

Note

조류 조화상수의 월변동성 완화 방법 고찰

변도성\*

국립해양조사원 해양과학조사연구실  
(400-800) 인천광역시 중구 서해대로 365

Investigating the Adjustment Methods of Monthly Variability in Tidal Current Harmonic Constants

Do-Seong Byun\*

*Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration  
Incheon 400-800, Korea*

**Abstract :** This is a preliminary study of the feasibility of obtaining reliable tidal current harmonic constants, using one month of current observations, to verify the accuracy of a tidal model. An inference method is commonly used to separate out the tidal harmonic constituents when the available data spans less than a synodic period. In contrast to tidal constituents, studies of the separation of tidal-current harmonics are rare, basically due to a dearth of the long-term observation data needed for such experiments. We conducted concurrent and monthly harmonic analyses for tidal current velocities and heights, using 2 years (2006 and 2007) of current and sea-level records obtained from the Tidal Current Signal Station located in the narrow waterway in front of Incheon Lock, Korea. Firstly, the 1-year harmonic analyses showed that, with the exception of  $M_2$  and  $S_2$  semidiurnal constituents, the major constituents were different for the tidal currents and heights.  $K_1$ , for instance, was found to be the 4th major tidal constituent but not an important tidal current constituent. Secondly, we examined monthly variation in the amplitudes and phase-lags of the  $S_2$  and  $K_1$  current-velocity and tide constituents over a 23-month period. The resultant patterns of variation in the amplitudes and phase-lags of the  $S_2$  tidal currents and tides were similar, exhibiting a sine curve form with a 6-month period. Similarly, variation in the  $K_1$  tidal constant and tidal current-velocity phase lags showed a sine curve pattern with a 6-month period. However, that of the  $K_1$  tidal current-velocity amplitude showed a somewhat irregular sine curve pattern. Lastly, we investigated and tested the inference methods available for separating the  $K_2$  and  $S_2$  current-velocity constituents via monthly harmonic analysis. We compared the effects of reduction in monthly variability in tidal harmonic constants of the  $S_2$  current-velocity constituent using three different inference methods and that of Schureman (1976). Specifically, to separate out the two constituents ( $S_2$  and  $K_2$ ), we used three different inference parameter (i.e. amplitude ratio and phase-lag diggerence) values derived from the 1-year harmonic analyses of current-velocities and tidal heights at (near) the short-term observation station and from tidal potential (TP), together with Schureman's (1976) inference (SI). Results from these four different methods reveal that TP and SI are satisfactorily applicable where results of long-term harmonic analysis are not available. We also discussed how to further reduce the monthly variability in  $S_2$  tidal current-velocity constants.

**Key words :** tidal current harmonic analysis, current observation, inference method, Incheon Lock

\*Corresponding author. E-mail : dsbyun@korea.kr

## 1. 서 론

조석현상이 우세한 연안에서 조위와 조류의 정확한 예측정보는 안전항해뿐만 아니라 연안이용·관리와 개발, 군 작전 등과 관련하여 매우 중요하며, 조석수치모델을 통하여 공간적으로 조석과 조류를 예측할 수 있다(Byun and Cho 2009). 일반적으로 조석수치모델의 예측 정확도를 검증하기 위한 방법으로 관측·모델결과의 주요 조석분조에 대한 조화상수 비교 방법이 많이 사용되고 있으나, 관측조류조화분해 결과를 사용하여 모델결과를 검증한 연구는 드물며 사용한 관측자료도 상대적으로 적다(Fang and Yang 1988; Cai et al. 2006). 그 이유는 일차적으로 해양에서 비교할 장기 유속관측자료의 확보가 상대적으로 어렵기 때문이다.

국립해양조사원은 항해안전과 수심측량자료 보정을 위하여 우리나라 주요 연안에 약 200여 지점에 대하여 30일 이상 연속관측한 조류(국립해양조사원 2010a)와 조석자료(국립해양조사원 2010b)를 보유하고 있다. 그러나 1개월 단기간 해수면 관측자료 조화분해 결과(예를 들면,  $S_2$ 와  $K_1$  분조)에는 6개월 이상의 자료가 있어야만 분리되는 각속도가 유사한 분조성분이 분리되지 못하고 남아 있다(Pugh 1987; Boon 2004). 따라서, 조화상수 비교방법을 통해 수치모델결과와 1개월 관측분석결과를 서로 비교하기 위해선 관측자료를 조화분해할 때 조화상수의 월변동성을 보정해 주어야 한다. 조석성분은 추정법(inference)을 사용하여 주요 분조 조화상수의 월변동성 보정이 어느 정도 가능하다고 알려져 있지만(Schureman 1976; Lee and Kim 1988), 조류는 우선 장기 관측자료의 확보가 쉽지 않고, 지형적 영향을 크게 받기 때문에 조석처럼 이들 방법의 적용 가능 유무에 대하여 구체적으로 보여준 연구는 매우 드물다. 특히, 우리나라 연안에서 1년 이상의 장기간 유속·해수면 높이를 동시에 관측한 자료를 분석하여 그 결과를 비교·제시한 연구는 거의 없다.

이 연구는 국립해양조사원에서 1개월 동안 관측한 유속 자료를 조화분해하여 조석수치모델 검증용 조류조화상수를 확보하기 위한 예비연구이다. 이와 관련하여 왕복조류가 우세한 협수로에 위치하고 있는 인천 갑문 조류신호소(Fig. 1)에서 관측한 2년간의 유속과 해수면 높이 관측자료를 사용한 조화분해를 통해 관측지점의 조류·조석의 특성과 산출된 주요 조류·조석조화상수의 차이점을 살펴본다. 또한 보통 조석·조류 조화분해 프로그램에서 단기 관측자료로부터 유사주기의 분조들을 강제로 분리하기 위해 기준 분조로 설정되어 있는  $S_2$ 와  $K_1$  조류·조석조화상수의 월변동 특성을 살펴본다. 나아가 조류조화상수의 월변동성을 완화시키기 위해 사용되고 있는 방법들을 조사하고 각 방법들에 대한 완화 효과 정도를 살펴보았으

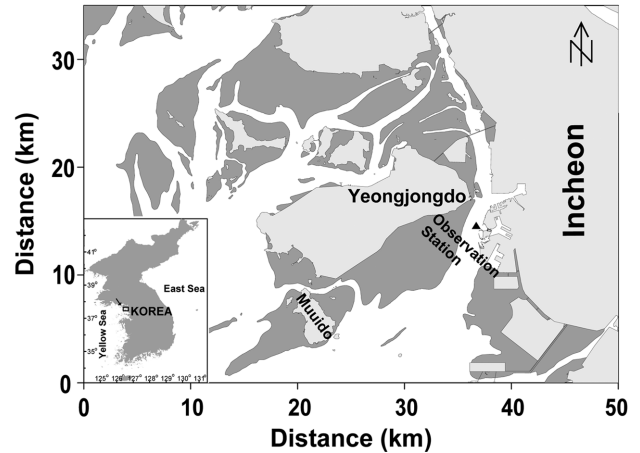


Fig. 1. Map of the observation station (▲) situated in front of the Incheon Lock on the west coast of Korea

며, 이 결과로부터 인근 장기 관측분석결과가 없을 때 적용 가능한 방법을 제시하였다.

## 2. 자료 및 방법

이 연구에 사용된 인천 갑문 앞의 유속과 해수면 자료는 2006년부터 2007년까지 2년간 1분 간격으로 관측된 자료로 인천지방해양항만청으로부터 제공받았다. 원시 유속자료와 해수면자료에는 튀는 값과 일부 결측 등이 존재하므로 전처리 과정을 거쳐 분석에 사용할 10분간 평균한 자료 셋을 만들었다. 유속과 해수면 높이 자료에서 자료질이 상대적으로 좋지 않은 2006년 1월 자료는 분석에서 제외하였으며, 월별로 조화분해를 실시하기 위하여 29일씩 총 23개의 자료 셋을 구성하였다. 1년의 장기 조화분해 결과를 얻기 위하여 2006년 10월 31일의 결측일을 고려하여 2006년 11월 1일부터 2007년 11월 4일까지 369일간의 자료를 분석에 사용하였다. 이 연구에서 조석·조류 조화분해와 그 예측에는 IOS(Institute of Ocean Sciences) tidal package(Foreman 1977; Foreman 1978)의 MATLAB 버전인 T\_TIDE(Pawlowicz et al. 2002)를 사용하였다.

단기 관측자료로부터 주요 주기(각속도)가 유사한 분조 예를 들어,  $S_2$ ( $K_1$  또는  $M_{sf}$ ) 분조에서  $K_2$ ( $P_1$  또는  $M_f$ ) 분조를 분리하기 위해서는 최소 6개월의 자료가 필요하다. 따라서, 조석조화분해 프로그램(IOS, T\_TIDE)에서는 분조의 조화상수가 지역적으로 안정하다는 가정 하에 일반적으로 인근 관측소의 1년 이상 장기 조화분해 결과로부터 추출하고자 하는 이웃 주기 분조들의 진폭비와 지각차 정보를 이용하여 해당 분조의 조화상수를 추정한다(Foreman 1977). 단기 조류관측자료의 조화분해로 분해가 되지 않는 주요 분조의 월변동성을 보정하기 위해서 단기

조석관측자료의 조화분해 시에 사용되는 이 추정법과 유사하게 조류성분( $u + v$ )을 분조별로 반시계방향 성분과 시계방향 성분으로 분리한 후, 기존 장기 관측자료의 조류 조화분해 결과로부터 이들 성분별 이웃 주기 분조의 진폭비와 지각차 정보를 이용하여 관측점에서 이들 분조에 대한 조화상수의 월별 변동성을 완화시킨다(Foreman 1978). 물론 조석조화분해처럼  $u$ 와  $v$  성분 각각에 추정법을 적용하여 조화분해할 수 있다. 그러나 이 연구에서는 주성분 분석(Emery and Thomson 2001)을 통해 수로방향을 북쪽으로 좌표축이 변환된 조류자료를 분석에 사용하였기 때문에 조석조화분해에서 사용하는 추정법을 그대로 적용하였다. 예를 들면, 369일간의 유속자료의 조화분해결과로부터  $S_2$ 와  $K_2$ 의 진폭비 $[a_{K_2}/a_{S_2}]$ 와 지각차 $[g_{S_2} - g_{K_2}]$ 를 계산한 결과를 1개월 단기 조류조화분해에 적용하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 조석·조류 특성

장기 관측자료의 조화분해 결과를 통해 인천항 수로에 대한 조석과 조류의 특성을 살펴보았다. 전처리 과정을 거친 해수면 자료와 유속( $u, v$ ) 자료를 각각 조화분해한 조석과 조류의 분조별 조화상수로부터 알 수 있듯이(Table 1), 연구해역은 평균대조차가 약 8 m 이상으로 조차가 매우 크며, 조석형태수  $F[(a_{K_1} + a_{O_1})/(a_{M_2} + a_{S_2})] = 0.17$ 로 반일주조가 우세한(semidiurnal form) 해역이다. 조석과 달리 조류의 경우는 주요 천해분조인  $M_4(8 \text{ cm s}^{-1})$ 와  $MS_4$ 의 진폭( $6.4 \text{ cm s}^{-1}$ )이 주요 일조인  $O_1(4 \text{ cm s}^{-1})$ 과  $K_1$ 의 진폭( $6 \text{ cm s}^{-1}$ )보다 더 크다. 장주기와 관련하여 반년 주기의 조류분조  $S_{sa}$ 의 진폭( $4.4 \text{ cm s}^{-1}$ )이 일년 주기의

**Table 1. Results of harmonic analyses performed on the 369-day observational records (1 Nov 2006 - 4 Nov 2007) of current velocity and height from the Tidal Current Signal Station located in the narrow waterway in front of the Incheon Lock, Korea**

Constituents	Frequency (hr <sup>-1</sup> )	Tidal current ellipse				Tidal velocity		Tide	
		$a_{\text{Max}}$	$b_{\text{Min}}$	$\Phi$	$\Psi$	A	G	$a$	$g$
$S_a$	0.0001141	6.2	0.6	31	54	3.9	61	17.2	281
$S_{sa}$	0.0002282	4.4	-2.5	41	153	3.7	127	3.6	246
$M_{sm}$	0.0013098	0.9	-0.8	70	220	0.9	212	1.9	117
$M_m$	0.0015122	2.5	0.3	78	8	2.5	9	1.0	23
$M_{sf}$	0.0028219	10.3	0.3	70	57	10.1	58	1.4	227
$M_f$	0.0030501	4.5	-0.7	57	59	4.1	55	3.2	214
$ALP_1$	0.0343966	0.2	-0.1	47	333	0.2	329	0.5	304
$2Q_1$	0.0357064	0.4	-0.1	48	62	0.3	55	1.1	164
$SIG_1$	0.0359087	0.6	-0.1	85	306	0.6	309	0.5	65
$Q_1$	0.0372185	0.7	-0.02	85	150	0.8	150	5.9	241
$RHO_1$	0.0374209	0.4	0.1	69	106	0.4	112	1.2	220
$O_1$	0.0387307	4.1	0.1	81	181	4.1	181	29.2	264
$TAU_1$	0.0389588	1.1	-0.2	66	324	1.0	322	0.6	49
$BET_1$	0.0400404	0.2	0.1	93	141	0.1	147	0.4	233
$NO_1$	0.0402686	0.3	0.1	65	176	0.3	178	2.3	288
$CHI_1$	0.0404710	0.1	0.04	44	230	0.1	249	0.4	251
$PI_1$	0.0414385	0.5	0.1	66	256	0.5	262	1.2	29
$P_1$	0.0415526	1.8	0.6	70	162	1.8	166	10.8	296
$S_1$	0.0416667	1.1	0.1	44	3	0.9	8	2.8	45
$K_1$	0.0417807	5.9	0.4	79	217	5.9	218	39.3	303
$PSI_1$	0.0418948	1.1	-0.2	49	95	0.9	89	0.5	118
$PHI_1$	0.0420089	1.0	0.02	44	194	0.8	197	1.1	269
$THE_1$	0.0430905	0.2	-0.05	23	169	0.2	148	1.2	359
$J_1$	0.0432929	0.3	0.2	94	204	0.3	194	2.0	329
$SO_1$	0.0446027	0.4	0.1	56	74	0.4	77	1.4	87
$OO_1$	0.0448308	0.3	-0.1	19	65	0.1	31	1.2	16
$UPS_1$	0.0463430	0.0	0.02	175	172	0.0	119	0.1	278

Table 1. Continued

Constituents	Frequency (hr <sup>-1</sup> )	Tidal current ellipse				Tidal velocity		Tide	
		$a_{\text{Max}}$	$b_{\text{Min}}$	$\Phi$	$\psi$	A	G	$a$	$g$
OQ <sub>2</sub>	0.0759749	0.2	-0.01	60	219	0.2	208	0.9	249
EPS <sub>2</sub>	0.0761773	1.2	0.2	84	119	1.2	118	3.4	171
2N <sub>2</sub>	0.0774871	0.3	0.1	91	299	0.3	297	3.0	96
MU <sub>2</sub>	0.0776895	4.2	0.3	73	137	4.2	137	11.3	181
N <sub>2</sub>	0.0789992	10.9	1.1	84	24	10.9	23	48.9	109
NU <sub>2</sub>	0.0792016	2.9	0.2	79	16	2.9	16	10.5	97
H <sub>1</sub>	0.0803973	1.4	-0.3	145	93	0.7	111	3.1	19
M <sub>2</sub>	0.0805114	68.2	7.4	82	45	68.1	45	285.5	130
H <sub>2</sub>	0.0806255	1.7	-0.1	110	339	1.5	340	2.6	119
MKS <sub>2</sub>	0.0807396	1.1	-0.04	93	176	1.1	175	2.9	258
LDA <sub>2</sub>	0.0818212	1.7	0.3	88	54	1.7	53	5.8	136
L <sub>2</sub>	0.0820236	4.4	0.7	79	38	4.4	38	12.4	116
T <sub>2</sub>	0.0832193	1.8	-0.2	66	121	1.8	120	7.7	185
S <sub>2</sub>	0.0833333	26.1	3.1	83	101	26.1	101	114.9	188
R <sub>2</sub>	0.0834474	0.9	0.7	39	81	0.8	117	1.7	231
K <sub>2</sub>	0.0835615	7.2	1.0	85	96	7.2	96	32.2	182
MSN <sub>2</sub>	0.0848455	0.9	0.4	97	282	0.8	274	3.0	6
ETA <sub>2</sub>	0.0850736	0.2	0.1	78	117	0.2	114	1.1	208
MO <sub>3</sub>	0.1192421	1.3	0.2	73	51	1.3	52	3.8	184
M <sub>3</sub>	0.1207671	0.5	0.2	82	293	0.5	290	1.9	347
SO <sub>3</sub>	0.1220640	0.4	0.1	27	36	0.3	53	2.5	270
MK <sub>3</sub>	0.1222921	0.7	-0.2	67	352	0.7	349	2.6	277
SK <sub>3</sub>	0.1251141	0.9	0.2	52	112	0.8	117	1.3	288
MN <sub>4</sub>	0.1595106	2.7	-0.5	79	151	2.6	150	1.9	110
M <sub>4</sub>	0.1610228	8.0	-1.2	84	170	8.0	171	5.7	126
SN <sub>4</sub>	0.1623326	1.1	-0.1	67	232	1.1	232	1.2	190
MS <sub>4</sub>	0.1638447	6.4	-0.9	80	225	6.5	224	5.6	191
MK <sub>4</sub>	0.1640729	1.5	-0.3	91	212	1.5	213	1.6	181
S <sub>4</sub>	0.1666667	0.7	0.2	58	285	0.6	293	1.5	280
SK <sub>4</sub>	0.1668948	0.5	-0.01	58	233	0.4	229	0.9	270
2MK <sub>5</sub>	0.2028035	0.7	0.1	90	116	0.7	117	0.3	130
2SK <sub>5</sub>	0.2084474	0.1	-0.1	5	280	0.1	201	0.2	198
2MN <sub>6</sub>	0.2400221	2.3	0.1	81	318	2.3	319	0.9	46
M <sub>6</sub>	0.2415342	5.3	0.02	81	344	5.3	345	2.0	62
2MS <sub>6</sub>	0.2443561	7.0	0.1	81	40	7.0	40	2.6	126
2MK <sub>6</sub>	0.2445843	1.7	0.1	74	37	1.6	37	0.8	117
2SM <sub>6</sub>	0.2471781	1.8	0.2	79	93	1.8	92	1.1	195
MSK <sub>6</sub>	0.2474062	1.0	0.04	83	81	1.0	82	0.5	187
3MK <sub>7</sub>	0.2833149	0.2	0.0	83	309	0.3	303	0.1	309
M <sub>8</sub>	0.3220456	1.1	-0.3	93	149	1.1	151	0.1	284
M <sub>10</sub>	0.4025570	0.4	-0.04	77	359	0.4	3	0.01	191

Note that  $a_{\text{Max}}$ ,  $b_{\text{Min}}$ ,  $\Phi$  and  $\psi$  indicate the semi-major axis (cm s<sup>-1</sup>), the semi-minor axis (cm s<sup>-1</sup>), inclination (°) and phase (°) of the tidal current constituents, respectively. (A,  $a$ ) and (G,  $g$ ) are the amplitude (cm s<sup>-1</sup>, cm) and phase-lag (°) of the tidal current-velocity and tide constituents.  $\psi$ , G and  $g$  are referenced to 135°E

$S_a$  조류분조 진폭( $6.2 \text{ cm s}^{-1}$ )의 71%를 차지한 반면에, 조석분조  $S_{sa}$ 의 진폭( $3.6 \text{ cm}$ )이  $S_a$  조석분조 진폭( $17.2 \text{ cm}$ )의 21%를 차지하여 조류에 비하여  $S_a$  분조의 진폭이 큰 특성을 보인다. 14.77일의 주기를 갖는 장주기 천해 조류분조  $M_{sf}$ 의 진폭은  $10.1 \text{ cm s}^{-1}$ 로 가장 큰  $M_2$  분조 진폭( $68.1 \text{ cm s}^{-1}$ )의 14.8%를 차지한다.  $M_{sf}$  조류분조는 전체 조류분조 중 네 번째로 큰 진폭을 보인 반면에,  $M_{sf}$  조석분조의 진폭( $1.4 \text{ cm}$ )은  $M_2$  조석분조 진폭( $285.5 \text{ cm}$ )의 0.5%로 주요 분조에 속하지 않는다. 전지구적으로  $M_f$  분조는 전형적으로 우세한 격주(fortnightly)조이지만, 천해에서  $M_2$ 와  $S_2$  사이의 비선형적 작용에 의한  $M_{sf}$  분조가 더 우세한 격주조로 알려져 있다(Adalgeirsdottir et al. 2008). 이 지역 조류의 경우  $M_{sf}$  분조가  $M_f$  분조보다 더 우세하지만, 조석의 경우에는 반대로  $M_f$  분조가 더 우세하다(Table 1). 분조의 진폭크기에 따라 내림차순으로 8번째 분조까지 나열하면 조류는  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $M_{sf}$ ,  $M_4$ ,  $K_2$ ,  $2MS_6$ ,  $MS_4$  분조 순으로 일주조를 포함하지 않고 반일주조와 장주기 천해분조(격주조) 그리고 (단주기)천해분조로 이루어져 있다. 이들 분조가 전체 68개 분조 진폭합의 약 64%를 차지한다. 조석은  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $O_1$ ,  $S_a$ ,  $L_2$  분조 순으로 진폭이 작으며, 이들 반일주조, 일주조 그리고 일년주기 분조의 진폭합이 전체 진폭합의 약 78%를 차지한다. 이처럼 조석과 조류는 분조별 진폭 크기에 따른 상대적 중요도가 서로 다르다(Table 2).

### $S_2$ 와 $K_1$ 조류·조석 조화상수의 월변동 특성 비교

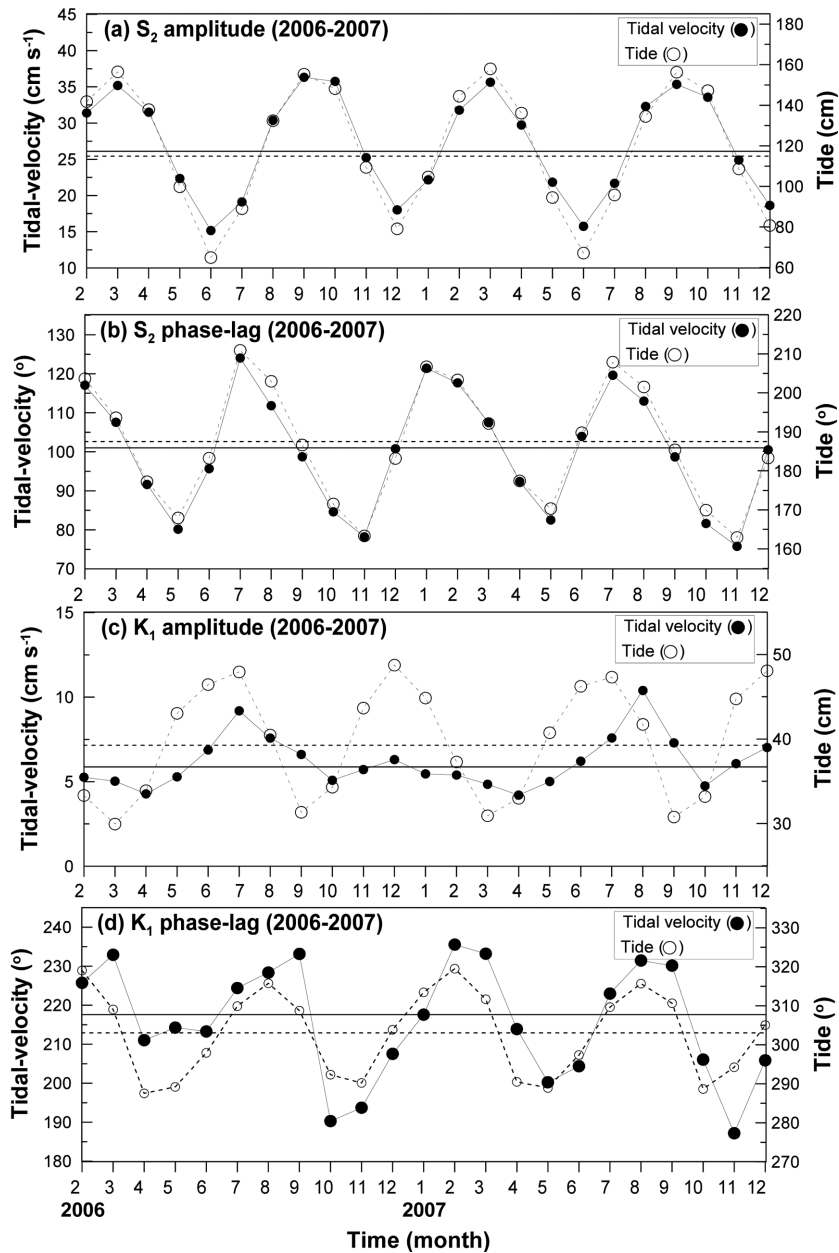
1개월 단기 해수면 관측자료를 조화분해하였을 때 생기는  $S_2$ 와  $K_1$  조석분조에 대한 조화상수의 월변동에 관해서는 잘 알려져 있지만(Boon 2004), 상대적으로 1년 이상의 관측자료 확보가 어려운 유속에 대한 조류 조화상수의 월변동 특성을 구체적으로 보여준 연구는 드물다. 이 연구에서는 인천 갑문앞 조류신호소에서 해수면과 유속이 동시에 관측된 자료를 월별로 조화분해하여  $S_2$ 와  $K_1$  조류·조석조화상수의 월변동 특성을 비교하였다.

먼저,  $S_2$ 와  $K_1$  조류분조에 대한 조화상수의 월변동 특성을 살펴보기 위하여, 주성분 분석(Principal Component Analysis) 결과를 바탕으로 협수로 방향을 북쪽으로 좌표 변환한 유속을 사용하여 매월 29일로 구성된 23개월간의 자료를 월별로 조화분해하였다. 월별  $S_2$  조류분조의 진폭과 지각은 뚜렷한 반년 주기 변동을 보인 반면에,  $K_1$  조류분조의 지각은 약한 반년 주기 변동을 보이고 진폭은 뚜렷한 반년 주기 변동을 보인다(Fig. 2).  $S_2$  분조의 월별 진폭은 3월과 9월에 약  $36 \text{ cm s}^{-1}$ 로 가장 크고, 6월과 12월에  $15\sim 18 \text{ cm s}^{-1}$  이하로 가장 작다(Fig. 2(a)). 특히 월별 진폭이 상대적으로 작은 6월과 12월 중에서 6월의 진폭이  $2\sim 3 \text{ cm s}^{-1}$  정도 더 낮으며, 연중 최대 진폭 차이는 약  $20 \text{ cm s}^{-1}$ 이다. 진폭에 대한 월별 변동성과 달리 월별  $S_2$  분조의 지각은 5월과 11월에 약  $75\sim 80^\circ$ 로 가장 빠르고 1월과 7월에 약  $117\sim 121^\circ$ 로 가장 느려서 빠른 달과 느린

**Table 2. Ratios of each one ( $a_i$ ) versus  $M_2$  ( $a_{M_2}$ ) amplitude, total ( $a_i/\sum_{j=1}^{68} a_j$ ) and their accumulation ( $\sum_{k=1}^i a_k/\sum_{j=1}^{68} a_j$ ) on 8 major tidal current-velocity and tide constituents ( $i$ ), according to the descending order of amplitudes listed in Table 1**

	Order	Constituent ( $i$ )	$a_i/a_{M_2}$	$a_i/\sum_{j=1}^{68} a_j$	$\sum_{k=1}^i a_k/\sum_{j=1}^{68} a_j$
Tidal currents	1	$M_2$	1	0.3029	0.3029
	2	$S_2$	0.383	0.1161	0.4189
	3	$N_2$	0.160	0.0485	0.4675
	4	$M_{sf}$	0.148	0.0448	0.5123
	5	$M_4$	0.117	0.0355	0.5478
	6	$K_2$	0.105	0.0319	0.5797
	7	$2MS_6$	0.103	0.0311	0.6108
	8	$MS_4$	0.095	0.0287	0.6395
Tides	1	$M_2$	1	0.3845	0.3845
	2	$S_2$	0.397	0.1528	0.5373
	3	$N_2$	0.173	0.0666	0.6039
	4	$K_1$	0.139	0.0534	0.6573
	5	$K_2$	0.115	0.0442	0.7016
	6	$O_1$	0.103	0.0395	0.7410
	7	$S_a$	0.069	0.0266	0.7677
	8	$L_2$	0.040	0.0154	0.7830

Note that 68 was the total number of constituents derived from the 1-year harmonic analysis



**Fig. 2.** Monthly variation in the amplitudes and phase-lags of the  $S_2$  (a, b) and  $K_1$  (c, d) tidal-velocity (●) and tide (○) calculated from harmonic analysis of 29-day records observed at the observation station from Feb 2006 to Jan 2007. The solid and dashed lines in each panel indicate results of the 369-day tidal-velocity and tide harmonic analyses, respectively

달의 지각 차이는 35~40° 정도이다.  $S_2$  조류분조의 진폭 변동은 반년주기의 코사인(cosine) 파형에 가깝게 보이는 반면에, 지각 변동은 반년주기의 지그재그(zigzag) 톱날 모양을 한다(Fig. 2b). 이는  $S_2$  조석 조화상수의 월별 변동성과 매우 유사하다(Fig. 2a, b).

$S_2$  조류분조와 달리  $K_1$  조류분조의 월별 진폭은 7월과 8월에 9~10  $\text{cm s}^{-1}$ 로 가장 크고, 4월에 약 4.2  $\text{cm s}^{-1}$ 로 가장 작다(Fig. 2c). 10월부터 12월까지 진폭이 약 1  $\text{cm s}^{-1}$

씩 증가한다. 또한 지각은 2006년에는 3월과 9월에 약 232~233°로 가장 느리고, 10월에 약 190°로 가장 빠르다(Fig. 2). 그러나 2007년에는 2006년에 비해 약 1개월 빠른 2월과 8월에 230~235°로 가장 느리고, 11월에 187°로 가장 빠르다.

전체적으로  $S_2$  조류분조 진폭과 지각의 월별 변동성은 진폭이 10  $\text{cm s}^{-1}$ 이고, 반년 주기의 코사인(cosine)과 톱날 모양의 파형을 보여준다. 반면에,  $K_1$  조류분조 진폭은

이러한 월별 변동성을 보여주지 않고 지각은 2007년에 사인(sine) 파형에 가까운 월별 변동성을 보인다. 이는  $S_2$ 와  $K_1$  조석분조의 진폭과 지각이 모두 뚜렷한 월변동성을 보이는 것과 대조적이다. 조석분조  $K_1$ 과 달리, 조류분조  $K_1$  진폭의 월변동이 뚜렷하지 않는 이유는 조석에서  $K_1$  분조가 4번째로 큰 분조에 속하지만, 조류에서는 9번째 분조로 진폭이 작아서 유사주기의 분조들로부터 잘 분리되지 않는 것 같다. 또한  $S_2$ 와  $K_1$  조석분조 진폭의 월변동성 (Fig. 2a, c)은  $S_2$  진폭이 가장 클 때  $K_1$  진폭이 가장 작은 진폭변화 위상이 서로 거의 반대인 톱니 모양의 파형을 띠는 반면에, 이들 지각의 월변동성(Fig. 2b, d)은 지각변화 위상이 서로 비슷하거나 한 달간의 차이를 보인다.

#### 단기 유속관측자료로부터 조화상수 추정법 고찰

앞 절에서 매월 유속관측자료에서 구한 월별 진폭과 지각의 변동성이  $S_2$  분조의 경우 최대 약  $20 \text{ cm s}^{-1}$ 와  $40^\circ$  이상으로 큰 결과에서도 확인할 수 있듯이, 분석에 사용되는 관측자료가 짧은 경우 주요 분조에 분리되지 못한 주기가 유사한 이웃 분조성분이 섞여 있다. 일반적으로 많이 사용하고 있는 IOS(Foreman 1977; Foreman 1978)와 TIRA(Bell et al. 1999) 조화분해프로그램에는 이들 추정계수 값(진폭비와 지각차)을 입력값으로 주어 간접적으로 이웃 분조를 분리해 낼 수 있는 기능을 내재하고 있다. IOS(또는 T\_TIDE) 조석·조류 조화분해프로그램에는 분리할 분조 ( $K_1, P_1$ )과 ( $S_2, K_2$ ) 분조에 대한 추정계수 값이 주어져 있으며, 사용자가 임의로 분리할 분조의 쌍(즉, 기준분조와 추정(관련)분조)을 추가할 수 있다. TIRA 조화분해프로그램에는 8개 분조의 쌍 즉, ( $PI_1, K_1$ ), ( $P_1, K_1$ ), ( $PSI_1, K_1$ ), ( $PHI_1, K_1$ ), ( $2N_2, N_2$ ), ( $Nu_2, N_2$ ), ( $T_2, S_2$ ), ( $K_2, S_2$ ) 분조에 대한 진폭비와 지각차가 기본값(default)으로 주어져 있다. 기본값으로 주어진 이들 분조

의 진폭비는 천문 포텐셜(astronomical potential)로부터 계산된 평형 관계식(equilibrium relationships)에 근거한 값이며 지각차는 없다고 가정한다. TIRA는 IOS(T\_TIDE)와 마찬가지로 사용자가 임의로 분리할 분조의 쌍을 추가하거나 삭제할 수 있으며, 추정계수 값도 조정할 수 있다. IOS(T\_TIDE)를 사용할 경우 유의할 점으로 동일한 기준분조로부터 주기가 유사한 여러 분조를 분리할 수 있는 TIRA와 달리 하나의 기준분조 쌍만 사용해야 한다. IOS(T\_TIDE) 추정법은 ( $S_2, K_2$ )와 ( $S_2, T_2$ )를 동시에 분리해 낼 수 없다. 또한 지각차 계산에 있어서 TIRA와 IOS(T\_TIDE)는 빼는 순서가 다르다는 점에 유의할 필요가 있다. TIRA는 추정(관련)분조 지각에서 기준분조 지각을 뺀 값을 사용하는 반면에, IOS(T\_TIDE)는 반대로 기준분조 지각에서 추정(관련)분조 지각을 빼 값을 입력값으로 사용해야 한다.

인근에 장기관측자료가 없어 추정계수 값을 직접 계산하여 줄 수 없을 경우, TIRA처럼 주기가 유사한 이들 분조 사이에 지각차가 없다고 가정하고 평형 관계식에 근거한 진폭비만을 적용할 수 있다(Pugh 1987). 이 방법의 적용 가능성과 관련하여 관측분석결과(Table 1)로부터 계산된 주요 분조쌍에 대한 조류·조석추정계수 값을 비교해 보았다(Table 3). 조류분조( $S_2, K_2$ )에 대한 진폭비는 0.275로 평형 관계식의 값과 거의 유사하고, 그 지각차는  $-5.1^\circ$ 로 작아서 이들 분조쌍은 평형 관계식에 근거한 진폭비만을 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 주요 분조쌍들은 지각차 값이 크거나 진폭비 값에 큰 차이를 보여 단순 평형 관계식을 적용하는데 무리가 있다. 이 결과는 ( $S_2, K_2$ ) 조석분조쌍의 추정계수 값을 단기 유속자료의 조류조화분해에 적용하여  $S_2$  조류조화상수의 월변동성을 줄일 수 있지만, 이를 제외한 주요 조석분조쌍과 이들의 추정계수를 그대로 조류조화분해에 적용할 수 없다는 사실

**Table 3. Values of the inference parameters (ratio of related amplitude to reference amplitude and phase-lag difference between reference phase-lag to related phase-lag) calculated from harmonic analysis of the 369-day tidal current velocity records ( $\alpha_v, \beta_v$ ) tilted along the channel and tides ( $\alpha_t, \beta_t$ ) observed near Incheon Lock and tidal potential amplitudes ( $\alpha_E$ )**

Pair of constituents ( <i>i, j</i> )	Synodic period (days)	Tidal-velocity		Tide		Tidal potential	Reference
		$\alpha_v$	$\beta_v$	$\alpha_t$	$\beta_t$	$\alpha_E$	
( $S_2, K_2$ )	182.7	0.275	-5.1	0.290 (0.280)	-4.7 (-4.9)	0.272	Pugh (1987), Foreman et al. (1995)
( $S_2, T_2$ )	365.3	0.068	19.3	0.067 (0.058)	-3.6 (-1.0)	0.059	
( $N_2, Mu_2$ )	31.8	0.383	114.5	0.229 (0.230)	69.3 (68.4)	0.160	
( $N_2, Nu_2$ )	205.9	0.266	-7.5	0.203 (0.224)	-12.3 (-6.6)	0.194	
( $K_1, P_1$ )	182.7	0.301	-51.7	0.308 (0.282)	-10.0 (-8.5)	0.331	
( $M_{Sf}, M_f$ )	182.6	0.408	-2.3	1.339 (3.703)	-35.5 (-70.7)	11.439	

Note that the values in parentheses were calculated from the 2007 tidal harmonic analysis of the Incheon Tidal Station operated by the Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA)

을 보여준다. 또한 인근 인천조위관측소에서 관측한 해수면자료의 조석조화분해 결과로부터 산출한 주요 분조쌍에 대한 추정계수 값과 유사하므로(Table 3), 유속관측지점에 대한 해수면 장기관측자료가 없을 경우, 인근 상시조위관측소 조석조화분해 결과를 단기 유속자료의 조류조화분해시에 활용 가능하다는 것을 알 수 있다. 조석조화분해의 경우에는 조화분해 프로그램(IOUS, T\_TIDE, TIRA)에서 기본값으로 주어지는 ( $S_2$ ,  $K_2$ )와 ( $K_1$ ,  $P_1$ ) 분조쌍에 대해선 지각차가 없고 평형 관계식에 의한 진폭비만으로 어느 정도 분리될 수 있음을 보여준다.

앞에서 살펴본 조화분해 프로그램에 내재되어 있는 유사분조의 진폭비와 지각차를 입력값으로 사용하는 추정법과 달리, Schureman 추정법은 근본적으로 평형조석 이론을 바탕으로 하며, 1년 미만의 단기(15일, 29일, 58일, 87일, 105일, 134일, 163일, 192일, 221일, 250일, 279일, 297일, 326일) 해수면 자료를 조화분해한 분조별 조화상수에서 관측자료 시작시각에 각 추정(관련)분조( $P_1$ ,  $K_2$ ,  $T_2$ )에 대한 각 기준분조( $K_1$ ,  $S_2$ ,  $S_2$ )별 지각 가속(acceleration)과 진폭 증가율을 적용하여  $K_1$ 과  $S_2$ 의 조화상수를 보정한다(Schureman 1976). Table 3에서 조석분조 ( $S_2$ ,  $K_2$ ), ( $S_2$ ,  $T_2$ ), ( $K_1$ ,  $P_1$ )에 대한 지각차가  $-3.6^\circ$ 에서  $-10^\circ$ 로 상대적으로 작고 진폭비도 평형 관계식 값과 어느 정도 유사하므로,  $K_2$  분조뿐만 아니라  $T_2$  분조도  $S_2$  분조에서 분리가 가능하다는 사실을 알 수 있다. 국내에선 Lee and Kim (1988)이 Schureman 추정법을 사용하여 제주도 주변해역에서 단기(29일) 관측한 해수면 자료를 조석조화분해한 후 그 결과로부터  $K_1$  조석 조화상수의 월변동성을 만족스럽게 보정하였다.

#### 단기 유속관측자료로부터 $S_2$ 조화상수 월변동성 보정

단기 유속관측자료의 조화상수 월변동성 보정을 위한 추정법(inference)으로 크게 네 가지 방법을 생각할 수 있다. 첫째, 장기 유속관측자료의 조화분해 결과로부터 산출한 조류 추정계수를 사용하는 방법(조류조화상수이용 추정법, Foreman 1978) 둘째, 인근 해수면관측자료의 조화분해 결과로부터 산출한 조석 추정계수를 사용하는 방법(조석조화상수이용 추정법, Godin 1972) 셋째, 평형조석 이론에 근거한 진폭비 추정법(평형조석포텐셜이용 추정법, Pugh 1987; Bell et al. 1999) 넷째,  $K_1$ 과  $S_2$  분조의 지각 가속과 진폭 증가율을 보정하는 Schureman 추정법(Schureman 1976)이 있다.

이 방법들(Table 3의 추정계수)을 적용하여  $M_2$  분조 다음으로 가장 큰  $S_2$  조화상수의 월별 변동성을 얼마나 줄일 수 있는지 살펴보았다. 먼저, 369일 유속관측자료(2006년 11월 1일부터 2007년 11월 4일)의 조류조화분해 결과로부터 계산된  $S_2$ 의 진폭비와 지각차로부터 조류 추

정계수를 산출하여 조류조화상수이용 추정법을 적용하였다. 1년 조화분해결과(진폭:  $26.1 \text{ cm s}^{-1}$ , 지각:  $101^\circ$ )를 기준으로 추정법을 적용하지 않은 결과와  $S_2$  분조의 월별 진폭 변동성을 비교하였을 때 조류조화상수이용 추정법을 사용하기 전 최대(최소)진폭  $10.2(-10.9) \text{ cm s}^{-1}$ 에서 조류조화상수이용 추정법을 적용하고 난 후  $2.9(-3.1) \text{ cm s}^{-1}$  이내로 진폭 값의 변화 폭이 감소하였다(Fig. 3a). 즉, 월변동성의 최대 진폭차가 추정법 적용 전과 후를 기준으로  $21.2 \text{ cm s}^{-1}$ 에서  $6.0 \text{ cm s}^{-1}$ 로 약  $15 \text{ cm s}^{-1}$  완화되었다. 지각 역시 조류조화상수이용 추정법 사용 전에는 1년 분석결과를 기준으로 최대(최소)값은  $23(-25)^\circ$ 를 보였지만 추정법 사용 후에는  $5(-6)^\circ$  이내로 최대와 최소 지각값 간의 진폭차가 약  $48^\circ$ 에서  $11^\circ$ 로  $37^\circ$  만큼 크게 완화되었다(Fig. 3b).

그러나 조류조화상수이용 추정법은 장기 유속관측자료 또는 분석결과에 확보가 쉽지 않기 때문에 현실적으로 조류조화상수의 월변동성 보정에 조류조화상수이용 추정계수법을 사용하기 어렵다. 그 대안으로 인근 연안의 조위관측소(여기에선 인천 상시조위관측소)로부터 장기 관측자료 확보가 상대적으로 용이한 조석조화상수이용 추정계수법을 적용해 보았다. 단, 이 방법은 무조점 근처에서는 적용하기 힘들다고 알려져 있다(Godin 1972). 조류조화상수이용 추정계수법을 적용한 결과와 유사하게, 조석조화상수이용 추정계수법을 적용하고 난 후, 1년 조화분해  $S_2$  조류조화상수 값을 기준으로 최대 진폭값( $1.9 \text{ cm s}^{-1}$ )과 최소 진폭값( $-3.7 \text{ cm s}^{-1}$ ) 간의 차이는  $5.6 \text{ cm s}^{-1}$  이내로 감소하였으며, 최대 지각값( $9.5^\circ$ )과 최소 지각값( $-7.3^\circ$ ) 간의 차이 또한  $16.8^\circ$  이내로 완화되었다(Fig. 3). 이러한 조석조화상수이용 추정계수법을 사용한  $S_2$  조류조화상수의 월변동 완화효과는 앞에서 살펴본  $S_2$  조석분조 진폭과 지각의 월변동 형태가  $S_2$  조류분조의 진폭과 지각의 월변동 형태와 매우 비슷하게 나타나는 결과(Fig. 2a, b)와 관련이 깊다.

또한 인근에 장기 해수면 관측자료나 상시조위관측소가 없는 경우, 평형 조석이론을 바탕으로 하는 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법을 사용하여  $S_2$  조류 조화상수의 월변동을 보정할 수 있다. 앞의 두 추정계수법을 적용한 경우와 마찬가지로 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법을 각각 적용한 후 1년 조화분해  $S_2$  조류조화상수 값을 기준으로 최대·최소 진폭값 간의 차이는  $6.0 \text{ cm s}^{-1}$ 와  $6.2 \text{ cm s}^{-1}$ 로 감소하였으며, 최대·최소 지각값 간의 차이는  $13.5^\circ$ 와  $13.0^\circ$  이내로 줄어들었다(Fig. 3).

좀 더 정량적으로 위의 네 가지 추정법에 대한 적용효과를 비교하기 위하여 1년 유속관측자료를 조화분해하여 산출한  $S_2$  조화상수와 각 추정법을 적용하여 월별로 조화



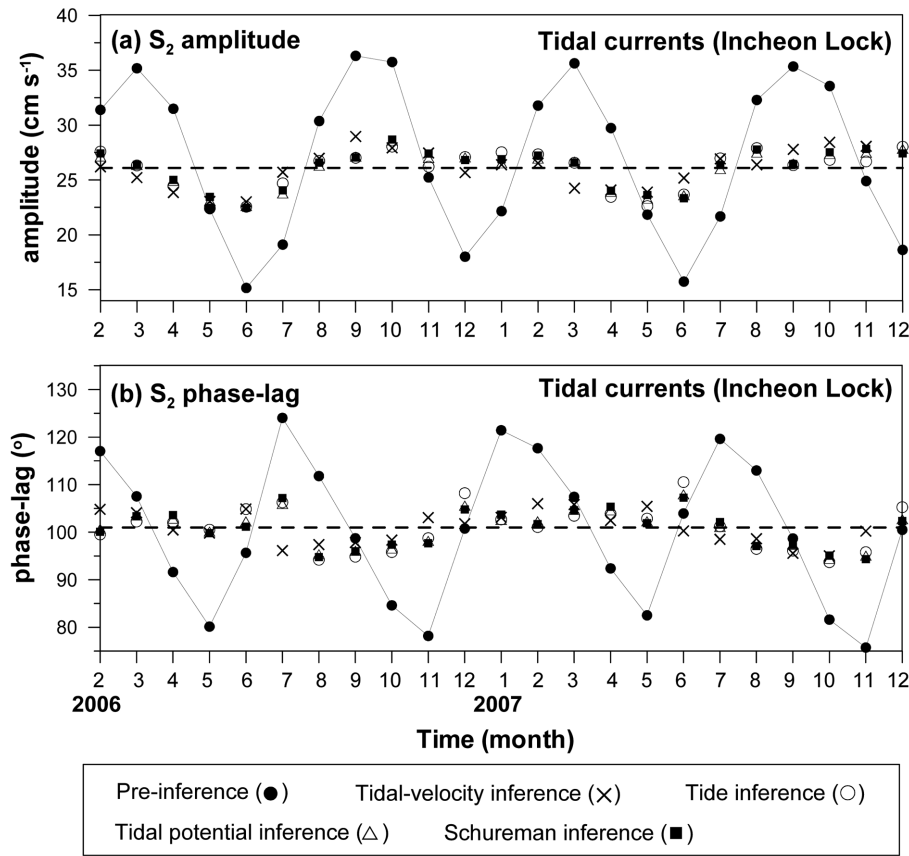


Fig. 3. Comparison of the effect of corrections for  $S_2$  tidal-velocity constant between four different inference methods (i.e., inferences derived from tidal-velocity, tide, tidal potential and Schureman). The dashed line in each panel indicates results of the 369-day harmonic analyses of the  $S_2$

Table 4. Comparisons of Root Mean Square Errors (RMSE) of the  $S_2$  amplitudes ( $a_{S_2}$ ) and phases ( $g_{S_2}$ ) for tidal velocity between pre-inference and four experiments of tidal-velocity derived-inference, tide derived-inference (KHOA Incheon Tidal Station) and tidal potential derived-inference using the inference parameters listed in Table 3 and Schureman inference. Case 1 and Case 2 are to separate out the  $S_2$  and  $K_2$  and  $S_2$ ,  $K_2$  and  $T_2$ , respectively

Experiments	RMSE of the $S_2$ tidal velocity constants			
	Case 1 ( $K_2$ )		Case 2 ( $K_2, T_2$ )	
	$a_{S_2}$ ( $\text{cm s}^{-1}$ )	$g_{S_2}$ ( $^\circ$ )	$a_{S_2}$ ( $\text{cm s}^{-1}$ )	$g_{S_2}$ ( $^\circ$ )
Pre-inference	7.2	15.0	7.2	15.0
Tidal-velocity inference	1.7 (75.9% ↓)	3.4 (77.5% ↓)	1.0 (86.6% ↓)	2.3 (84.8% ↓)
Tide inference	1.9 (74.1% ↓)	4.6 (69.2% ↓)	1.5 (78.6% ↓)	3.8 (74.9% ↓)
Tidal potential inference	1.7 (75.8% ↓)	3.9 (74.3% ↓)	1.4 (81.0% ↓)	2.8 (81.5% ↓)
Schureman inference	1.8 (75.6% ↓)	4.0 (73.6% ↓)	1.4 (80.6% ↓)	2.9 (80.5% ↓)

RMSEs are calculated from the uncorrected (pre-inference) and corrected (the others) monthly harmonic analysis results of the  $S_2$  tidal currents and tides and their 1-year results. i.e.,  $\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$  where  $x$  is the  $S_2$  constants of each month ( $i$ ) and  $\bar{x}$  is the 1-year analyzed  $S_2$  constant and  $n = 23$ . Values in parentheses indicate the decreasing rates of RMSE compared to the pre-inference case

분해한  $S_2$  조화상수간의 Root Mean Squared Error (RMSE)를 비교하였다(Table 4의 Case 1). 네 가지 방법 모두 진폭과 지각의 RMSE를 69~77% 감소시켰으며, 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법 모두 조류 추정계수법과 비슷한 RMSE 값을 보여주므로 인근에 장기 관측자료가 없을 경우 두 방법 모두 적용가능하다는 것을 알 수 있다.

$S_2$  조류 조화상수의 월변동성을 좀 더 줄이기 위한 방법과 관련하여 1년 관측자료가 있을 경우  $S_2$  분조로부터 분리해 낼 수 있는  $T_2$  분조를 위의 네 가지 추정법을 사용하여 분리한 후 결과를 비교하였다(Table 4의 Case 2). T\_TIDE(또는 IOS) 프로그램의 추정법은 ( $S_2$ ,  $K_2$ )와 ( $S_2$ ,  $T_2$ ) 분조를 동시에 분리해 낼 수 없으므로, 먼저  $T_2$  분조를 추정법을 사용하여 분리한 후 이 조화분해 결과로부터 관측기간과 동일한 기간에 대하여 예측한 후 다시 ( $S_2$ ,  $K_2$ ) 분조에 대한 추정법을 사용하여  $S_2$  분조로부터  $K_2$ 와  $T_2$  분조를 분리하였다.

그 결과  $S_2$  조류 조화상수의 RMSE는  $K_2$  분조에 대한 추정계수법을 적용한 경우에 비하여 4.5~10.7% 더 줄어든 74.9~86.6%의 완화효과를 보였다. 따라서  $S_2$  조화상수의 월변동성을 최대한 완화시키기 위해선  $K_2$  분조와 더불어  $T_2$  분조에 대한 추정법을 적용하는 것이 바람직하다. 특히, 관측결과를 입력값으로 사용하지 않는 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법을 적용하여 80% 이상까지  $S_2$  조화상수의 RMSE를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

일반적으로 많이 사용하고 있는 IOS(T\_TIDE)와 TIRA 조화분해 프로그램의 추정법과 Schureman 추정법을 사용하여 단기(1개월) 유속관측자료를 분석할 때 주요 분조 조화상수의 월변동성을 완화시키는 방법에 관하여 살펴보았다. 먼저, 분해할 조류분조쌍 결정과 관련하여 인천 갑문 협수로에서 2년간(2006-2007년) 관측한 유속·해수면 자료로부터 1년간과 월별 자료를 조화분해하여 조류·조석 조화상수 특성을 살펴보았다. 반일주조의 경우 조류와 조석 모두  $M_2$  분조 다음으로  $S_2$  분조가 강하고 반년 주기를 갖는  $S_2$  조류·조석 조화상수의 월변동 특성이 서로 유사하다. 그러나 일주조의 경우 조석분조  $K_1$ 은 주요 4대 분조에 속할 정도로 강하고  $S_2$  분조 조화상수 월변동 특성과 유사하게 뚜렷한 반년 주기의 월변동 특성을 보인 반면에, 조류분조  $K_1$ 의 진폭은 큰 순으로 9번째에 속해 상대적으로 약하며 진폭은 뚜렷한 월변동 특성을 보이지 않았다. 따라서 조석은 IOS(T\_TIDE) 추정법에서처럼 기본값으로 주어지는  $S_2$ 와  $K_1$  조석 조화상수의 월변동성을 완

화시킬 필요가 있는 반면에, 조류는  $S_2$  분조 조화상수만 월변동성을 완화시킬 필요가 있다.

이와 관련하여 조화분해 프로그램에 포함된 추정법과 Schureman 추정법을 사용하여  $S_2$  조류 조화상수의 월변동성을 완화시켜 보았다. 추정법이 내재된 조화분해 프로그램에서  $K_2$ 와  $S_2$  분조쌍의 추정계수값을 결정하기 위한 방법으로 장기 조류·조석 분석결과를 이용한 조류·조석 조화상수이용 추정법과 평형조석 이론을 바탕으로 조고비만 주는 평형조석포텐셜이용 추정법이 있다.

이들 네 가지 방법을 적용한 결과, 1년간 유속관측자료를 조화분해하여 산출한  $S_2$  조화상수와 월별 조화상수의 RMSE는 69.2~77.5%까지 감소하였다. 그리고  $K_2$ 와  $S_2$  분조쌍과 더불어  $T_2$ 와  $S_2$  분조쌍에 대한 추정법을 적용한 결과, 이들에 대한 RMSE는 74.9~86.6%까지 더 감소하였다. 특히, 장기 관측분석결과를 사용하지 않는 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법을 적용한 결과,  $S_2$  조화상수에 대한 RMSE가 80% 이상까지 줄어들었다. 따라서, 인근에 장기 관측분석결과가 없는 경우 평형조석포텐셜이용 추정법과 Schureman 추정법을 사용하여  $S_2$  조류분조로부터  $K_2$ 와  $T_2$  조류분조를 분리하면  $S_2$  조류 조화상수의 월변동성을 최대한 줄일 수 있다.

#### 사 사

두 분 심사위원님의 세심한 지적과 조언으로 이 논문이 크게 향상되었음을 밝힙니다. 또한 Schureman 추정법 코드를 친절하게 제공해주신 군산대학교 이상호 교수님과 자료처리를 도와 준 조창우, 박세영 연구원께 감사드립니다. 귀중한 관측자료를 제공해 주신 인천지방해양항만청 담당자분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 국립해양조사원(2010a)조석보정시스템 개선 연구: 현황과약 및 개선방향 제시. 국립해양조사원, 166 p
- 국립해양조사원 (2010b) 조류에너지 자원도 개발 연구(I): 관측유속 기반. 국립해양조사원, 591 p
- Adalgeirsdottir G, Smith AM, Murray T, King MA, Makinson K, Nicholls KW, Behar AE (2008) Tidal influence on Rutford Ice Stream, West Antarctica: observations of surface flow and basal processes from closely spaced GPS and passive seismic stations. *J Glaciol* 54:715-724
- Bell C, Vassie JM, Woodworth PL (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 p
- Boon JD (2004) Secrets of the tide: tide and tidal current analysis and applications, storm surges and sea level trends. Horwood Publishing, 212 p
- Byun DS, Cho CW (2009) Exploring conventional tidal prediction schemes for improved coastal numerical forecast modeling. *Ocean Model* **28**:193-202
- Cai S, Long X, Liu H, Wang S (2006) Tide model evaluation under different conditions. *Cont Shelf Res* **26**:104-112
- Emery WJ, Thomson RE (2001) *Data Analysis Methods in Physical Oceanography* (second and revised edition). Elsevier Science, 638 p
- Fang G, Yang J (1988) Modeling and prediction of tidal currents in the Korea Strait. *Prog Oceanogr* **21**:307-318
- Foreman MGG (1977) *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, 58 p
- Foreman MGG (1978) *Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, 57 p
- Foreman MGG, Crawford WR, Marsden RF (1995) De-tiding: theory and practice. In: Lynch DR, Davies AM (eds) *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*. *Coast Estuar Stud* **47**:203-239
- Godin (1972) *The analysis of tides*. University of Liverpool Press, 212 p
- Lee SH, Kim K (1988) Variations of the Diurnal Tides around Jeju-Do. *J Ocean Soc Korea* **23**:62-69
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S (2002) Classical Tidal Harmonic Analysis including Error Estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput Geo Sci* **28**:929-937
- Pugh DT (1987) *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons, Chichester, 472 p
- Schureman P (1976) *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*. Coast and Geodetic Survey, Washington DC, 317 p

---

*Received Dec. 5, 2010*

*Revised Jul. 25, 2011*

*Accepted Aug. 22, 2011*