다는 장점을 가지고 있으나 1801-2099년까지만 추산과 예측이 가능하므로 적용 기간에 대한 한계를 가지고 있다(Bell *et al.*, 1999). 이러한 Task2K가 갖고 있는 적용 기간의 한계에 대한 의문이 이 연구를 하게 된 동기가 되었다.

이 연구는 수치모델을 이용한 역사적 해전장에 대한 고조석(고조류) 재현 연구의 전단계로서, 향후 수치모델에 과거 추산 알고리즘의 적용과 관련하여 조석(조류) 예보에 보편적으로 사용되는

\*Corresponding author: dsbyun@korea.kr

IOS와 Task2K의 천문변수 계산 알고리즘을 서로 비교하고 그 특성을 살펴보았다. Task2K에서 사용하고 있는 조석(조류)예측 알고리즘이 1801년 이전 기록 자료가 존재하는 시기에 대하여 추산이 가능하지 않는 원인을 파악하였고, 이 문제의 해결방법을 제시하였다.

### IOS와 Task2K 천문변수 계산식 비교

조화분해법을 이용하여 과거 조석(조류)을 추산하기 위해선 분조별(*i*) 조화상수(진폭과 지각)와 함께 추산시기에 대한 분조별 교점인자(*f<sub>i</sub>*)와 교점각(*u<sub>i</sub>*) 그리고 평형위상각(*V<sub>0i</sub>*) 값이 기본적으로 필요하다. *V<sub>0i</sub>*와 (*f<sub>i</sub>*, *u<sub>i</sub>*)는 5가지 천문변수(*s*, *h*, *p*, *N*, *p'*)값의 함수(Table 1)이므로, 고조석(고조류)을 정확하게 추산하기 위해선 정확한 천문변수 값의 추산이 필수적이다. 따라서 Task2K가 1801년 이전 시기에 대하여 고조석(고조류)추산이 불가능한 원인을 파악하기 위하여 천문변수 계산식들을 살펴보았다.

IOS와 Task2K의 조석(조류)예측 프로그램에서 5가지의 천문변수 값을 계산하기 위하여 사용하는 식은 Table 2와 같다. 두 계산식 모두 근본적으로 천문변수 값들을 계산하기 위하여 전 세계적으로 사용되고 있는 그레고리력(Gregorian calendar) 즉 양력을 입력값으로 사용한다. 날짜 수 계산을 위하여 복잡한 6차의 다항 전개식(Her Majesty's Nautical Almanac Office, 1961)을 사용하는

**Table 1.** Main lunar constituents' composition, angular speeds ( $\omega$ ) and their  $V_0$ ,  $u$  and  $f$  expressing functions of astronomical variables listed in Table 2

Tide	Composition	$\omega$ (°/hr)	$V_0$	$u, f$
M <sub>2</sub>	2T <sub>p</sub>	28.9841042	$f(s, h)$	$f(N)$
N <sub>2</sub>	2T <sub>p</sub> -s <sub>p</sub>	28.4397295	$f(s, h, p)$	$f(N)$
K <sub>2</sub>	2T <sub>p</sub> +2s <sub>p</sub>	30.0821373	$f(h)$	$f(N)$
K <sub>1</sub>	T <sub>p</sub> +s <sub>p</sub>	15.0410686	$f(h)$	$f(N)$
O <sub>1</sub>	T <sub>p</sub> -s <sub>p</sub>	13.9530356	$f(s, h)$	$f(N)$
P <sub>1</sub>	T <sub>p</sub> -s <sub>p</sub> -2h <sub>p</sub>	14.9589314	$f(h)$	-

IOS의 경우, 임의의 그레고리력을 입력하면 'GDAY' 서브루틴을 사용하여 세계표준시 기준의 0000년 1월 1일 자정(00:00)을 시점으로 누적된 날짜의 수(즉, Table 2의 식에서 T)로 환산한 후 천문변수 값을 계산한다.

일련의 누적 일수를 입력값으로 사용하는 IOS의 천문변수 계산식은 19세기 이전의 조류나 조석을 추산하는데 있어서 아무런 문제가 없다. 반면에, Table 2에서 알 수 있듯이 천문변수 계산에 1900년을 기준(T=0)으로 그레고리력을 직접 사용하는 Task2K는 1801년부터 2099년까지만 조화분해와 추산·예측이 가능하다(Bell et al., 1999). 이와 관련하여 400여 년 이전 시기에 대한 IOS와 Task2K의 천문변수 계산 정확도를 알아보기 위하여, Table 2에 제시된 IOS와 Task2K의 천문변수 계산식을 사용하여 1801년, 1800년, 1597년(명량해전이 일어난 해) 각각의 해 1월 1일 자정에 대한 5가지 천문변수 값을 계산하였다. 또한 분조 중 가장 큰 성분인 M<sub>2</sub> 분조에 대하여 이들 천문변수의 함수로 계산되는 평형위상각(*V<sub>0</sub>*)과 교점인자(*f*) 그리고 교점각(*u*) 계산 결과를 비교하였다(Table 3).

그 결과 1801년에 대한 두 조석예측 프로그램의 결과는 거의 일치한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 이전 해인 1800년과 1597년에 대한 IOS와 Task2K에서 계산된 천문변수 값, 특히 *s* 천문변수 값의 차이가 각각 13°와 26°로 다른 천문변수 값에 비해 큰 차이를 보인다. 그리고 주기가 1년인 *h*의 경우 1800년과 1597년에 대하여 각각 1°와 2° 차이를 보인다. 이로 인해 조석(조류)예측에 있어 주요 인자인 M<sub>2</sub>의 평형위상각[*V<sub>0</sub>(s, h)*] 차이가 1800년에는 24.4°이고 1597년에는 48.8°로 커진다. M<sub>2</sub>의 교점인자(*f*)와 교점각(*u*)은 두 프로그램 사이에 작은 차이(0.05-0.08°)를 보이는 천문변수 *N*의 함수이므로(Table 1), 18.61년으로 변하는 달의 교점운동보정(nodal modulation correction)에 대해선 상대적으로 민감하지 않다.

위 결과로부터 Task2K의 예측프로그램은 천문변수 계산식의 윤년 계산의 한계 때문에 1801년 이전에 대한 정확한 천문변수의 추산이 불가능하다는 사실을 알 수 있다. 즉, 그레고리력은 기본적으로 4년마다 윤년을 두지만, 400으로 나누어 떨어지는 해(윤년)

**Table 2.** Formulas for five astronomical variables used in IOS and Task2K tidal prediction programs

Astronomical variables	Period	Formula(unit: °) $\phi_n(T) = \phi_n(T_0) + \phi_n(T-T_0)$	
		IOS (Foreman, 1977) Time origin (T=0): 1200 UT Dec. 31, 1899	Task2K (Bell et al., 1999) Time origin (T=0): 0000 UT Jan. 1, 1900
T	Mean lunar day ( $T_p$ )	1.03505 solar days	-
s	Sidereal month ( $s_p$ )	27.321582 solar days	$s=270.434164+13.1763965268 T-0.000085 T^{10^8}+0.000000039 T^{10^{12}}$
h	Tropical year ( $h_p$ )	365.242199 solar days	$h=279.696678+0.9856473354 T+0.00002267 T^8$
p	Moon's perigee ( $p_p$ )	8.847 years	$p=334.329556+0.1114040803 T-0.0007739 T^8-0.00000026 T^{12}$
N	Moon's ascending node ( $N_p$ )	18.613 years	$N=259.183275-0.0529539222 T+0.0001557 T^8+0.00000005 T^{12}$
p'	Perihelion ( $p'_p$ )	20942years	$p'=281.220833+0.0000470684 T+0.0000339 T^8 +0.00000007 T^{12}$

Here T=the current DN-693961.5 (noon 31/12/1899)      DL=[INT[(Y-1900)/4]]+D-1 (for 1801-1899)  
DL=INT[(Y-1901)/4]+D-1 (for 1900-2099)

Note that DN is the day number based on the Gregorian calendar date from 1200 UT on Dec. 31 1899 (DN=693961.5), INT(X) gives the integer value of X, Y is the year and D is the day number in the year.

**Table 3.** Values for five astronomical variables and the astronomical argument ( $V_0$ ) and nodal modulation factors ( $u, f$ ) of the  $M_2$  at 00:00 January 1 in 1801, 1800 and 1597 calculated from the formulas listed in Table 1

Time	Type	Fundamental astronomical variables (°)					$M_2$ constituent		
		$s$	$h$	$p$	$N$	$p'$	$V_0$ (°)	$u$ (°)	$f$
00:00 1/1/1801	IOS	111.699	280.168	266.115	13.920	279.519	336.937	359.506	0.963
	Task2K	111.694	280.167	266.125	13.917	279.519	336.946	359.485	0.964
00:00 1/1/1800	IOS	342.314	280.407	225.452	33.248	279.502	236.184	358.967	0.969
	Task2K	329.133	279.420	225.351	33.299	279.502	260.575	358.825	0.969
	ITask2K	342.314	280.407	225.452	33.248	279.502	236.183	358.827	0.969
00:00 1/1/1597	IOS	71.561	280.573	245.424	359.480	276.016	58.024	0.110	0.962
	Task2K	45.195	278.598	245.296	359.566	276.012	106.805	0.016	0.963
	ITask2K	71.561	280.573	245.424	359.480	276.016	58.024	0.019	0.963

Note that ITask2K is the case of ‘Task2K’ used in ‘IOS’ formulas for five astronomical variables.

**Table 4.** Values for the  $M_2$  astronomical argument ( $V_0$ ) at 00:00 January 1 in 1000-1800 calculated from the tidal prediction programs of IOS (Foreman, 1977) and Task2K (Bell *et al.*, 1999)

Year	$V_0$ (unit: °) of $M_2$		Difference (unit: °)	Note
	IOS	Task2K		
1800	236.2	260.6	-24.4	non-leap year
1700	106.0	154.8	-48.8	non-leap year
1600	0.3	49.1	-48.8	leap year
1500	230.1	303.3	-73.2	non-leap year
1400	100.0	197.5	-97.5	non-leap year
1300	329.9	91.8 (451.8)	-121.9	non-leap year
1200	224.2	346.0	-121.9	leap year
1100	94.1	240.3	-146.2	non-leap year
1000	324.0	134.5 (494.5)	-170.5	non-leap year

를 제외한 100으로 나누어 떨어지는 해는 평년으로 한다. 그러나 Task2K는 Table 2에 제시된 천문변수 계산식에 사용되는 날짜 계산식(DL)에서 알 수 있듯이 1801년 이전 해에 대해서 100으로 나누어 떨어지는 해 중 400으로 나누어 떨어지는 해를 제외하고 하루가 덜 더해진 시간으로 천문변수를 계산하는 날짜 계산식의 한계를 가진다.

이러한 사실은 IOS와 Task2K의 천문변수 계산결과(1000년 1월 1일 0시부터 1800년 1월 1일 0시까지 매년 계산함)로부터 추산된  $M_2$ 의 평형위상각 [ $V_0(s, h)$ ] 계산 결과 값의 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 이 중 100년 단위로 Table 4에 제시한 결과에서 볼 수 있듯이, 1800년 1월 1일에 IOS와 Task2K의  $M_2$ 에 대한  $V_0$ 은 각각 236.184°와 260.575°로 이들 간의 차이는 -24.4°이다. 이 차이는  $M_2$ 분조의 각속도가 28.9841042°/hr이므로 하루(24 hr)를 곱한 결과인 335.6°(-24.4°)와 일치한다. 즉, 236.184°(-24.4°)=260.575°이므로 1800년의 경우, Task2K의 천문계산식이 하루를 덜 고려하여 계산하였음을 알 수 있다. 더 정확하게 설명하면, 1801년 이전 시기에 대하여 이 차이는 100으로 나누어 떨어지는 해 중 400으로 나누어 떨어지는 해(1600년, 1200년)를 제외한 해(1800년, 1700년, 1500년, 1400년, 1300년, 1100년, 1000년)에 대해 하루가 덜 계산되어 이들 해마다 약 -24.4° 만큼 차이가 더 발생한다(Table 4).

이 문제는 Task2K에서 사용하는 5가지 천문변수( $s, h, p, N, p'$ )

계산식을 IOS에서 사용하는 좀 더 복잡한 식(Table 1)으로 대체함으로써 쉽게 해결할 수 있다. IOS의 천문변수 계산식을 Task2K에 적용(ITask2K)하여 1800년과 1597년에 대하여 다시 계산한 결과,  $M_2$ 의  $V_0$ 는 IOS의 계산 결과와 거의 일치한다(Table 3).

## 결론

이 연구를 통해 조석(조류) 조화분해 및 그 예측을 위하여 보편적으로 많이 사용되고 있는 ‘IOS tidal package’와 ‘Task2K package’의 천문변수 계산식을 비교하여 Task2K가 1801년 이전 시기에 대하여 추산이 가능하지 않는 원인을 파악하였다. 그 결과 Task2K의 천문변수 계산 알고리즘이 갖는 윤년 계산의 한계로 인하여 1801년 이전과 2099년 이후에 대한 조석(조류)의 추산과 예측이 불가능하다는 사실을 알게 되었다. 하지만 그레고리력(양력)을 입력 값으로 사용하는 IOS의 천문변수 계산 알고리즘을 적용하면 쉽게 이 문제를 해결할 수 있다.

이 연구는 궁극적으로 수치모델을 사용하여 고조석(고조류)을 시뮬레이션하기 위한 기초연구이다. 이 연구 결과를 바탕으로 앞으로 IOS보다 프로그램이 상대적으로 간단한 수정된 Task2K의 예측 모듈을 수치모델에 적용하여 명량해전 당시의 조석과 조류를 재현할 계획이다.

끝으로 우리나라의 연안은 20-21세기를 거쳐 간척이나 매립, 방조제나 하구연 건설 등 대규모 연안 개발로 인하여 역사적 전장의 조석(조류) 특성이 인위적으로 크게 바뀌고 있다. 따라서 역사적 주요 해전장의 물리적 해양환경의 재현을 통하여 당시 상황을 올바르게 재해석하기 위해서는 무엇보다 연안 개발 이전의 해저 지형자료(수심과 해안선 등)와 해양물리관측자료(조석과 조류 등)의 체계적 관리가 요구된다.

## 감사의 글

원고를 세심하게 검토해 주시고 조언을 주신 심사위원님께 감사드립니다. 이 연구는 국토해양부 시험연구비(일반 2000-2033-307-210-13) 지원에 의해 국립해양조사원 해양조사연구실에서 수행하였습니다.

## 참고문헌

- Byun, D.-S. and C.-W. Cho, 2009. Exploring conventional tidal prediction schemes for improved coastal numerical forecast modeling. *Ocean Modelling*, **28**: 193–202.
- 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.
- Foreman, M.G.G., 1977. Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction, Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C., 57 pp.
- Foreman, M.G.G., 1978. Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C., 57 pp.
- Her Majesty's Nautical Almanac Office, 1961. Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac. Her Majesty's Stationery Office, London, 106 pp.
- Pugh, D.T., 1987. Tides, Surges and Mean Sea Level. John Wiley, New York, 472 pp.
- Schureman, P., 1976. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, United States government printing office, Washington 317 pp.

---

2010년 9월 7일 원고접수

2010년 11월 10일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진