

# 천문조, 배조 및 복합조 특성을 이용한 경기만 한강하구 구역별 조석체계 분류

## The Regional Classification of Tidal Regime using Characteristics of Astronomical Tides, Overtides and Compound Tides in the Han River Estuary, Gyeonggi Bay

윤병일\* · 우승범\* · 김종욱\* · 송진일\*

Byung Il Yoon\*, Seung-Buhm Woo\*, Jong Wook Kim\* and Jin Il Song\*

**요지** : 경기만 한강하구에서 주요 수로의 조석 전파 특성을 이용하여, 천문조, 배조 및 복합조의 분포를 파악하고, 조석 형태수의 특징에 따라 구역별 조석체계 (tidal regime)를 분류하였다. 주요 수로에서 보이는 조석 전파 특성은 외해는 천문조로 대표되는 5대분조 (e.g.,  $M_2, S_2, N_2, K_1$  및  $O_1$ )가 지배적이지만, 상류로 진입할수록 천해 분조 (e.g.,  $M_4$ )와 장주기 분조 (e.g.,  $MS_3$ )의 뚜렷한 증가가 보인다. 반일주조 성분이 우세한 경기만 및 한강하구에서 천문조, 배조 및 복합조를 이용하여 제시된 조석 형태수 (tidal form number)의 특징에 따라 크게 3구역으로 분류하였다. 1구역은 천문조가 우세한 지역으로 외해에서 인천항 전면까지 (염하수로), 외해에서 석모수로의 북쪽 입구로 제시된다. 2구역은 염하수로 남쪽 입구에서 북쪽 입구까지와 강화 북수로 지역으로 단주기 천해 분조 (e.g.,  $M_4$ 와  $MS_4$ )가 강하게 나타나는 지역이다. 마지막으로 3구역은 신곡 수중보 이후부터 한강 상류지역으로 장주기 복합조 (e.g.,  $MS_3$ )가 제일 우세한 지역이다. 일반적인 하구와 마찬가지로 한강하구의 조석 비선형성은 지형적 특성에 기인한 천해 분조가 증가를 하며, 1/4일주기 (fourth-diurnal) 및 장주기 (long-term period) 분조의 확연한 분포 차이를 보인다. 특히, 수중보의 영향은 구조물의 상류와 하류지점의 조석체계에 지대한 변화를 일으킨다.

**핵심용어** : 천문조, 배조, 복합조, 구역별 분류, 조석 형태수, 한강하구

**Abstract** : In this study, we investigate tidal wave propagation characteristics, and classify regional tidal regime using tidal form number considered distribution of astronomical tide, overtides, and compound tides in the Han River Estuary, Gyeonggi Bay. The characteristics of the tidal wave propagation in main channels show dominance of major tidal constituents (e.g.,  $M_2, S_2, N_2, K_1$  and  $O_1$ ) contributing to the astronomical tide however, distinct increasing of shallow water (e.g.,  $M_4$ ) and long period (e.g.,  $MS_3$ ) components toward up-estuary. Using the characteristics of tidal form number to astronomical tide, overtides, and compound tides, the regional tidal regime could be assorted into three regions. Firstly, a dominance area of astronomical tide was presented from open sea to a front of Incheon Harbor (Yeomha channel) and to north entrance of Seokmo channel. The area between south and north entrance of Yeomha channel and Ganghwa north channel classified into zone of showing strong shallow water components. It could be separated into upper estuary, upstream the Singok underwater dam, showed dominance of shallow overtides (e.g.,  $M_4$  and  $MS_4$ ) water and long-term compound tides (e.g.,  $MS_3$ ) larger magnitude than astronomical tide. The shallow water components was earlier generated in lower part (south entrance) of Yeomha channel have strong bottom by effect of shallower and narrower compared with Seokmo channel. Tidal asymmetries of upper estuary cause by a development of overtides and compound tides are mainly controlled by influence of man-made structure.

**Keywords** : astronomical tide, overtides, compound tides, regional classification, tidal form number, Han River estuary

### 1. 서론

하구는 하천의 담수와 외해의 해수가 만나서 혼합이 발생하는 전이지역으로 해양물리학적, 퇴적학적 그리고 생지화학적 변화가 시공간적으로 매우 복잡하고 독특하게 나타난다.

이러한 시공간적인 변화는 하구의 물리적 외력인 조석, 파랑 및 하천 유량 등의 복합적인 상호작용으로 발생한다 (McLusky and Elliott, 2004). 다양한 외력 조건의 상호 작용에 의한 하구의 다양한 변화를 이해하기 위해서는 각각의 물리적 작용에 대한 연구가 필수적이다. 특히, 하구 지역의 가장 큰 외

\*인하대학교 해양과학과 (Corresponding author: Seung-Buhm Woo, Department of Ocean Science, College of Natural Science Inha University, Incheon 402-751, Korea, Tel: +82-32-860-7710, Fax: +82-32-862-5236, sbwoo@inha.ac.kr)

력 조건 중의 하나인 조석에 대한 연구는 물리적 해양환경 변화에 따른 퇴적학적 그리고 생지화학적 변화를 파악하기 위해 수행되어야 할 가장 기본적인 과정이다.

외해와 비교되는 하구 지역의 특징은 조차의 크기를 수심과 비교할 때 무시할 수 없고, 바닥 마찰의 영향이 강하게 작용하는 것이다 (e.g., Pugh, 1987; Parker, 1991). 이러한 비선형 효과 때문에 일정한 사인 (sine) 형태를 보이는 외해 조석은 하구로 진입하면서 고조와 저조 또는 창조와 낙조의 크기와 지속 시간이 불균형한 조석 변형이 발생한다 (LeBlond, 1978). 조석 변형과 비대칭성은 배조와 복합조로 정의된 천해 분조로 표현할 수 있다 (Gallo and Vinzon, 2005). 천해 분조는 하구 조석 연구의 중요한 요소이고, 지형적 효과, 바닥 마찰 등 여러 비선형 원인에 의해서 발생한다 (Parker, 1991).

천해분조는 결합하는 분조에 따라서 배조 또는 복합조로 정의된다 (Le Provost, 1991). 배조는 동일한 분조의 결합으로 생성되기 때문에 기본 천문조 주파수의 항상 정확한 배수의 주파수와 위상이 고정된 파속을 가진다 (Pugh, 1987). 배조의 생성 원리와는 다르게 두 개의 다른 기본 분조의 중첩으로 발생하는 분조를 복합조라고 한다. 다양한 기본 천문조의 결합으로 배조 또는 복합조가 생성되고, 이러한 영향에 의한 조석 비대칭은 하구와 외해 조석의 가장 큰 차이점이다 (Dronkers, 1986; Pugh, 1987; Dyer 1997).

배조와 복합조에 의해서 변형된 조석의 왜곡 정도는 진폭 성분의 비율 ( $H_{M_4}/H_{M_2}$ )과 상대적인 위상 차이 ( $2\phi_{M_2} - \phi_{M_4}$ )를 이용하여 정량화되었다 (e.g., Friedrichs and Aubrey, 1988). 조석 비대칭의 크기와 방향이 반일주조 중에서  $M_2$  분조 그리고 배조 성분인  $M_4$  분조와의 관계를 중심으로 제시된다. 이러한 전통적인 방법은 다른 분조와의 결합에 의한 반응을 확인해야 하며 다른 천문조가 우세한 지역과의 직접적인 비교가 어렵다 (Song et al., 2011). 반일주조가 강한 지역에서는 배조 성분인  $M_4(M_2 + M_2)$ 가 가장 큰 천해 분조이지만 로 알려져 있지만, 복합조 성분인  $MS_4(M_2 + S_2)$  그리고  $MS_7(M_2 - S_2)$ 를 무시할 수 없다 (Pugh, 1987).

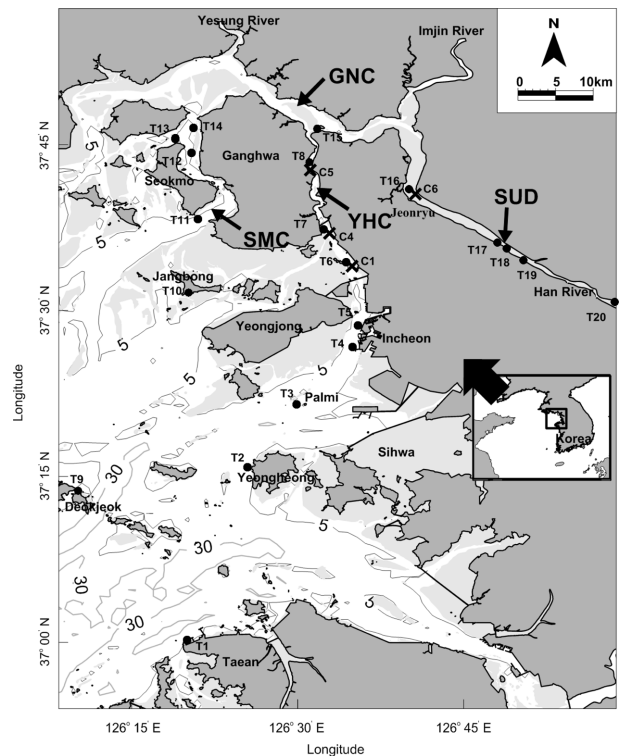
반일주조가 강한 서해 연안은 조차가 크고 수심이 낮기 때문에 조간대가 넓게 분포되어 있다 (e.g., Koh and Kim, 2014). 서해 연안의 대하천 하구는 경기만의 한강하구를 제외하고 대부분 하구둑이 설치되어 있다 (Lee et al., 2011). 지형학적 특징과 인위적인 구조물의 영향 때문에 서해에서 진입하는 조석은 연안 및 하구 지역에 이르면서 천해 분조의 영향으로 변형된다. 서해 연안역에서 천해 분조와 관련된 여러 연구가 진행되었고, 각 지역의 특징에 따라 발생하는 천해 분조의 특성 및 원인을 제시하였다 (e.g., Kang and Jun, 2003; Byun and Cho, 2006; Yoon and Woo, 2011; Yoon and Woo, 2012a).

서해 연안의 조석 비대칭에 대한 기존 연구 중에서 Yoon and Woo (2011)는 경기만의 주된 분조인  $M_2$ 의 진폭 변화를 이용하여 수로 별 조석 전파 특성과 지형적 특성을 제시하였다. Yoon and Woo (2012a)는  $M_2$ 와  $M_4$  성분을 이용하여

한강하구의 조석과 조류의 비대칭성과 낙조우세의 원인을 파악하였다. Byun and Cho (2006)은 서해 남부의 함평만에서  $M_2$ 와  $S_2$ 분조의 결합에 의해 생성된 복합조를 분석하여 창조 이중 고점 (double peak-flood) 현상을 재현하였다. Kang and Jun (2003)은  $M_2$  분조의 조류 타원도 분포와  $M_4$  분조의 크기 및 낙조 지속시간 분석을 통해 영산강과 금강 하구를 각각 낙조와 창조 우세지역으로 구분하였다.

$M_2$  분조 뿐 아니라  $S_2$  분조도 우세한 경기만 한강하구는 다수의 담수 유입원 (한강, 임진강, 예성강과 수로 (염하수로, 석모수로, 교동수로)로 구성되어 있다 (Fig. 1). 각 수로마다 상이한 지형적 (수심, 수로 폭) 특징을 보여준다 (Yoon and Woo, 2011). 또한, 하류부에 설치된 하구둑에 의해 일부 조석 및 염수의 침입이 차단된다 (Yoon and Woo, 2012b). 이러한 지형적 특성의 공간적인 차이와 인위적인 구조물의 영향은 공간적으로 다른 비선형성을 야기할 수 있고, 배조인  $M_4$ 와 더불어 복합조인  $MS_4, MS_7$ 의 공간적 분포가 다르게 나타날 수 있다.

본 연구의 목적은 다양한 외력이 복합적으로 작용하고 수로 별 지형적 특징이 다른 경기만 한강하구의 1) 천문조, 배조 및 복합조가 포함된 조석 전파 특성을 제시하는 것이고, 2) 배조와 복합조가 고려된 천해 조석 형태수 (shallow water tidal form number)를 제시하고 이를 이용하여 3) 경기만 한강하구의 조석체계를 구역별로 분류하는 것이다.



**Fig. 1.** Topographic map of the study area with 5 (thin black line) and 30 m (gray line) isobaths. The observation points for tide (T1–T20, black circles) and for current (C1, C4–C6, × symbols) are shown around Gyeonggi Bay. The shaded areas (light gray) indicate intertidal flats.

## 2. 연구 방법

연구지역의 조석 특징을 정량적으로 분석하기 위해서 외해 지역의 6 정점 (T1–T5, T9), 강화도 동쪽 지역의 4 정점 (T6–T8, T15), 강화도 서쪽 지역의 5 정점 (T10–T14), 그리고 한강하구 상류 지역의 5 정점 (T16–T20)으로 총 20개의 정점의 조석 자료를 수집하였다 (Fig. 1). 수집된 조석 자료는 국립해양조사원 (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, KHOA), 한강홍수통제소 (Han River Flood Control Office, HRFCO)에서 제공 받았고, 연구 보고서 (Ministry of oceans and fisheries, 2001; Ministry of oceans and fisheries, 2002)의 내용을 기반으로 한다. Kim (1997)에서 제시된 경기만 외해에서 한강하구까지의 흐름을 참고하여 조석 자료를 구역별로 구성하면 다음과 같다. 먼저 염하수로 (Fig. 1의 Yeomha channel, YHC)는 대산 (T1) 앞의 동수로 이후 영흥도 (T2), 팔미도 (T3), 인천항 전면 (T4와 T5), 세어도 (T6)를 지나 강화대교 (T8)의 정점으로 구성된다. 다음으로 석모수로 (Fig. 1의 Seokmo channel, SMC)는 외해의 덕적도(T9) 이후 장봉도(T10)를 지나 석모수로 북쪽 입구 (T14)의 정점이다. 염하 및 석모수호가 합쳐진 이후의 한강 하류 정점에는 전류리 (T16)이 있고, 신곡 수중보 (Fig. 1의 Singok underwater dam, SUD)의 하류 (T17) 그리고 상류 (T18–T20) 정점이 있다. 강화 북수로 (Fig. 1의 Ganghwa north channel, GNC)는 군사 지역으로 관측이 불가능하여서 관련 자료가 없다. 강화 북수로를 제외하면 경기만 외해 조석이 상류로 유입되는 흐름을 충분히 분석할 수 있는 자료로 구성되어 있다.

4대분조의 조화상수 값을 이용하여 조석 형태수 (tidal form number,  $F$ ; 식(1))를 계산하였고, 배조 및 복합조의 영향을 평가하기 위해서 천해 조석 형태수를 제시하였다.

$$F = (H_{K_1} + H_{O_1}) / (H_{M_2} + H_{S_2}) \quad (1)$$

$$F_{FD} = (H_{M_4} + H_{MS_4}) / (H_{M_2} + H_{S_2}) \quad (2)$$

$$F_{LP} = (H_{MS_f} + H_{M_f}) / (H_{M_2} + H_{S_2}) \quad (3)$$

여기서,  $H$ 는 각 분조의 진폭을 의미하고, 아래 첨자는 분조를 나타낸다. 식 (1)에 제시된 바와 같이 반일주조 ( $M_2 + S_2$ )와 일주조 ( $K_1 + O_1$ )의 진폭 비로 정의되는 조석 형태수 ( $F$ )가 3.0 이상일 경우는 일주조 형태, 1.5–3.0이면 일주조가 우세한 혼합조, 0.25–1.5 사이 값이면 반일주조가 우세한 혼합조, 그리고 0.25 보다 작을 때는 반일주조 우세로 정의된다 (Defant, 1961; Kjerfve, 1981). 배조와 복합조는 4대 천문조 성분의 주기보다 짧은 1/4일주기 (fourth-diurnal) 성분과 긴 장주기 (long-term period) 성분으로 구분하였다. 주기를 바탕으로 조석 형태수는 단주기 조석 형태수와 장주기 조석 형태

수로 구분하였다. 단주기 조석 형태수 (fourth-diurnal tidal form number,  $F_{FD}$ ; 식(2))는 배조 성분 ( $M_4$ )와 복합조 성분 ( $MS_4$ )를 사용하고 구하고, 장주기 조석 형태수 (long-term period tidal form number,  $F_{LP}$ ; 식(3))는  $M_f$ 과  $MS_f$ 를 이용한다.

조석 형태수와 천해 조석 형태수의 분포 특징과 더불어 조류의 변화를 함께 파악하기 위해서 염하수로의 조류 관측자료 (Song and Woo, 2011; Yoon and Woo, 2012a)를 분석하였다. 조류 자료는 주성분 분석 (principal component analysis)을 사용하여 구한 주축 방향 성분을 조화분해 하여 조화상수를 추출하였다. 한강하구를 구성하는 각각 수로의 지형적인 영향과 함께 인위적인 구조물의 영향을 비교하기 위하여 신곡 수중보 건설 이전 (1985년)과 이후 (2008년)의 행주대교 수위를 비교하였다.

## 3. 연구 결과

### 3.1 천문조, 배조 및 복합조 전파 특성

20개 정점 (T1–T20)에 대한 조화상수 값을 장주기 (long-term period), 일주조 (diurnal), 반일주조 (semi-diurnal) 그리고 1/4일주기 (fourth-diurnal) 성분으로 구분하여 제시하였다 (Table 1). 제시된 조화상수를 사용하여 식 (1)의 조석 형태수 ( $F$ )를 각 정점에 대해서 계산하였다. 대부분 관측지역의  $F$ 는 반일주조 우세 또는 반일주조가 우세한 혼합조의 특성을 보이는 0.17–0.55의 범위로 나타난다 (Table 1). Table 2에 조류의 조화상수를 주기에 따라 구분하여 제시하였다.  $F$ 는 조석과 마찬가지로 반일주조가 우세하게 나타나며, 조류의 시계열 (Song and Woo, 2012) 결과 역시 반일주조가 우세한 흐름을 보여준다 (Fig. 2).

반일주조 (e.g.,  $M_2$ )는 외해에서 하구로 진입하면서 점진적으로 증가하다가 특정 정점 이후에 급격히 감소한다 (Fig. 3a와 4a). 반일주조의 진폭이 급격히 감소하는 위치는 염하수로의 남쪽 입구 (T7)와 석모수로의 북쪽 입구 (T14)이다. 또 다른 반일주조 (e.g.,  $S_2$ ) 및 일주조 (e.g.,  $O_1$ ) 성분은 크기는 작지만,  $M_2$  성분과 비슷한 형태를 보여준다 (Fig. 3a와 4a). 다른 분조 ( $N_2$ 와  $O_1$ ) 분조는 제시하지 않았지만, 상류로 진입하면서 비슷한 경향을 보인다. 이러한 조석 전파 형태는 hyper-synchronous로 정의되고 (Dyer, 1997), Yoon and Woo (2011)의 연구와 일치하는 결과를 보인다.

1/4일주조 (e.g.,  $M_4$ ) 성분은 반일주조 및 일주조 성분의 변화와는 다르게 외해 정점에서는 큰 변화가 없고, 하구로 진입하면서 진폭이 급격하게 증가한다 (Fig. 3b와 4b). 염하수로의 수로의 남쪽 입구 (T7) 및 석모수로의 수로의 북쪽 입구 (T14) 이후부터 20 cm 이상의 증가를 한다. 1/4일주조의 진폭의 최대값은 두 수로가 합류된 지점 (T15)에서 발생한 이후에 점진적으로 감소하다가 T18 (신곡 수중보)에서 급격히 감소한다. 다른 1/4일주조인  $MS_4$  분조도 비슷한 진폭의 크기

**Table 1.** Amplitudes ( $a$ , unit: cm) and phase ( $g$ , unit: degree) of the significant tidal constituents for T1–T20 station. Tidal regime calculated from tidal components

St.	Tidal components (T1–T20 station in Fig. 1)																		Tidal regime (※)			
	Long-term period				Diurnal				Semi-diurnal				Fourth-diurnal				F	F <sub>FD</sub>	F <sub>LP</sub>	R		
	M <sub>m</sub>		MS <sub>f</sub>		O <sub>1</sub>		K <sub>1</sub>		N <sub>2</sub>		M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		M <sub>4</sub>						MS <sub>4</sub>	
	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g					a	g
T1	5.7	125.5	0.9	198.0	26.6	259.5	37.5	288.3	44.1	100.2	243.2	110.9	99.0	160.3	3.5	120.3	3.0	117.4	0.19	0.019	0.019	0.014
T2	2.7	238.0	1.6	244.3	30.8	262.5	48.6	309.8	59.2	102.2	261.7	124.6	84.2	199.4	4.2	125.1	3.4	201.4	0.23	0.022	0.012	0.016
T3	2.1	264.6	0.9	218.8	31.7	263.4	48.8	310.7	62.6	106.0	276.4	127.2	87.9	201.4	5.3	119.1	4.0	200.2	0.22	0.025	0.008	0.019
T4	1.7	164.6	1.5	15.5	29.7	265.0	39.6	303.2	53.3	111.0	288.5	131.3	114.8	188.7	6.6	125.4	6.0	189.4	0.17	0.031	0.008	0.023
T5	3.0	175.3	1.0	339.4	30.1	264.5	39.9	303.4	53.1	112.4	288.9	131.4	117.3	187.4	6.2	119.5	5.5	194.5	0.17	0.029	0.010	0.021
T6	4.0	291.2	0.7	90.1	31.2	267.5	48.6	314.7	64.2	111.4	288.2	133.8	91.6	210.4	4.7	116.1	3.7	193.8	0.21	0.022	0.012	0.016
T7	3.5	191.2	3.4	84.8	30.9	267.2	48.8	315.5	65.9	113.6	290.0	135.5	91.2	212.7	4.4	145.0	3.6	221.8	0.21	0.021	0.018	0.015
T8	11.7	16.4	28.4	56.3	22.1	271.7	27.8	319.8	32.0	156.2	204.3	178.9	73.3	242.8	28.5	305.7	23.3	5.3	0.18	0.186	0.144	0.140
T9	2.4	357.3	2.2	55.3	29.8	261.8	47.3	309.7	56.1	102.5	240.5	125.3	76.4	200.2	3.6	94.2	2.7	173.2	0.24	0.02	0.145	0.015
T10	1.9	254.4	0.6	198.8	31.5	265.2	48.9	313.2	62.9	110.4	277.1	131.9	87.4	206.6	1.3	210.2	1.5	256.5	0.22	0.01	0.007	0.005
T11	1.1	207.1	0.8	78.1	30.9	268.6	49.1	317.7	62.5	118.6	279.0	140.9	88.7	217.9	10.5	197.1	8.0	267.6	0.22	0.05	0.005	0.038
T12	14.3	52.3	5.0	87.6	28.6	271.7	37.9	318.2	53.2	131.3	273.1	148.8	102.0	213.0	14.9	229.3	14.4	273.2	0.18	0.08	0.052	0.055
T13	39.6	85.4	10.9	65.9	26.5	267.6	34.3	322.0	52.3	136.6	264.9	149.5	96.5	218.2	21.9	247.4	20.7	292.1	0.17	0.12	0.140	0.083
T14	16.3	318.0	5.6	19.6	27.4	270.5	36.0	319.7	53.2	133.2	265.0	150.4	93.4	216.1	19.8	241.4	18.1	285.3	0.18	0.11	0.061	0.075
T15	9.4	27.7	32.3	54.6	20.9	278.7	28.4	326.4	35.7	167.3	202.9	191.6	70.9	254.4	35.5	322.7	28.7	21.7	0.18	0.23	0.152	0.175
T16	12.2	94.8	52.5	81.2	15.7	303.9	20.5	345.4	13.3	198.7	104.9	241.6	40.3	310.3	31.8	58.0	29.0	117.1	0.25	0.42	0.445	0.303
T17	20.8	1.0	52.6	221.4	15.4	301.1	14.9	0.5	12.3	222.6	68.0	258.7	25.4	308.8	23.3	96.4	16.9	145.9	0.32	0.43	0.786	0.343
T18	11.8	31.9	22.6	116.1	8.8	270.5	5.3	9.3	4.3	240.9	15.9	272.5	12.0	339.9	4.1	114.8	3.6	191.8	0.51	0.28	1.233	0.258
T19	6.3	31.2	20.8	63.0	4.8	311.2	5.4	357.0	3.5	256.6	12.3	281.2	8.6	338.8	3.6	136.4	3.3	190.3	0.49	0.33	1.297	0.290
T20	9.1	21.3	21.6	60.1	5.1	315.7	5.5	28.7	4.3	269.8	11.4	291.9	7.7	345.8	4.0	172.0	3.5	232.2	0.55	0.39	1.607	0.351

※  $F$ : tidal form number (Eq. 1),  $F_{FD}$ : fourth-diurnal tidal form number (Eq. 2),  $F_{LP}$ : long-term period tidal form number (Eq. 3), and  $R$ : amplitude ratio ( $H_{M_4}/H_{M_2}$ )**Table 2.** Amplitudes ( $a$ , unit: cm) and phase ( $g$ , unit: degree) of the significant tidal constituents for T1–T20 station. Tidal regime calculated from tidal components

St.	Tidal components (C1, C4–C6 station in Fig. 1)														Tidal regime (※)			
	Long-term period		Diurnal				Semi-diurnal				Fourth-diurnal				$F$	$F_{FD}$	$F_{LP}$	$R$
	$MS_f$		$O_1$		$K_1$		$M_2$		$S_2$		$M_4$		$MS_4$					
	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g	a	g				
C1	4.5	218.6	4.2	193.9	6.8	230.0	89.1	69.2	34.1	115.8	5.7	260.9	2.8	298.1	0.09	0.07	0.037	0.06
C4	5.4	217.3	2.5	175.7	5.7	222.0	111.4	86.1	38.9	132.7	8.0	224.9	6.4	254.6	0.05	0.10	0.036	0.07
C5	2.6	243.1	3.4	134.4	4.4	204.9	80.6	84.2	20.0	142.9	15.4	212.6	9.6	266.4	0.08	0.25	0.026	0.19
C6	15.4	27.5	4.9	327.1	4.1	92.5	77.3	350.6	17.9	43.4	43.4	188.5	16.2	233.4	0.09	0.63	0.162	0.56

※  $F$ : tidal form number (Eq. 1),  $F_{FD}$ : fourth-diurnal tidal form number (Eq. 2),  $F_{LP}$ : long-term period tidal form number (Eq. 3), and  $R$ : amplitude ratio ( $H_{M_4}/H_{M_2}$ )

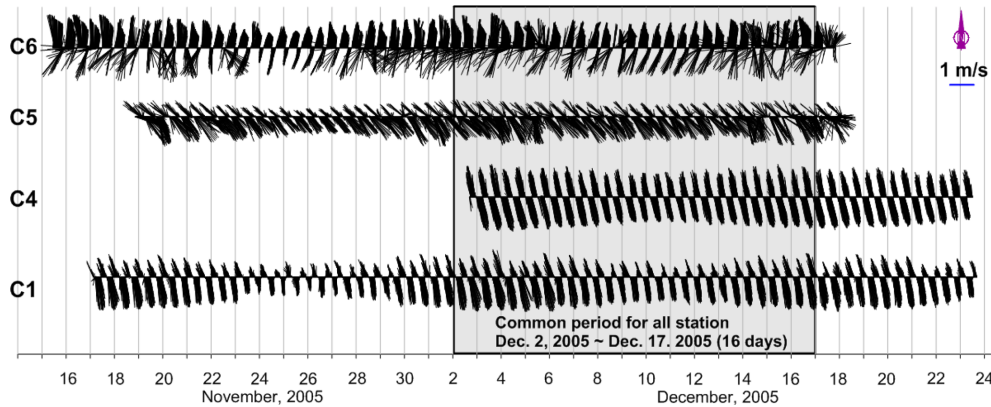


Fig. 2. Stick diagram of tidal current stations (C1, C4, C5, and C6 in Fig. 1). A gray box is for all common periods of Dec. 2~16, 2005. This figure adapted with permission from Song and Woo (2011, Fig. 3).

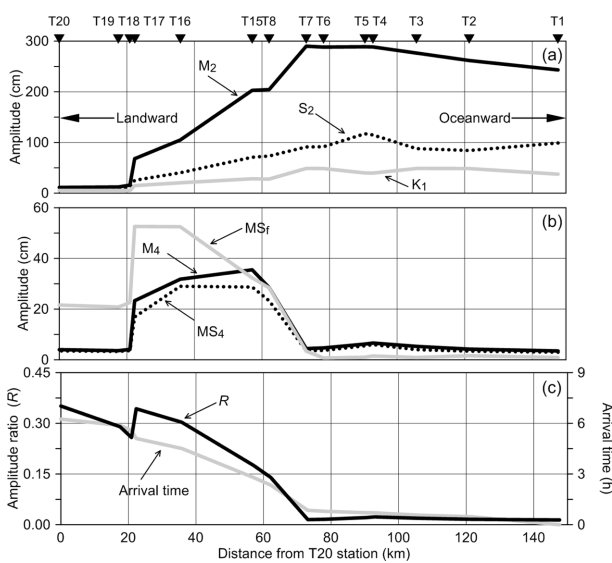


Fig. 3. (a) A change of amplitude of semi-diurnal ( $M_2$ ; black line and  $S_2$ ; black dotted line) and diurnal ( $K_1$ ; gray line) constituents. (b) A change of amplitude of fourth-diurnal ( $M_4$ ; black line and  $MS_4$ ; black dotted line) and long-term period ( $MS_7$ ; gray line) constituents. (c) Amplitude ratio ( $R = H_{M_4}/H_{M_2}$ ; black line) and arrival time (gray line) of tide based on phase of constituent of water level (Warner et al., 2003) along the Yeomha channel (YHC). Tidal constituent stations (reverse triangles) are marked along the distance in the top of figure.

및 변화를 보여준다. 앞서 제시한 바와 같이 전통적인 방법에서  $M_4$  성분만을 이용한 비선형 반응 정도를 제시하는 것은 경향성에 대한 파악은 가능하다. 그러나  $MS_4$  분조가 큰 지역에서는 정량적인 비교에는 어려움이 있을 수 있다.

장주기 (e.g.,  $MS_7$ ) 성분은 외해에서 상류로 진입하면서 1/4일주조와 같은 위치에서 증가하지만 그 크기는 작다 (Fig. 3b와 4b). 같은 천해 분조이지만 1/4일주조와 확연하게 다른 점은 진폭의 최대값이 나타나는 정점이다. 장주기 성분의 최대 진폭은 1/4일주조 성분의 상류로 약 32 km에 위치한 신곡 수중보 하류 정점인 T17 정점에서 나타난다. 또 다른 점은 1/4일주조 성분이 T18 정점 이후에 급격한 진폭 감소를 하지

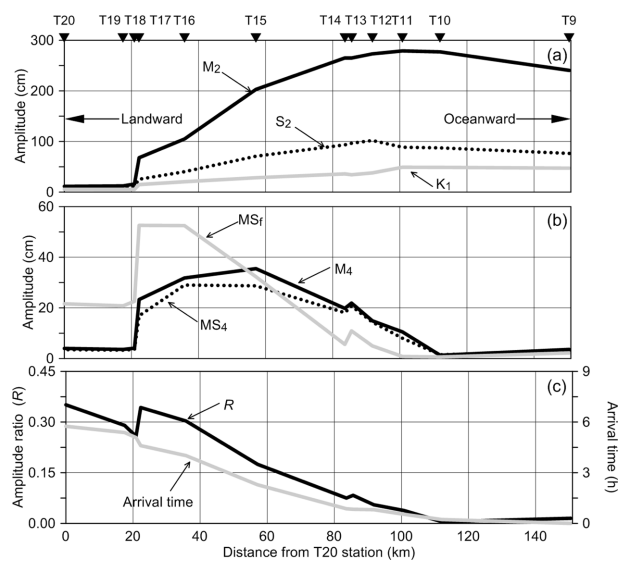


Fig. 4. (a) A change of amplitude of semi-diurnal ( $M_2$ ; black line and  $S_2$ ; black dotted line) and diurnal ( $K_1$ ; gray line) constituents. (b) A change of amplitude of fourth-diurnal ( $M_4$ ; black line and  $MS_4$ ; black dotted line) and long-term period ( $MS_7$ ; gray line) constituents. (c) Amplitude ratio ( $R = H_{M_4}/H_{M_2}$ ; black line) and arrival time (gray line) of tide based on phase of  $M_2$  constituent of water level (Warner et al., 2003) along the Seokmo channel (SMC). Tidal constituent stations (reverse triangles) are marked along the distance in the top of figure.

만, 장주기는 상대적으로 일정한 값 이상을 보여준다. 다른 장주기 분조인  $M_M$  분조도 비슷한 경향을 보이며, 최대 위치도 동일하기 때문에 제시하지 않았다.

모든 분조에서 보이는 또 다른 특징은 T17 정점 이후 급격한 진폭의 감소이다. 앞서 제시한 반일주조와 일주조에서 보이는 급격한 진폭의 감소 (e.g., T7, T14)와 가장 큰 차이는 거리에 따른 감소 비율이다. T7에서 T8 (염하수로)은 86 cm/11 km ( $\approx 7.8$  cm/km)이고, T14에서 T15 (석모수로)는 63 cm/26 km ( $\approx 2.4$  cm/km)이다. 그러나 T17과 T18 정점의 거리 차이는 1.4 km에 불과 하지만, 진폭의 감소 52 cm에 이른다 ( $\approx 37.1$  cm/km). 이는 자연적인 조석 전파 특성에서는

나타나기 힘든 현상으로 T17, T18 정점 사이에 있는 신곡 수증보의 영향 때문이다. 즉, 진폭이 급격하게 감소하는 이유는 인위적인 구조물에 의해서 조석의 차단 또는 소멸하여 발생하는 현상으로 '4.2 신곡 수증보에 의한 영향'에서 자세히 제시하였다.

하구, 연안 지역의 비선형성의 반응 정도를 간단하게 제시하는 데 사용하는  $M_4/M_2$  진폭 비율 ( $R$ )을 염하, 석모수로로 구분하여 Fig. 3c와 Fig. 4c에 각각 제시하였다. 연구지역에서 보이는  $R$  값의 범위는 외해에서는 0.02 정도로 낮은 값을 보여주지만, 하구 상류로 진입하면서 점점 값이 커져 0.34까지 이른다 (Table 2).  $M_2$  분조의 진폭이 급격히 감소와  $M_4$  분조의 급격한 증가로 염하와 석모수로의 T7과 T14 정점부터  $R$  값은 0.1 이상을 보인다. 지속적으로 증가하는  $R$  값은 신곡 수증보가 존재하는 T17 이후에 급격히 감소한 후 상류 지점까지 점진적으로 증가한다.

외해 정점인 T1과 T9에서 상류로 진입하면서 소요되는 조석 전파 시간을 주된 반일주조 성분인  $M_2$ 의 위상과 각속도 (degree/h)을 이용하여 제시하였다 (Fig. 3c와 4c). 염하와 석모수로의 북쪽 입구 (e.g., T8, T14)까지 전파속도는 각각 85.5 km/2.35 h ( $\approx 36.5$  km/h), 66.9 km/0.87 h ( $\approx 76.5$  km/h)로 2배 이상의 차이를 보인다. 염하수로에서 T1에서 T7까지 소요된 시간은 0.85시간이지만, T7에서 T8까지는 1.5시간이 소요되기 때문에 염하수로의 전파속도가 매우 작아진다. 이는 염하수로 특히 T7-T8 사이의 급격한 수심 감소에 의한 바닥 마찰 등의 영향으로 판단된다. Yoon and Woo (2011)에서 제시된 석모수로 보다 상대적으로 염하수로가 바닥 마찰이 강하다는 연구 결과와 부합된다. 염하와 석모수로의 합류점인 T15까지의 전파 속도를 계산하면 염하수로가 90.5 km/2.78 h ( $\approx 32.5$  km/h) 석모가 93.4 km/2.29 h ( $\approx 40.8$  km/h)을 보인다. 석모수로 북쪽 입구 이후 급격한 마찰의 영향을 받는 것으로 보이며, 두 수로의 위상 차이에 의한 전파 속도 차이는 합류점에서 독특한 수위, 염분, 조류의 변화를 보일 가능성이 크다.

### 3.2 천해 조석 형태수

앞서 제시된 비대칭 영향 정도 ( $H_{M_4}/H_{M_2}$ ), 위상을 이용한 조석 전파시간 산정 (e.g.,  $M_2$ ) 등의 결과는 주로 반일주조

성분 중에서 가장 큰  $M_2$  분조와 배조 성분인  $M_4$ 를 이용하였다. Table 2에 제시된 바와 같이  $M_2$  다음으로 큰 조석 성분은  $S_2$  분조이고, 이런 영향으로  $MS_4$  성분의 크기가  $M_4$  성분만큼 큰 것을 보았다. 즉, 두 분조 (e.g.,  $M_2 + S_2$ )의 결합에 의한 복합조 성분의 생성과 특성을 제시할 필요가 있다.

천해 지역에서  $M_2$ 와  $S_2$ 의 비선형 상호작용으로  $MS_4$  및  $MS_f$  등이 생성되는데, 이를 고려하기 위해서 천해의 영향이 대소조기 주기를 통해서 조위의 제곱에 비례한다고 하면 식 (4)와 같이 4가지의 분조가 생성된다 (Pugh, 1987).

$$\begin{aligned} & \{H_{M_2}\cos 2\omega_1 t + H_{S_2}\cos 2\omega_0 t\}^2 \\ &= \left\{ \frac{1}{2}(H_{M_2}^2 + H_{S_2}^2) + \frac{1}{2}(H_{M_2})^2 \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{2}(H_{S_2})^2 \cos 4\omega_0 t \right. \\ & \quad \left. + H_{M_2}H_{S_2}\cos 2(\omega_1 + \omega_0)t + H_{M_2}H_{S_2}\cos 2(\omega_0 - \omega_1)t \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는  $M_2$ 와  $S_2$ 의 진폭이고,  $\omega_0$ 와  $\omega_1$ 는 각각  $M_2$ 와  $S_2$ 의 각속도 (radians)이고  $t$ 는 시간이다. 식(4)의 오른쪽 항의 첫 번째에서 세 번째 항은 하루에 4번의 반복을 보이는  $M_4, S_4$ 와  $MS_4$ 를 의미하며, 각속도는 각각  $4\omega_1, 4\omega_0$ 와  $2(\omega_1 + \omega_0)$ 를 가진다. 두 분조의 각속도의 차이에 의해서 생성되는 속도  $2(\omega_0 - \omega_1)$ 를 보이는 분조는  $MS_f$ 로 정의되고, 주기는 14.78 day이다.  $MS_f$  분조는 정확하게 대소조기 변동성과 같은 주기를 보인다. 또한  $MS_f$ 는  $H_{M_2}^2 + H_{S_2}^2$  항에 의한 평균 해수면의 변화를 생성하기도 한다 (Pugh, 1987).

한강하구에서 주된 반일주조인  $M_2$  분조의 합성으로 생성되는 배조 ( $M_4$ )가 조석 비선형에 큰 영향을 미치지만, 또 다른 반일주조 성분인  $S_2$  분조도 작은 값이 아니므로  $M_2$ 와  $S_2$ 의 합성으로 발생하는 복합조 ( $MS_4, MS_f$ )도 적지 않다 (Table 1과 Table 2). 그러므로 본 연구에서는  $M_4$  진폭만이 아닌  $M_2$ 와  $S_2$ 의 합성으로 생성되는 복합조를 고려할 필요가 있다. 이를 파악하기 위해서 조석 형태수의 형태를 수정한 천해 조석 형태수를 주기에 따라서 1/4일주조 성분 조석 형태수 ( $F_{FD}$ )와 장주기 조석 형태수 ( $F_{LP}$ )를 제시하였다.

조석과 조류 성분에 대한 각 정점에서의  $F_{FD}, F_{LP}$ 을 각각 Table 2와 Table 3에 제시하였다.  $F_{FD}$ 의 경우  $R$  값과 비슷한 경향을 보이지만 절대적인 값은 더 크게 나타나고 있다.

**Table 3.** The regional classification by tidal regime

Region	Station	$F$	$F_{FD}$	$F_{LP}$	$R$	Tidal wave propagation
S1	T1-T6	Semi-diurnal	Weakly	Weakly	0.1<	Mixed
S2	T9-T14	Semi-diurnal	Weakly	Weakly	0.1<	
S3	T7, T8	Semi-diurnal	Strongly	Strongly	0.1~0.2	Almost standing
S4	T15-T16	Semi-diurnal	Very Strongly	Strongly	0.2~0.3	Mixed
S5	T16-T20	Mixed mainly semi-diurnal	Strongly	Very strongly	0.3>	

$S_2$  분조의 진폭이 상대적으로 작지 않은 경기만 한강 하구역의 경우  $R$  값에 의한 비선형 천해분조의 영향을 가늠하는 것과 더불어  $F_{FD}$ 의 값을 이용하여  $MS_4$  분조의 영향을 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다. 조류의 경우도 조석과 비슷한 경향을 보이지만,  $R$ 과  $F_{FD}$ 를 비교하면 상대적으로 더 큰 변화를 보여주는데 (Table 3), 이것은 하구의 비선형 효과에 의한 간섭이 조석보다는 조류에 영향을 더 크게 작용하기 때문이다.

외해에서 T1 (염하수로), T9 (석모수로) 하구 상류로 진입하면서 변하는  $F$ ,  $F_{FD}$ 와  $F_{LP}$ 를 Fig. 5에 제시하였다. 염하와 석모수로의  $F_{LP}$  값은  $F$ ,  $F_{FD}$ 와 비교하면 상대적으로 크기 때문에 그림의 오른쪽 축을 기준으로 도시하였다. 전형적인  $F$ 는 0.2–0.3의 변화를 보이고 반일주조 우세 또는 혼합된 반일주조 우세를 보인다.  $F$ 는 신곡 수중보 (T18, 상류 정점에서 22 km 떨어진 지점)를 지나면서 증가한다. 이러한 이유는 반일주조, 일주조 모두 감소하지만, 상대적으로 일주조의 감소 폭이 작기 때문이다. 장주기 분조의 변화인  $F_{LP}$ 은  $F_{FD}$ 와 같이 T18 지점까지는 지속해서 증가를 하다가 이후에는  $F_{FD}$ 와 다르게 오히려 급격히 증가한다.  $F_{FD}$ 이 이 지점에서 급격히 증가하듯이  $F_{LP}$ 도 증가한다. 이는 상대적으로 단주기 성분인 반일주조와 1/4일주조 성분이 일주조 또는 장주기 성분보다 바닥 마찰의 영향을 적게 받아 적게 영향을 받아 감소 폭이 작기 때문이다.

### 3.3 구역별 조석체계 분류

조석 형태수 ( $F$ ), 단주기 조석 형태수 ( $F_{FD}$ ), 장주기 조석 형태수 ( $F_{LP}$ )  $M_4/M_2$  진폭비 ( $R$ ), 그리고 전파 특성 등을 종합적으로 고려한 조석체계를 이용하여 경기만 해역 및 한강 하구 지역을 분류하였다 (Table 3). 구분된 지역은 Fig. 5의

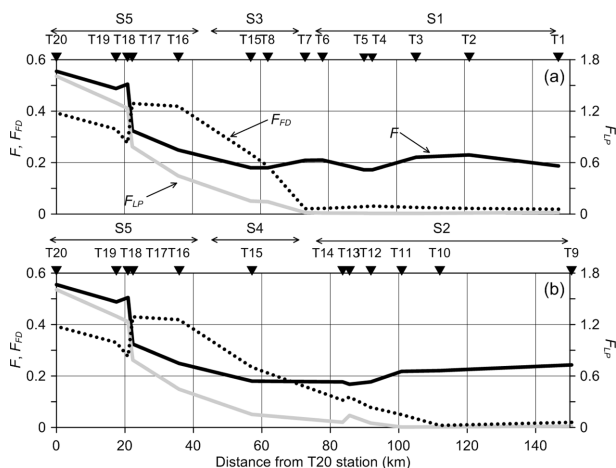


Fig. 5. The variation of tidal form number ( $F$ ; black solid line), fourth-diurnal tidal form number ( $F_{FD}$ ; black dotted line), and long-term period tidal form number ( $F_{LP}$ ; gray solid line) along the (a) Yeomha channel (YHC) and (b) Seokmo channel (SMC). Tidal constituent stations (reverse triangles) and regional classifications of tidal regime (both arrows) are marked along the distance in the top of figures.

염하와 석모수로의 정점 위에 같이 도시하였다. 조석 체계의 특성에 따라 S1–S5지역으로 구분하였고, 크게 3개 구역으로 분류할 수 있다. 각 구역은 외해 구역 (S1과 S2), 1/4일주조 천해 구역 (S3), 그리고 장주기 구역 (S4와 S5)로 지정된다.

먼저, S1과 S2 구역 (염하수로 남쪽 입구 이전과 석모수로 북쪽 입구 이전)은 반일주조가 우세하며  $F_{FD}$  값은 작고  $R$  진폭 비가 0.1 이하로 외해 특성의 조석체계 구역으로 분류할 수 있다. 다음으로 S3 구역 (염하수로)은 인천항 이후의 외해 조석이 하구 비선형의 영향으로  $F_{FD}$  및  $F_{LP}$ 가 강해지고  $R$  진폭 비가 0.1–0.2의 범위를 보여준다. S4 구역은 S3 구역에서 증가한 천해 분조를 비롯하여 장주기 분조가 더욱 강해지며, S2 구역에서 진입하는 조석의 영향과 담수의 직접적인 영향으로 S1, S2 구역의 조석체계와는 다른 모습을 보일 것으로 예상된다. S4 구역은 관측자료가 전혀 없어서 직접적인 분석이 어려운 상황이다. S5 구역은 특히 장주기 조석의 특성이 강하고, 신곡 수중보 같은 인위적인 구조물에 의한 영향이 조석체계에 큰 영향을 미친다. 인위적 구조물에 의한 영향을 명확하게 파악하기 위해서는 수치모델을 이용한 연구가 추적으로 필요하다.

## 4. 논 의

### 4.1 지형학적 특징에 의한 영향

조류 자료는 주성분 분석 (principal component analysis)을 사용하여 구한 주축 방향 성분의 진폭과 위상을 Table 2에 제시하였다. 조석 조화상수와 마찬가지로 반일 주조 성분이 가장 큰 값을 보여주며, 최대 진폭 값은 조석  $M_2$  분조의 최대값이 나타난 염하수로 남쪽 입구 (T7)의 인근 정점인 C4에서 나타났다. C4에서 최대값을 보인 이후에 5개 천문조는 감소한다. C4 정점부터 증가한 배조 및 복합조는 C6 정점에서 최대값을 보인다.

조석 전파 특성과 더불어 조류 전파 특성을 확인하기 위해서 조류 자료의 상관도 분석을 수행하였다 (Fig. 6). 조류에 대한 자세한 분석과 결과는 Yoon and Woo (2012a)에 제시

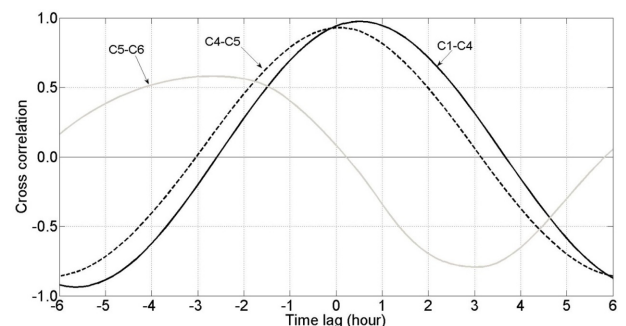


Fig. 6. Cross correlation of the along-channel component between C1–C4 (black line), C4–C5 (dotted line), and C5–C6 (gray line). X-axis indicated lag of time with respect to maximum flood current between each tidal current station.



되어 있다. C1-C4과 C4-C5의 상관도는 0.9 이상의 높은 상관관계를 보인다. 그러나 C5-C6 상관도는 0.6 이하의 상대적으로 낮은 상관관계가 나타났다. 이러한 상관관계를 볼 때, 적어도 인천항(C1) 이후 염하수로(C4, C5)를 따라 조류 변형 특성은 일정한 변화 특성을 보이지만, 이후 강화 북수로에서 진입하는 조석의 영향 또는 한강과 임진강의 담수 유입 등의 영향으로 상관도가 낮게 나타날 가능성이 존재한다.

조류 조화상수와 인근의 조석 조화상수의 진폭과 위상값을 재구성하여 정상파와 진행파의 형태를 가늠할 수 있는 hysteresis diagram (Dyer, 1997)을 Fig. 7에 도시하였다. Dyer (1997)의 제시에 의하면 인천항 (C1-T6) 지역에서는 정상파 (standing wave)와 진행파 (progressive wave)가 혼합된 형태를 보여준다. 염하수를 따라 조석파가 진행하면서 정상파의 형태가 강해지다가, 수로 끝 부분 (C5-T8)에서는 조석과 조류의 위상 차이가 80°로 거의 정상파에 가까운

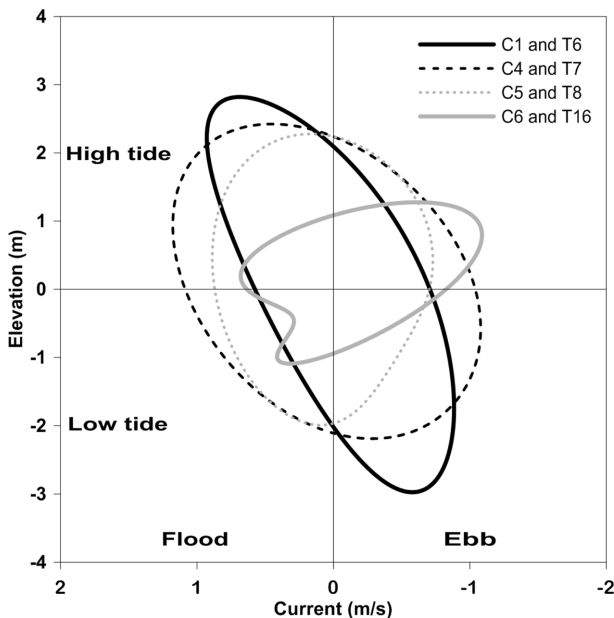


Fig. 7. Hysteresis diagram of (C1-T6, thick black line), (C4-T7, dotted black line), (C5-T8, dotted gray line), and (C6-T16, thick gray line) for  $M_2 + M_4$  components. The positive elevation (current) means high tide (flood current). This figure adapted with permission from Yoon and Woo (2012, Fig. 10).

형태가 나타난다. 강화도 북쪽 수로로부터 진입한 조석의 영향으로 전류리(C6) 지역의 경우 다시 진행파의 모습이 나타나는데, 상관도 분석에서 보았듯이 (C6-T16)와 염하수로의 정점(C4, C5) 사이의 낮은 상관도와 일치하는 결과이다.

염하수로에서 보이는 변하는 수심의 감소와 수로 폭이 작아지는 지형적 특성에 의한 변화라고 판단되며, 조석뿐 아니라 조류의 상관도 및 조석과 조류의 hysteresis diagram에서도 확인할 수 있다. 다만, 석모수로의 조류 관측 정점이 추가된다면 석모, 염하수로의 각각의 상관도 및 두 수로가 합류된 이후의 상관도 비교가 가능할 것으로 보인다.

#### 4.2 신곡 수중보에 의한 영향

한강의 하류부에 있는 신곡 수중보는 유람선 등의 운항 수심을 위한 수위유지, 농업용수 공급 등의 이수목적 및 염수 침입 방지를 위해 1987년에 설치되었다 (Baek and Yim, 2011). 신곡 수중보의 높이는 2.7 m (보 마루 표고 E.L. 2.4 m + 월류고 0.3 m)이기 때문에 외해에서 전파된 조석의 조위가 2.7 m 이상일 때만 조석이 신곡 수중보를 월류하여 상류로 전파된다. 수중보의 높이 때문에 신곡 수중보 상류의 조석 현상은 대조기 또는 중조기일 때 발생한다 (Chang and Oh, 1991). 즉, 조차가 작다면 대부분 신곡 수중보에서 차단되지만, 조차가 큰 기간이라면 신곡 수중보 상류로 조석의 영향이 미치게 된다. 이렇게 전파된 조석도 대부분은 잠실 수중보 (E.L. 6.2 m)에서 차단된다 (Yoon and Woo, 2012b).

신곡 수중보 건설 이전 (1985년)과 이후 (2008년)의 신곡 수중보 인근의 행주대교에서 관측된 수위를 보면 확인한 조석의 차이를 확인할 수 있다 (Fig. 8). 평수기, 조석 주기가 비슷한 두 시기의 수위를 보면 1985년은 대소조기의 뚜렷한 변화 및 일조부등을 확인할 수 있다. 반면에 2008년 자료는 소조기에는 조석 (e.g., 6월 13일) 변화가 뚜렷하지 않고, 대조기 (e.g., 6월 5일)에 작은 조석의 증감을 확인할 수 있다. 또한, 수중보 건설로 일정 수위 (2.0 m)를 유지하고 있는 것도 볼 수 있다. 즉, 현재는 대조기 또는 중조기 이상의 조석이 진입하였을 때만 상류로 조석이 전파되기 때문에 상대적으로 신곡 수중보 상류에는 장주기 (e.g.,  $MS_f$ )가 강한 것으로 판단된다.

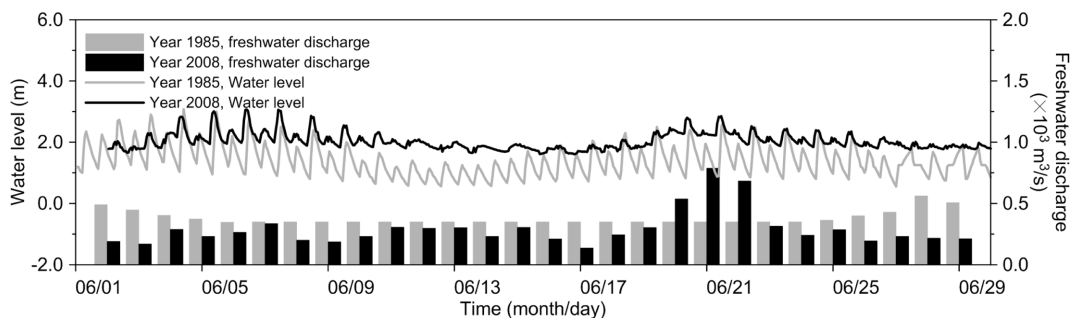


Fig. 8. Water levels at the Haengju Bridge near the Singok underwater dam (SUD) during June, 1985 (gray line) and June, 2008 (black line) under normal freshwater discharge condition. Gray (year 1985) and black (year 2008) bar chart indicate freshwater discharge rate refer to Paldang dam (60 km upstream from SUD).



신곡 수중보에 의한 조석의 변형 또는 차단은 자연적인 현상보다 매우 큰 조석 전파 특성의 변화를 일으킨다. 신곡 수중보 설치 본래의 목적에 반하여 현재는 자연적인 하구 환경 복원, 수질개선 등의 목소리가 높아지고 있다. 수중보 관련된 여러 연구가 수행되었고 이전 또는 철거와 관련된 장점과 문제점 등이 보고되었다. 철거를 가정한다면 명확한 사실은 조석의 상류로 전파가 길어지고, 염분의 침입이 증가한다는 것이다. 다만, 조석의 크기 및 한계, 염수의 침입 거리 등은 계속된 논의가 필요하다.

## 5. 결 론

경기만 한강하구에서 조석과 조류의 조화상수를 이용하여 제시된 주요 수로의 조석 전파 특성은 천문조, 1/4일주조 및 장주기 성분에 따라 특징적으로 나타났다. 천문조는 *hyper-synchronous* 형태를 보이며, 바다마찰의 차이로 주요 수로에서 보이는 최대값의 위치가 다르게 나타났다. 1/4일주조는 천문조가 급격히 감속하는 위치에서 급격한 증가를 하며, 지속해서 증가를 하다가 인위적 구조물에 의해서 급격한 감소를 한다. 장주기 분조는 1/4일주조와 비슷한 경향을 보이지만, 인위적 구조물의 영향은 상대적으로 적은 것으로 조사되었다.

천문조, 배조 및 복합조를 이용한 조석 형태수 및 진폭 비율의 조석체계의 특성에 따라서 경기만을 크게 3구역으로 분류하였다. 먼저, 외해 조석(천문조)이 우세한 지역은 외해에서 인천항 전면까지, 외해에서 석모수로의 북쪽 입구로 나타났다. 염하수로 남쪽 입구에서 북쪽 입구까지와 강화 북수로는 1/4일주조의 천해 분조가 강하게 나타나는 지역으로 분류할 수 있다. 신곡 수중보 이후부터 상류까지는 장주기 복합조( $MS_f$ )가 천문조 크기 이상으로 나타나는 지역이다. 하구의 조석 비선형성은 천해 분조의 생성에서 비롯되며, 수중보와 같은 인위적인 구조물의 영향이 크게 작용한다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(하구역 종합관리시스템 개발 연구). 이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(경기씨그랜트사업)

## References

- Back, K. O. and Yim, D. H. (2011). Flow Characteristics Induced by Shift and Modification of Submerged Weir at Han River Estuary. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(2B), 109-119 (in Korean).
- Byun, D. S. and Cho, Y. K. (2006). Double peak-flood current asymmetry in a shallow-water-constituent dominated embayment with a macro-tidal flat, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16613, doi:10.1029/2006GL026967.
- Chang, H. D. and Oh, J. K. (1991). Depositional sedimentary environments in the Han River estuary and around the Kyunggi Bay posterior to the Han River's development. *Journal of the Korean Society of Oceanography* 26, 13-23 (in Korean).
- Defant, A. (1961). *Physical oceanography*, vol II. Pergamon, New York.
- Dronkers, J. J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Journal of sea research*, 20, 117-131.
- Dyer, K. R. (1997). Chapter 3 Tides in Estuaries *Estuaries: A Physical Introduction 2nd Edition* (Ed: Dyer, K.R.) John Wiley & Sons Ltd, 195.
- Friedrichs, C. T. and Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: A synthesis, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27, 521-545.
- Gallo, M. N. and Vinzon, S. B. (2005). Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary, *Ocean Dynam.*, 55, 441-448.
- Kang, J. W. and Jun, K. S. (2003). Flood and ebb dominance in estuaries in Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56, 187-196.
- Kim, H. S. (1997). Numerical modeling of tidal dynamics and salinity distributions in Gyeonggi Bay. MS Thesis, Inha University, Incheon, Korea (in Korean).
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 86, 4243-4247.
- Koh, C.-H. and Khim, J. S. (2014). The Korean tidal flat of the Yellow Sea: Physical setting, ecosystem and management. *Ocean Coastal Manage.*, 102(Part B), 398-414: doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.07.008
- Le Provost, C. (1991). Generation of overtides and compound tides (review). In: *Tidal hydrodynamics*, (Ed: Parker, B.B.) John Wiley & Sons, Inc., 269-295.
- LeBlond, P. H. (1966). On tidal propagation in shallow rivers. *J. Geophys. Res.*, 83, 4717-4721.
- Lee, K. H., Rho, B. H., Jho, H. J. and Lee, C.-H. (2011). Estuary classification Based on the Characteristics of Geomorphological Features, Natural Habitat Distribution and Land Uses. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography*. 16(2), 5369.
- McLusky, D. S. and Elliott, M. (2004). *The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management*, third ed. Oxford University Press, Oxford, 216
- Ministry of oceans and fisheries (2001). Study of the tide influence on the Han and Imjin River estuary. BSPM 00080-00-1345-2, 542.
- Ministry of oceans and fisheries (2002). Study of the tide influence on the Han and Imjin River estuary (II). BSPM 12800-1463-2, 452.
- Parker, B. B. (1991). The relative importance of the various non-linear mechanism in a wide range of tidal interactions (review). In: *Tidal hydrodynamics*, (Ed: Parker, B.B.) John Wiley & Sons, Inc., 237-268.

- Pugh, D. T. (1987). Tides, surges and mean sea level: a handbook for engineers and scientists, New York: John Wiley. 472.
- Song, D., Wang, X. H., Kiss, A. E. and Bao, X. (2011). The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents. *J. Geophys. Res.*, 116, C12007, doi:10.1029/2011JC007270.
- Song, Y. S. and Woo, S. B. (2011). Periodic characteristics of long period tidal current by variation of the tide deformation around the Yeomha Waterway. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(5), 393-400 (in Korean).
- Warner, J. C., Schoellhamer, D. and Schladow, G. (2003). Tidal truncation and barotropic convergence in a channel network tidally driven from opposing entrances. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56, 629-639.
- Yoon, B. I. and Woo, S. B. (2011). Study on relationship between geographical convergence and bottom friction at the major waterways in Han River Estuary using the tidal wave propagation characteristics. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(5), 383-392 (in Korean).
- Yoon, B. I. and Woo, S. B. (2012a). Analysis of tidal asymmetry and flood/ebb dominance around Yeomha Channel in the Han River Estuary. *J. Korea Water Researches Assoc.*, 45, 915-928 (in Korean).
- Yoon, B. I. and Woo, S. B. (2012b). Relation of freshwater discharge and salinity distribution on tidal variation around the Yeomha channel, Han River Estuary. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(4), 269-276 (in Korean).

---

Received 4 May, 2015

Accepted 22 May, 2015