한국해안 · 해양공학회논문집
제 23 권 제 5 호, pp. 383~392, 2011년 10월

조석 전파 특성을 활용한 한강하구 주요 수로의 지형학적 수렴과 바닥 마찰 간의 관계에 대한 연구

Study on Relationship Between Geographical Convergence and Bottom Friction at the Major Waterways in Han River Estuary using the Tidal Wave Propagation Characteristics

윤병일* · 우승범*
Byung Il Yoon* and Seung-Buhm Woo*

요 지 : 경기만 해역에 위치한 한강하구역은 연안개발 압력이 지속적으로 대두되는 상황임에도 불구하고 하구 순환 흐름에 대한 기본적인 연구가 충분히 수행되지 못하였다. 한강하구의 해양학적 현상에 대한 이해를 위해서는 이 지역의 가장 큰 외력 조건인 조석의 전파 특성을 이해하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 조석 관측 자료와 수치모델 결과를 이용하여 한강하구의 주요 수로별 조석 전파 특성을 분석하였다. 각 수로의 조석 전파 특성은 hyper-synchronous 형태를 보여주었으며, 각 수로에서의 조석 전파 특성은 수로 형태의 지형학적 수렴정도와 마찰에 의해서 가장 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 이상적인 수로에서 수렴 항과 마찰 항의 균형 정도를 비교하는 해석해를 분석한 결과는 각 물리적 인자의 영향 정도가 주요 수로 별로 차이가 나타남을 보여주었으며, 염하수로에서 수렴 항 대비 마찰 항의 비율이 석모수로 보다 약 4배 정도 크게 나타났다. 이러한 영향으로 염하수로에서 최대 진폭이 나타나는 위치는 석모수로에 비하여 하류에서 나타났으며, 정점 간의 단위 거리당 진폭 감소 비율과 위상의 증가율이 석모수로에 비하여 염하수로에서 크게 나타났다. 조석 전파 특성을 활용하여 한강하구 주요 수로를 분류하면 모든 수로에서 hyper-synchronous 형태를 보여주지만, 상대적으로 염하수로는 마찰의 영향이 석모수로에 비하여 크게 나타난다.

핵심용어 : 조석 전파, 한강하구, 수로, 하구분류, hyper-synchronous pattern

Abstract : The basic research of the estuarine circulation at Gyeong-Gi bay has not been well studied up to now, although coastal development pressures have been continuously increased. To understand the oceanographic phenomena at the Han River estuary, it's essential to understand the propagation characteristic of tidal wave which is the strongest external forcing in this region. In this study, we investigate the tidal wave propagation characteristics along the 3 major channels using observation data and numerical model. It is found that 3 channels are all hyper-synchronous and the most important physical factor controlling the tidal wave propagation is topographical convergence of estuary shape and friction. The result of analytic solution at ideal channel considering the topographical convergence and friction show that the contribution of physical role of convergence and friction varies at 3 different channel. And the ratio of convergence and friction at Yeomha channel is four times larger than Seokmo channel. Because of this effect, the location of maximum amplitude at Yeomha channel is showed up downward than Seokmo channel. The ratio of decreasing amplitude and increasing phase per unit distance between stations is bigger than Seokmo channel. Although 3 major channel show a hyper-synchronous pattern, Yeomha shows more frictionally dominant channel and Seokmo channel is more dominantly affected by convergence effect.

Keywords : tidal wave propagation, Han river estuary, channel, estuary classification, hyper-synchronous pattern

1. 서 론

한강하구가 위치하는 경기만(Fig. 1)은 반 폐쇄성 연안 하구역으로서 7.9 m 평균대조차와 3.5 m의 평균소조차의 대조차 특성이 나타난다. 큰 조차로 인하여 넓은 조간대가 발달해 있으며, 복잡한 해수순환 특성을 보인다(김, 1990; 김, 1997; Park et al., 2002; 윤, 2006; 정, 2007). 대부분의 담수는 한강으로부터 유입되며 연중 70% 이상이 6월부터 9월까지의 장마기간에 집중된다. 한강의 담수 유입 정도는 연평균 약 408 m^3/s 정도이며, 유역 면적 비에 의해 계산된 예성강, 임

*인하대학교 해양과학과 (Corresponding author : Seung-Buhm Woo, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon, 402-751, sbwoo@inha.ac.kr)

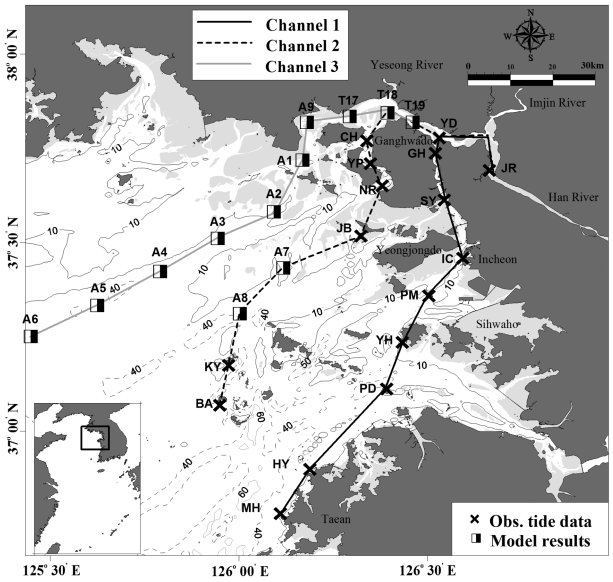


Fig. 1. Topographic map of Gyeong-Gi Bay and Han River Estuary in the South Korea with the 10 (thin solid line), 40 (dotted line) and 60 (gray solid line) isobaths shown. Tide data stations of KHOA(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration × mark) and numerical results (■mark) were indicated. The thick solid, thick dotted and thick gray line indicated channel 1, 2 and 3, respectively.

진강 그리고 한강의 평균 유량 비율은 1 : 2 : 6 정도이다(임, 1999).

외해 조석파는 인천항을 지나 강화도 동쪽의 염하수로와 서쪽의 석모, 교동수로를 통하여 전파된다. 강화도 서쪽의 석모, 교동수로는 예성강과 만난 후에 강화도 북쪽 수로를 지나 염하수로와 다시 연결된다. 하나로 연결된 수로를 따라서 상류로 전파되는 조석파는 북쪽의 임진강과 남쪽의 한강으로 나뉘어 두 방향으로 전파되는 복잡한 흐름을 보여준다.

외해에서 전파되는 조석파는 하구와 연안역으로 진입하면서 바닥마찰, 담수유입, 수로의 수심 변화와 지형적 원인에 의한 비선형효과에 의해서 변형된다(Ippen and Harleman, 1966; Dronker, 1986; Dyer 1997). 이런 비선형 효과는 배조와 복합조 등을 생성하여 조석파의 변형과 왜곡의 원인이 된다(Parker, 1991; Pugh, 1987). 많은 연구자들이 지형적 원인과 마찰의 다양한 조건에서 조석전파 특성을 연구하였다(Hunt, 1964; Ippen and Harleman, 1966; Jay, 1991; Speer and Aubrey, 1985; Lanzoni and Seminara, 1998; Savenije, 2005a). Hunt(1964)는 처음으로 수렴 정도가 강한 수로에서 마찰의 영향에 의한 조석전파 변화를 제시하였다. 하구에서 조석전파는 마찰 조건하에서 입사파와 반사파의 중첩효과로 나타나며, 정상파와 진행파의 형태로 설명할 수 있다(Ippen and Harleman, 1966). Jay(1991)은 변형된 Green'law 해석해를 이용하여 지수적으로 변하는 수심과 폭의 수로에서 반사파가 없는 단일 입사파 조건에서도 정상파 형태의 조석 전파 특성을 보여주었다. Friedrichs and Aubrey(1994)도 단방향 진행파의 진폭이 수렴하는 수로에서 지형학 영향에 인해서 증가되고, 마찰 때문에 감소되는 것을 제시하였다. 많은 연구자들이 다양한 하구 조건에서, 여러 방법으로, 수로의 지형학적 형태를 고려한 영향과 바닥마찰의 상호 작용에 의한 균형 정도를 통해서 하구를 분류하였다.

대규모 연안 개발과 인구밀집 지역임에도 불구하고 강화도 인근 지역은 군사적인 이유로 접근이 불가능하여, 하구 해수순환에 대한 기본적인 연구가 충분하게 진행되지 못하였다. 그러므로 경기만 한강하구역의 다양한 해양학적 범위의 물리적, 화학적, 생물학적 그리고 퇴적학적 문제의 해결을 위해서는 이 지역의 가장 큰 외력 조건인 조석 전파 특성을 이해하는 것이 필수적이다.

경기만 한강하구 지역은 주요 수로가 서로 연결된 형태로 볼 수 있으므로 조석 전파 특성을 하구 전체에 일률적으로 적용되는 특성으로 판단하기 보다는 각 주요 수로의 전파 특성을 이해하는 것이 앞서 제시한 다양한 문제의 해결에 보다 효과적이다. 본 연구에서는 각 수로별 전파 특성을 조석 관측자료, 수치모델 결과 그리고 지형적 영향과 바닥마찰의 정도를 고려한 해석해 방법을 통해서 정량적으로 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 조석 자료

Fig. 1에 국립해양조사원에서 제공하는 1시간 단위의 검조소 관측 자료와 기존 연구보고서(국립해양조사원, 2002; 인하대학교 해양과학기술연구소, 2003)의 주요 4분조의 조화상수 자료를 수집하였다. 수집된 자료에 대해서는 관측 기간, 관측 시기 등을 고려한 오류 검증 과정을 통해 1차적으로 자료를 정리하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 각 주요수로의 경로와 조석전파 특성을 파악하기 위한 관측 또는 수치모델 정점은 다음과 같다. 태안에서 인천을 지나 강화도 동쪽을 지나는 수로 1은 염하수로를 포함하며 모든 정점이 조석 관측 자료를 기반으로 구성되어 있다. Fig. 1에서 BA 정점에서 시작하여 영종도와 강화도 서쪽을 지나는 수로 2는 석모수로를 포함하며 일부 정점의 경우 수치모델 결과(윤, 2006)가 포함된다. A6 정점에서 시작하여 교동도의 서쪽을 지나는 수로 3은 교동수로를 포함하며 대부분 정점이 수치모델의 결과를 바탕으로 구성되었다. 본 연구에서 사용된 수치모델 및 수치모델 결과는 다음 단락에 자세하게 제시하였다.

2.2 수치 모델

본 연구에 사용된 EFDC(environmental fluid dynamics computer code) 모델은 연안, 하구 시스템에서 광범위하게 적용되는 수치모델이다. 기본적인 물리 구조는 POM (Princeton Ocean Model; Blumberg and Mellor, 1987)과 유사하며, 본 연구에서는 수심 적분된 2차원 정수압 모델을 사용하였다. EFDC 모델의 이론적 배경, 기본 방정식, 수치 해석 방법에 대한 자세한 설명은 Hamrick(1992)에 기술되어 있다.

수치 모델의 개방경계 입력조건은 M_2, S_2, K_1, O_1의 4대 분조의 조화상수 값을 외력조건으로 하였으며, 담수 유입조건은 앞서 임(1999)과 Park et al.(2002)이 제시한 평수기 유량을 사용하였다. 모델에서 바람 응력의 효과는 고려하지 않았고, 해수유동장에 대한 초기조건은 cold start를 사용하였다. 모델 격자 구성 시 하구 상류로 진입할수록 격자 크기가 작아지는 가변격자를 사용하여 하구지역 모델 결과의 정확도를 향상시켰다(Fig. 2). 기존 경기만 모델의 격자망은 한강의 신곡수중보를 경계로 하여 육지 경계면을 처리하였으나, 본 연구에서는 조석파가 거의 소멸된다고 판단되는 한강대교 지역까지 모델 영역을 확장하여 조석 반사파에 의한 왜곡현상을 최소화하였다. 하구 지역의 수치모델의 중요한 요소 중에 하나인 조간대 처리 문제와 수치모델의 보정과 검증에 관한 자세한 내용은 윤(2006)과 윤·우 (2011)에 자세하게 기술되어 있고, Fig. 1에 제시된 관측 정점의 4대 분조의 조화상수 값과 수치 모델 결과의 진폭과 위상의 절대 상대 오차(ARE, Absolute Relative Error)와 RMS(Root mean square)를 Table 1에 제시하였다.

3. 결 과

3.1 조석 전파 특성

본 연구에서는 진폭의 60% 이상을 차지하는 M_2 분조의 진폭과 위상 값을 이용하여 조석 전파 특성을 연구하였다. 각 수로를 따라서 M_2 분조의 진폭은 하구로 진입하면서 점진적으로 증가하다가 특정 지점에서 최대 진폭 값을 보인 이후에 급격히 감소하는 경향을 보인다(Fig. 3). 위상의 경우는 점진적으로 증가를 하다가 진폭이 급격히 감소하는 위치 이후에 위상의 증가 폭이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

Dyer(1997)는 수렴과 마찰항의 균형 정도에 따라서 하구 형태를 Fig. 4와 같이 3가지 형태로 분류하였다. 각각의 하구 형태의 조석 또는 유속의 진폭 변화는 하구 입구에서 상류로 진입하면서 1) 점진적으로 증가를 하다가 특정 위치 이후에 급격히 감소를 하는 hyper-synchronous 형태, 2) 일정한 진폭의 크기를 유지하다가 특정 위치 이후에 급격히 감소를 하는 synchronous 형태, 3) 하구 입구에서부터 지속적으로 감소를 보이는 hypo-synchronous 형태의 특징을 보인다. 본 연구에서 제시하는 주요 3개의 수로는 Dyer(1997)의 분류 기준으로 봤을 때는 모두 hyper-synchronous 형태를 보여준다.

그러나 각각의 수로에서 최대 진폭이 나타나는 위치가 다른 것을 알 수 있다. 수로 1에서 최대 진폭이 나타나는 지점은 인천항 이후에 영종대교와 염하수로 남쪽입구 사이(Fig. 3A, IC~SY)에서 발생을 하지만, 수로 2의 경우 석모수로의 북쪽 입구(Fig. 3B, YP~CH) 인근에서 최대 진폭이 나타난다. 수로

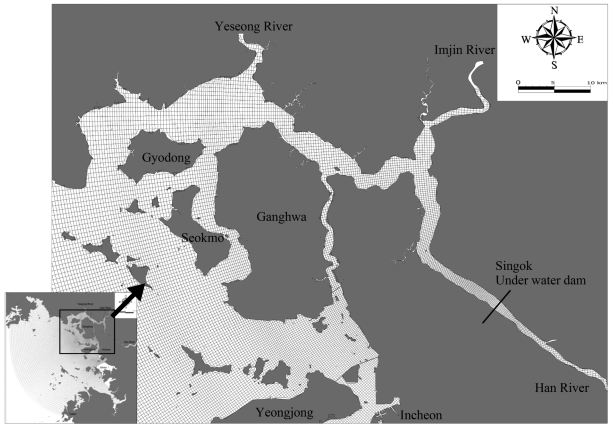


Fig. 2. Grid for numerical model simulations in Gyeong-Gi bay and Han River estuary.

Table 1. Absolute Relative Error (ARE) and Root Mean Square (RMS). Averaged over 16 observed tidal stations refer to Fig. 1.

Tidal constituent	Amplitude		Phase	
	ARE (%)	RMS (cm)	ARE (%)	RMS (cm)
M_2	1.8	4.2	2.9	4.8
S_2	3.8	3.1	3.0	5.0
K_1	3.7	1.3	1.5	4.5
O_1	4.7	1.1	2.5	5.1

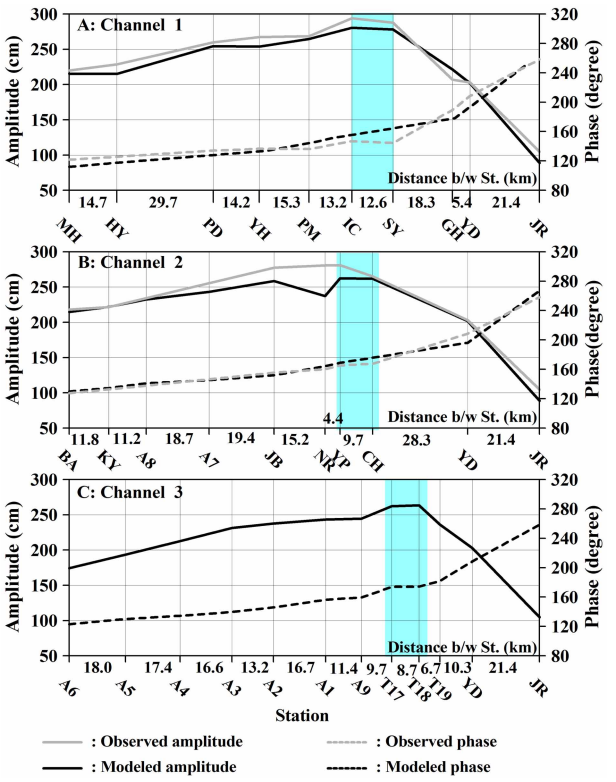


Fig. 3. Change in tide amplitude and phase along the channel 1(A), 2(B), and 3(C). X-axis indicates distance between station (refer to Fig. 1) of observation or model at each channel. A black line is modeled results and a thick gray line is observed data. A box in the figure means location of maximum amplitude at each channel.

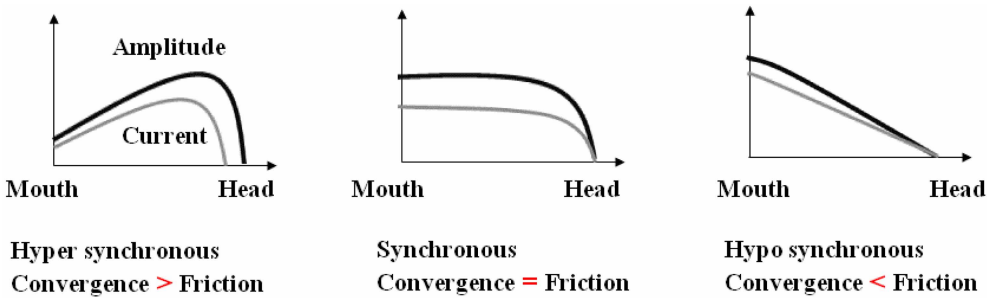


Fig. 4. Diagrammatic presentation of the modification of tidal range and current velocity amplitude in estuaries with varying geometries.

3은 최대 진폭 위치는 강화도 북쪽수로(Fig. 3C, T18~T19)에서 발생을 한다.

Fig. 3을 보면 수로 1과 수로 2에서 조석 관측자료를 조화분해하여 얻은 M_2 분조의 진폭, 위상과 수치 모델 결과를 비교하면 평균 5% 오차 범위에서 정확하게 재현하고 있는 것을 볼 수 있다. 수로 2(Fig. 3B)의 정점 NR, YP 정점의 수치모델 결과가 차이가 크게 나타나는 이유는 이 지역에 발달된 사주 등의 영향으로 판단된다. 그러나 최대 진폭이 나타나는 위치가 수로 1의 경우 염하수로의 남쪽 입구 부근이고, 수로 2의 경우 석모수로의 북쪽 입구로 나타나는 현상을 수치 모델 결과에서 잘 재현되고 있다. 수로 3의 경우 관측 자료가 존재하지 않아 수치모델과 관측 자료를 비교하지 못하였다.

Fig. 5에 각 수로별 진폭과 위상의 값을 관측 또는 수치모델 정점 사이의 거리로 나눈 정점 간의 단위 거리당 진폭 또는 위상 비율의 변화율을 제시하였다. 본 연구에서 제시하는 정점 간의 단위 거리당 진폭(위상) 비율은 조석 입사파가 파고/파장의 일정한 기울기를 가지고 진행되는 조석 파형경사(서·박, 1996)와 의미는 동일하다. 그러나 외해에서 조석파가 하구로 진입하면서 진폭과 위상의 증가 또는 감소 변화가 각 수로의 구간별로 일정하게 변하지 않는 것을 보이기 위해 각 정점 간의 거리에 따른 비율을 제시하였다. 즉, 진폭 증가율은 진폭 변화를 나누어 주는 값이 파장에 비하여 작은 값을 갖는 정점 간의 거리이기 때문에 조석 파형경사와 비하여 큰 값을 갖는다. 각 수로를 따라서 제시되는 변화율의 비율이 양의 값이면 진폭 또는 위상이 증가하는 것을 의미하고, 음의 값이면 반대의 경우이다. 수로 1은 SY 정점 이후, 수로 2는 YP 정점 이후 그리고 수로 3은 A9 정점 이후에 진폭 및 위상의 뚜렷한 변화가 나타났고 이러한 비율 변화는 최대 진폭이 발생하는 위치와 비슷하다.

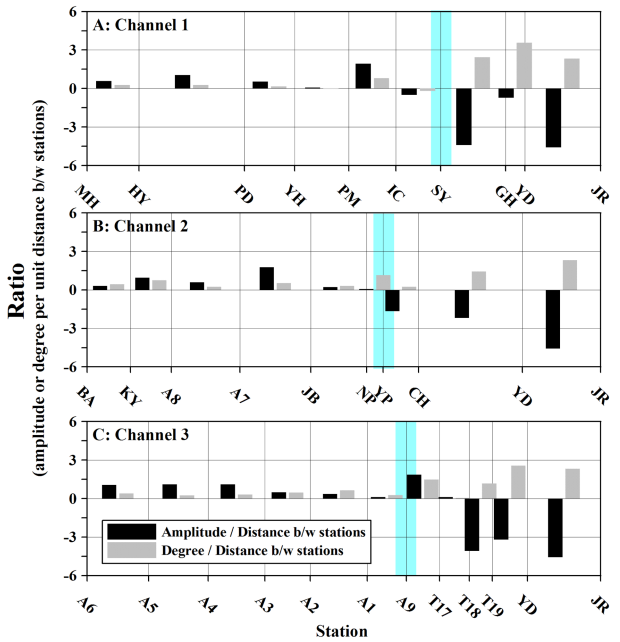


Fig. 5. The decreasing and increasing ratio of amplitude and phase per unit distance between stations along the channel 1(A), channel 2(B) and channel (C). Y-axis is ratio of amplitude/distance and degree/distance. Positive and negative ratio indicate increasing and decreasing of amplitude or phase, respectively.

Table 2에 최대 진폭이 발생하는 정점 전과 후의 단위 거리당 진폭과 위상의 평균 변화율을 제시하였다. 각 수로의 외해 정점에서 최대 진폭이 나타나는 위치까지의 정점 간 단위 거리에 따른 진폭 증가율은 0.78~0.85 cm 사이의 값으로 비슷한 증가율을 보여준다. 그러나 최대 진폭 정점 이후에 상류 지역(JR 정점)까지의 진폭 감소율은 수로 3이 가장 크게 나타났고

Table 2. The averaged decreasing and increasing ratio of amplitude and phase between offshore to maximum point, maximum point to up-estuary, and offshore to up-estuary.

Channel	Offshore to maximum point		Maximum point to up-estuary		Offshore to up-estuary	
	Amplitude/distance	Degree/distance	Amplitude/distance	Degree/distance	Amplitude/distance	Degree/distance
1	0.85	0.29	–3.27	1.92	–0.79	0.94
2	0.78	0.47	–2.96	1.56	–0.80	0.93
3	0.80	0.46	–4.12	2.19	–0.46	0.90

수로 2에서 가장 작게 나타났다. 수치 모델 결과를 제외하고 관측 자료를 바탕으로 수로 1과 수로 2를 비교하면, 수로 1의 진폭 감소율이 약 0.3 cm/km 크게 나타났다. 같은 정점의 위상 변화율은 수로 1은 약 1.92 deg/km, 수로 2는 1.56 deg/km로 상대적으로 수심이 깊은 수로 2가 수로 1에 비하여 감소폭이 적게 발생을 하고 위상 속도로 빠른 것으로 나타났다. 위상의 경우 상대적으로 수심이 깊은 외해에 비하여 하구 상류 지역은 약 3배 정도의 위상이 늦어진다.

주요 3개의 수로는 조석 전파 특성이 hyper-synchronous 형태를 보이는 특징이 나타난다. 그러나 최대 진폭이 나타나는 위치가 각 수로별로 다르게 나타나고 있다. 또한 최대 진폭이 발생하는 위치 이후에 급격하게 진폭과 위상의 변화가 나타나고 있음을 확인 할 수 있었다. 각 수로에서 hyper-synchronous 형태가 나타나는 이유를 수치모델 결과를 이용하여 제시하고자 한다.

3.2 수치모델 결과를 이용한 민감도 분석

초기 모델 결과의 입력조건은 외해 측 개방 경계에서 조석의 주요 4분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 진폭과 위상을 주었다. 수심 자료는 최근 발행된 수치해도를 이용하여 선형 내삽하여 입력하였다. EFDC 모델에서 바닥마찰 계수는 drag coefficient를 사용하여 표현하는데, 초기 수치 모델의 바닥 마찰 계수는 0.003을 사용하였다. 육지 경계면을 가로지르는 유량은 없다고 하였고, 담수 유입량은 임(1999)과 Park et al.(2002)이 제시한 한강의 평수기 유량 408 m^3/s을 입력하였고, 임진강과 예성강은 한강 대비 유역면적비에 따라서 한강의 32%, 16%를 각각 입력하였다.

조석 전파 특성에 영향을 미치는 다양한 물리적 인자들의 상대적 중요성을 고려하고자 수치 모델의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 수치모델 상에서 조절할 수 있는 물리적 변수 값 및 입력 자료를 변경한 결과를 분석하였다. 사용된 물리적 인자는 최적화된 수치 모델 결과를 얻기 위하여 Lane(2004)이 수행한 수심 변화와 담수 영향에 의한 조석 감소 현상을 연구한 Horrevoets et al.(2004)을 바탕으로 선정하였다. 수치 모델 모의 시 조간대 지역의 비현실적 에너지 소실을 배제하기 위해 공간적으로 다른 마찰계수의 적용의 중요성을 강조한 서(2011)의 연구를 바탕으로 마찰계수의 증감을 고려하였지만 공간적으로 동일한 마찰계수를 적용한 한계점을 극복하지는 못했다. 선정된 물리적 인자는 수심 자료, 바닥 마찰계수, 담수 유입량으로 자세한 입력 자료는 Table 3에 제시하였다. 각각의 물리적 인자의 변화에 따른 수로 별 M_2 분조의 진폭 변화를 Fig. 6에 제시하였다.

초기 모델 결과에서 민감도 분석을 위해 물리적 인자를 변화를 준 7가지 모델 실험조건에서 초기, Case 1과 Case 2는 다른 조건은 동일하지만 조간대 지역의 수심을 증가 또는 감소시키는 변화를 주어서 수로의 지형적 형태의 변화를 고려하고자 하였다. Case 3과 Case 4의 경우는 바닥 마찰 계수를

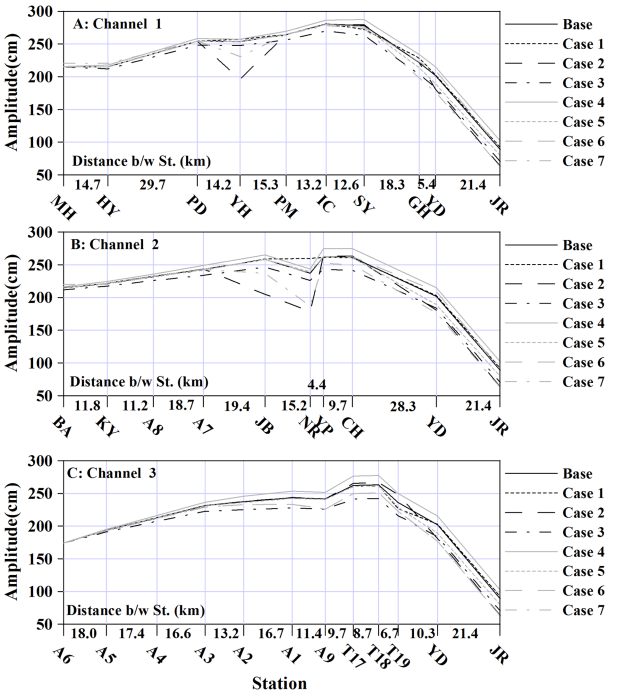


Fig. 6. The numerical model results on the experiment cases for the three channels. Experiment cases show variability of tide amplitude along the each channel.

Table 3. Input data with depth, bottom friction coefficient, and river discharge from Han River used in the numerical model cases.

Experiment	Open boundary	Depth change	Bottom friction coefficient	River discharge from Han River
Base	M_2, S_2, K_1, O_1	Base	0.003	Normal condition (408 m^3/s)
Case 1		Tidal flat +4(m)		
Case 2		Tidal flat -4(m)		
Case 3		Base	0.01	
Case 4		Base	0.001	
Case 5		Base	0.003	Wet condition (2326 m^3/s)
Case 6		Whole grid +1m		Normal condition (408 m^3/s)
Case 7		Whole grid -1m		

초기 모델에서 각각 3배 크게 하여 0.01로 1/3로 줄여서 0.001을 사용한 결과를 비교하였다. Case 5에서는 초기모델과 홍수기 일 때와 변화를 비교하기 위해 홍수기의 한강의 담수량 2,326 m^3/s (Park et al., 2002)을 입력하였고, 임진강과 예성강은 앞서 제시한 유역면적비로 구하여 입력하였다. 수심변화에 의한 조석 전파 특성을 비교하기 위하여 초기모델에서 모든 격자의 수심 값을 1 m 크게 입력한 Case 6과 1 m 작게 입력한 Case 7을 설정하였다.

수심을 1 m 작게 입력한 Case 7의 경우 전체적으로 진폭이 감소하였으며, 반대로 1 m 증가한 Case 6의 경우는 진폭

이 증가하는 경향을 보였다. 진폭의 증가와 감소하는 범위는 상대적으로 수심이 낮은 상류로 진입할수록 크게 나타났다. 증가 또는 감소하는 수심 크기가 동일하지만 수심을 1m 작게 입력했을 때의 진폭의 감소가 1m 증가 할 때의 진폭 증가 보다 크게 나타났다. 특히, 수심을 작게 입력한 경우에서 수로 1의 YH정점(Fig. 6A)와 수로 2의 JB와 NR정점(Fig. 6B)에서 진폭 변화는 다른 정점에 비하여 지역적으로 크게 나타났다. 이런 결과를 보인 이유는 Lane(2004)의 연구 결과와 마찬가지로 수심의 감소와 증가에 의해서 바닥마찰에 의한 저항이 증가, 감소하면서 진폭이 감소 또는 증가했기 때문으로 판단된다.

상류 및 하구지역에서 조석 전파에 영향을 주는 조간대의 특성(Friedrichs and Aubrey, 1988)을 고려하고자 조간대 지역의 수심을 4 m 증가한 Case 1의 경우 상류 및 하구지역에 진폭이 약간 상승하는 변화를 보였다. 조간대 수심을 4 m 감소한 Case 2의 경우 수로 1의 YH 정점(Fig. 6A), 수로 2의 JB와 NR 정점(Fig. 6B)에서 조간대의 영향 때문에 큰 감소가 나타났다고 판단되나 이 결과는 수치 모델 상의 오차인지 다른 물리적 의미가 있는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 조간대 지역의 변화는 수로의 단면적과 폭을 변화 시키는 주요 요인으로 작용하기 때문에 다른 민감도 분석의 결과 보다 큰 폭의 진폭 변화를 보였다.

바닥 마찰이 작아진 Case 4의 경우에는 상류로 진입하면서 진폭이 커지는 결과를 보여주었지만, 반대의 Case 3의 경우는 진폭이 감소하는 결과가 나타났다. 특히, 수심이 작아지는 상류로 진입할수록 마찰계수의 변화에 따른 영향이 크게 나타났다. 모델 전체 수심과 조간대의 수심 변화에서 보인 지역적으로 특정 정점에서 보이는 큰 폭의 변화는 나타나지 않았지만 상류 및 하구지역에서는 일정한 범위만큼의 증가와 감소를 보였다.

평수기 모델 결과인 초기결과와 홍수기를 모의한 Case 5를 비교하여 수치모델의 민감도 분석을 수행하였다. 홍수기 유량을 입력한 모델 결과를 보면 상류지역의 평균해면이 점진적으로 상승하였지만 조석의 조차는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7에 각 수치 모델 실험조건에 따른 위상 변화를 제시하였다. Case 6과 Case 7을 비교하면 수심이 감소하면 위상이 증가하고 반대의 경우 위상이 빨라졌다. 진폭 변화와 비슷하게 전체 수심의 증감에 따른 변화 역시 수심을 감소 시켰을 때의 위상 변화가 크게 나타났다. 바닥 마찰이 커진 Case 3의 경우 위상 속도가 느려졌고, 바닥 마찰이 작아진 Case 4의 경우 위상 속도가 빨라졌다. 진폭 변화와 마찬가지로 상대적으로 수심이 낮은 상류쪽의 변화가 크게 나타났다. 담수 유입량이 증가한 Case 5의 경우 YD의 하류 정점에서는 위상의 큰 변화는 나타나지 않았지만 상류 지점의 경우 수위 증가의 영향으로 위상이 빨라지는 현상이 나타났다. 조간대 수심을 조절한 Case 6과 Case 7를 보면 수로 1에서 조간대 수심이 증가하면 IC에서 GH 정점까지 위상속도가 느려지는 것을 볼 수 있는데 강화도와 영종도 사이의 조간대 영향으로 판단된다. 경기만

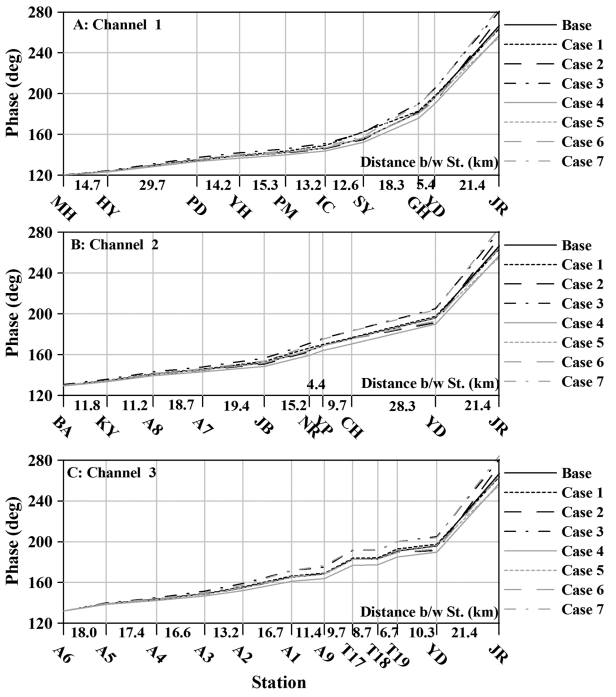


Fig. 7. The numerical model results on the experiment cases for the three channels. Experiment cases show variability of tide phase along the each channel.

한강하구 지역 특히, 강화도와 영종도 지역의 조간대의 영향에 의한 진폭의 증가 또는 감소, 위상 속도의 증가와 감소 현상에 대한 연구가 계속적으로 필요할 것으로 보인다. 담수 유입량이 증가하면서 상류 지역의 조석 진폭의 감소와 위상 속도가 빨라지는 현상(Godin, 1999; Horrevoets et al., 2004)에 관한 연구 역시 추후 자세한 검토가 필요하다.

민감도 분석한 결과를 정리하면 바닥 마찰계수에 따라서 진폭의 증가 또는 감소가 뚜렷하게 나타났으며, 조간대 지역의 수심 감소에 의해서 가장 큰 진폭 변화를 보였다. 그러나 각각의 물리적 인자들이 조석 전파에 중요한 역할을 담당하기는 하지만 관측 자료에서 보여준 hyper-synchronous 경향 자체를 변화시키지는 못하였다. 각각 인자의 독립적인 효과가 아닌 복합적인 영향에 의한 조석 전파 특성을 비교할 필요성이 있다. 수치 모델 결과에서 보여준 바닥마찰계수 변화는 마찰 항에 의한 영향이 작용한 것이고, 전체적인 수심 감소 및 조간대의 수심은 지형적 특성의 일부분을 표현했다고 했을 때 hyper-synchronous 형태를 표현할 수 있는 가장 타당한 이유라고 판단된다. 각 수로별로 최대 진폭이 나타나는 위치가 다르게 나타나는 이유를 위에 제시한 마찰과 지형적 특성을 이용하여 정량적으로 제시하고자 두 항을 포함하는 해석해 방법을 적용하였다.

3.3 해석해를 이용한 정량적 분석

수치 모델결과에서 보았듯이 각 물리적 인자의 상호 복합적인 영향을 비교하기 위하여 수치모델 결과에서 가장 큰 영

향을 보인 바닥마찰과 수로의 지형적 특성의 균형에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

Savenije(2005a)는 진폭 비율의 지수적인 증가 특성은 수로 단면적, 폭 그리고 수심에 의한 지형적 특성에 의해서 조절된다고 제안하면서, 하구 수렴 정도의 형태수와 마찰 정도에 바탕을 둔 매개변수를 사용하여 하구를 분류하였다. 두 매개변수는 St. Venant 방정식, 식 (1)에서 이상적인 수로에서의 간단한 해석해인 식 (2)로 표현이 가능하며, 매개변수의 정도에 따라서 진폭하구 또는 감소하구로 구별할 수 있다. 만약에 하구 수렴 항과 마찰 매개변수 에 따른 마찰 항이 같은 값을 가진다면 조석 진폭의 증가 또는 감소는 발생하지 않는다.

$$\frac{h}{H}\frac{dH}{dx}\left(1+\frac{gH}{2cv\sin\varepsilon}\right)=\frac{h}{b}-f\frac{g}{C^2}\frac{v\sin\varepsilon}{c} \tag{1}$$

여기서,
H : Tidal range
h : Stream depth
g : Gravity acceleration
c : Wave celerity
v : Tidal velocity amplitude
ε : Phase lag between high water and high water slack
f : Friction factor

$$\frac{1}{b}=f'\left(\frac{v\sin\varepsilon}{\bar{h}c}\approx\frac{R'}{c}\right) \tag{2}$$

여기서,
b : Convergence length of the stream width
f' : Adjusted friction factor
R' : friction parameter

$$A=A_0\exp\left(-\frac{x}{a}\right) \tag{3}$$

$$B=B_0\exp\left(-\frac{x}{b}\right) \tag{4}$$

$$h=h_0\exp\left(-\frac{x(a-b)}{ab}\right) \tag{5}$$

장기적으로 조석자료를 관측한 정점에서의 M_4/M_2 진폭 변화를 분석하였다. 분석 결과 M_4/M_2 진폭 비율은 하구 상류 지점으로 갈수록 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 하구로 진입하면서 조석파가 마찰 및 비선형 효과의 영향에 의하여 M_2 분조의 진폭이 감소하고, 전이된 에너지가 M_4 분조의 증가를 야기하기 때문에 발생을 한다(윤, 2006). Fig. 8의 M_4/M_2 진폭 비율의 결과에서 한강하구를 구성하는 수로는 Savenije(2005a)가 제시한 이상적인 깔대기 모양으로 표현할 수 있다. 그러므로 식 (2)의 해석해가 적용이 가능하

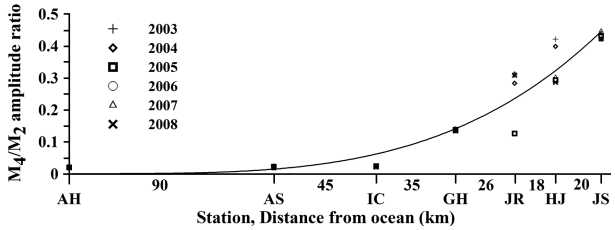


Fig. 8. The black line is averaged amplitude ratio upward to estuary. Each marker(e.g. +, ◇) means amplitude ratio during each year. AH and AS station is located nearby MH and YH station refer to Fig. 1, respectively. HJ and JS station is located upstream from JR station.

며, 하구 상류로 진입하면서 지수적으로 단면적이 변한다는 가정을 할 수 있다. 상류방향으로 X 방향이 증가하고, $X=0$ 에서의 단면적, 수로 폭 그리고 수심을 A_0, B_0와 h_0으로 각각 정의 하면 식 (3), 식 (4) 그리고 식(5)와 같이 표현된다.

조석파의 수렴도와 마찰 정도에 따른 해석해의 적용을 감조하천 구간으로 한정하여 적용하였다. 감조하천의 범위는 Fig. 9에서 제시한 것처럼 각 수로의 일부 구간으로 제한한 이유는 다음과 같다. JR정점 상류방향으로는 신곡수중보가 존재하며, 강화도 북쪽 지역은 수심 자료가 정확하지 않는 것을 고려하여 상류방향의 범위를 산정하였고, 하류방향으로의 범위는 담수가 경기만 해역에 영향을 미치는 영역(김, 1997; Park et al., 2002; 정, 2007)과 조간대 지역의 단면적 산정을 고려하여 설정하였다. Savenije(2005b)에서 제시된 다양한 지역에서의 해석해를 적용한 연구 결과를 봤을 때 본 연구에서 설정된 감조하천의 범위가 해석해 적용에 무리가 없다고 판단된다. 각 수로의 하류방향으로의 감조구간 범위는 수로 1은 인천항까지 수로 2는 남쪽입구 하류까지 수로 3은 A2 정점까지로 설정하여 해석해를 적용하였다.

Fig. 10에 각 수로의 감조구간에서의 단면적, 수로 폭, 수심에 관한 값을 제시하였다. A_0, B_0와 h_0의 값은 Fig. 9에 제시한 각 수로의 폭과 수심을 추출한 정점 중에서 가장 외해 쪽 정점의 값을 사용하였다. 조간대 지역을 고려하여 Fig. 9에 제시된 정점에서 평균해면 일 때의 폭과 평균 수심 값을 수치 모델에서 추출하여 수로의 단면적을 계산하였다. 회귀분석 결과 지형적 특성이 상류로 진행하면서 지수 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 이 형태는 식 (3)과 식 (4)에서 제시하는 단면적과 수로 폭의 경향과 비교해 봤을 때 각각의 상관도를 제시하였고 a, b값은 회귀곡선의 계수값이다. Table 4에 식 (3), 식 (4) 그리고 식 (5)를 통해서 구한 매개변수 값을 제시하였다. 각각의 수로를 비교하면 단면적, 수로 폭, 수심은 수로 2에서 가장 크게 나타나며, 수로 1에서 가장 작게 나타났다. 수로의 수렴정도를 나타내는 1/b의 값은 수로 1에서 44.1로 39.4인 수로 2 보다 크게 나타나고, 수로 3에서 57.5로 가장 크게 나타난다. 수렴정도가 가장 큰 수로 3은 M_2 분조의 진폭 변화가 가장 상류 지점까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 그

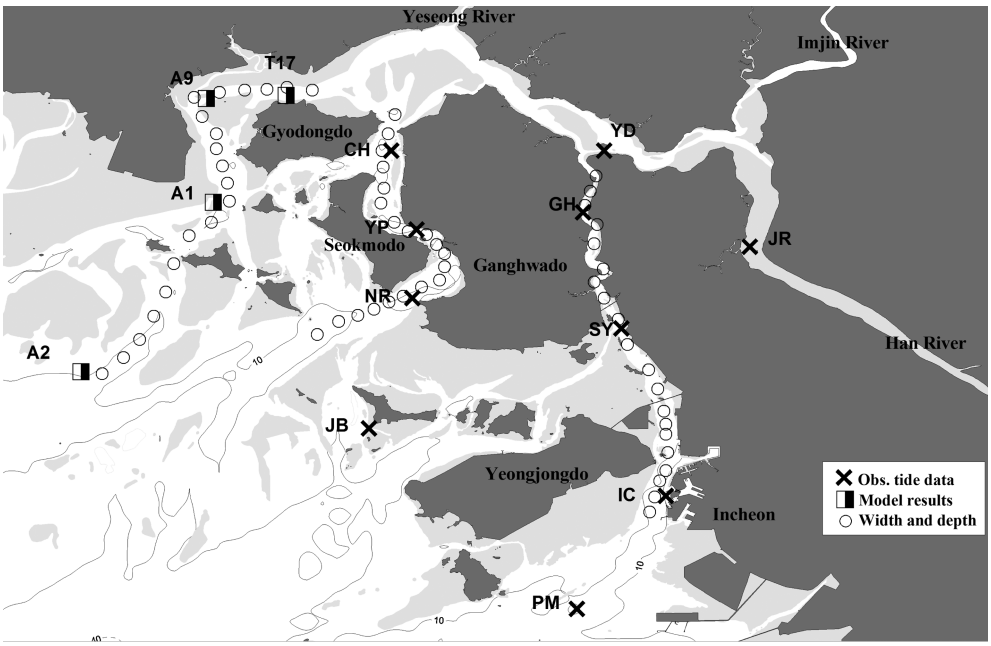


Fig. 9. The spatially range of tidal river of each channel. A circle indicated that station of width and depth extracted from numerical model. The area is calculated by width and averaged depth at mean sea level. The parameter of area, width and depth is presented Fig. 10. at each channel.

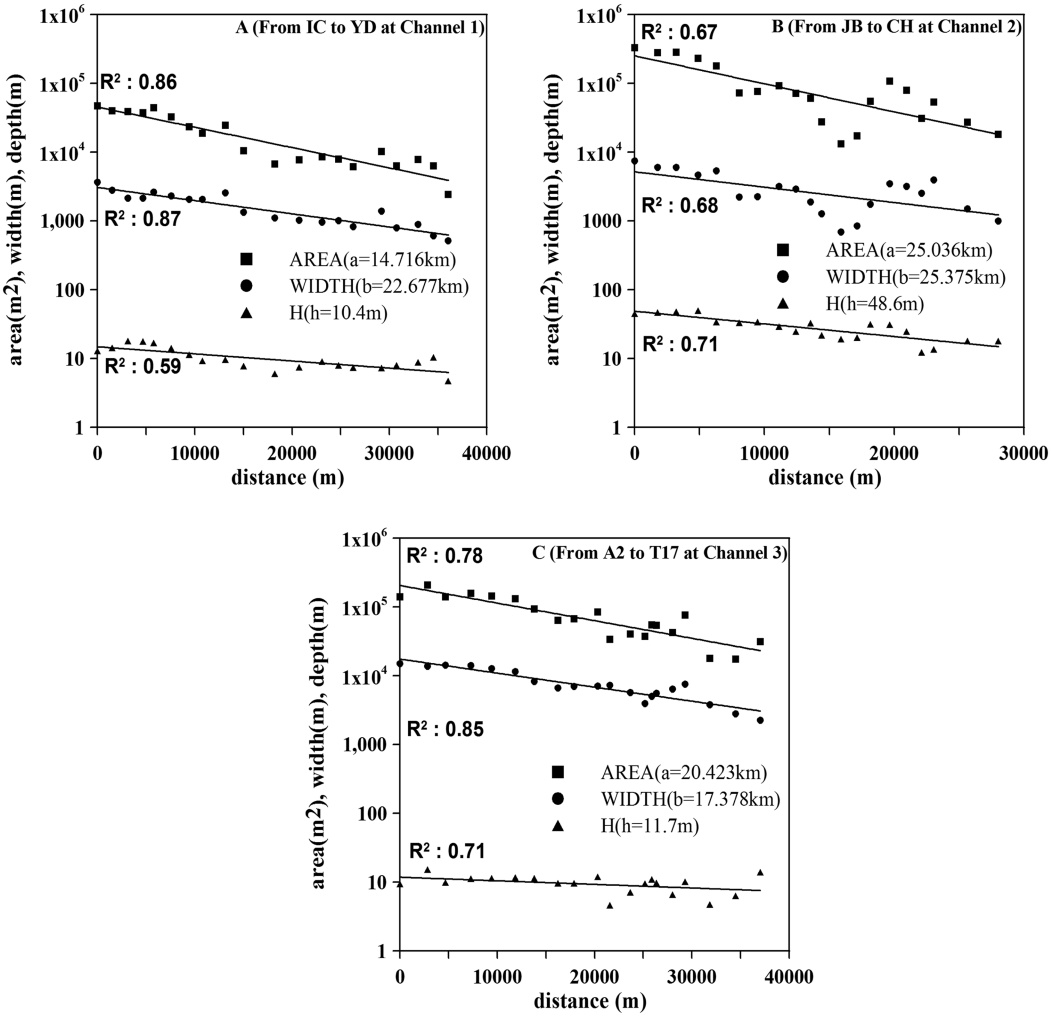


Fig. 10. Semi-logarithmic plot of the geometry of the channel 1(A), 2(B) and 3(C).

Table 4. The parameter calculated from Fig. 9 and 10 of each channel

Channel	$\mathbf{A}_0$ (m^2)	B_0 (m)	h_0 (m)	a (km)	b (km)	$1/b$ ($10^{-6}m^{-1}$)	R/c ($10^{-6}m^{-1}$)	$1/b : R'/c$
1	46954	3632	12.9	14.716	22.677	44.1	8.7	1 : 0.20
2	331288	7433	16.8	25.036	25.375	39.4	2.0	1 : 0.05
3	140574	14923	14.5	20.423	17.378	57.5	25.5	1 : 0.44

러나 수로 1이 수로 2에 비하여 수렴정도가 크지만 M_2 분조의 진폭 변화는 수로 2의 수로 남쪽 입구에서 북쪽 입구까지 크게 감소하지 않고, 수로 1의 경우 남쪽 입구에서 부터 급격하게 진폭이 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3과 Fig. 6). 이런 현상은 마찰 영향 항인 R'/c에 의해서 설명이 가능한데 수로 1의 값이 수로 2에 비하여 4배 이상 크게 나타나기 때문이다. 수렴 항은 비슷하지만 마찰 항이 수로 1이 크기 때문에 진폭 감소가 크게 나타나며 수렴 정도와 마찰의 비율은 수로 1은 1 : 0.20, 수로 2는 1 : 0.05로 나타난다.

수렴 정도는 수로 1이 수로 2에 비하여 크지만 마찰항의 영향이 수로 2에 비하여 수로 1이 크기 때문에 두 항의 균형에 의해서 수로 2가 수로 1에 비하여 상대적으로 수렴하는 수로이다. 그러므로 최대 진폭 위치가 수로 1에 비하여 상대적으로 상류에 나타난다. 외해에서 최대 진폭 위치까지의 진폭 증가율과 최대 진폭 위치에서 상류 지역까지의 진폭 감소율(Table 2)을 보면, 진폭의 증가율은 수로 1이 수로 2에 비하여 크지만 진폭 감소율은 수로 2가 작은 결과와 일치한다.

4. 결 론

경기만 한강하구 지역의 조석전파 특성을 이해하기 위해서 관측 자료와 수치모델 결과를 이용하여 연구하였다. 경기만 지역은 크게 3개의 주 수로와 3개의 강으로 구성되어 있으며, 조차가 크고 조간대가 넓게 발달되어 있어서 독특한 해수 순환 특성을 보여준다. 조석 M_2 분조의 진폭의 변화는 외해에서 하구 상류로 진입하면서 점진적으로 증가를 하지만 특정 위치 이후에는 급격하게 감소하는 hyper-synchronous 형태를 보여준다. 수치 모델의 입력 변수 값의 변경하여 민감도 분석을 수행한 결과 마찰 계수 변화와 조간대 수심 변화에 의해서 가장 큰 진폭 변화 양상을 보여주었지만, hyper-synchronous 형태 자체의 변형은 나타나지 않았다. 즉, 독립적인 물리 인자에 의한 변화 보다는 각 인자의 상호 작용에 의한 복합적인 현상으로 판단된다. 각 수로의 조석전파 특성은 지형학적 수렴정도와 마찰의 균형에 의해서 지배되며, 두 항의 균형에 따라서 최대 진폭이 나타나는 위치가 수로별로 다르게 나타났다.

각 수로의 최대 진폭 위치 및 지형학적 특성과 마찰의 균형 정도를 정량적으로 제시하고자 해석해를 이용한 방법을 본 연구에 적용하였다. 해석해를 통해서 계산한 매개변수 값을 각 수로별로 비교하였다. 수로 1(염하수로)의 경우 수렴과 마찰의 비율이 1 : 0.20로 나타났지만, 수로 2(석모수로)의 경우 1 : 0.05, 수로 3의 경우 1:0.44로 나타났다. 수로 1(염하수로)이 수로 2(석모수로)에 비하여 마찰의 영향이 크다. 그러므로 수렴과 마찰의 영향에 의해서 두 수로 모두 hyper-synchronous 경향의 조석전파 특성을 보이지만 수로 1에서 먼저 최대 진폭의 위치가 나타난다. 거리 당 진폭 감소율과 위상 증가율의 변화도 수로 1에서 크게 나타났다. 각 수로 별 조석 전파 특성의 형태는 비슷하지만, 최대 진폭 위치 등의 차이로 나타나는 해수 순환 및 물질 이동의 형태는 독특한 특성을 보일 것이다. 그러므로 경기만 한강하구 해역은 하나의 단일 시스템에 의한 연구도 필요하지만 각 수로 별 해수 순환에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (해수순환 및 생태계변화 예측기술개발사업)

참고문헌

국립해양조사원 (2002). 한강임진강 유역에 대한 조위 영향 연구.

김영택 (1990). 한강하구 및 경기만에서의 물리학적 특성. 석사학위논문, 인하대학교.

김홍선 (1997). 경기만 에서의 해수 유동과 염분 분포에 대한 수치모델링. 석사학위논문, 인하대학교.

서승원 (2011). 서해연안 상세해상을 통한 천해조석 및 조석비대칭 재현. 한국해안해양공학회 논문집, 23(4), 313-325.

서승원, 박원경 (1996). 조간대 모의를 위한 2차원 유한요소해석. 한국해안해양공학회지, 8(1), 103-113.

윤병일 (2006). 경기만 한강하구 조석/조류 전파 특성 및 비선형 천해분조에 대한 수치모델링. 석사학위논문, 인하대학교.

윤병일, 우승범 (2011). 한강하구 염하수로의 대소조기에 따른 순수송량 변동에 관한 수치해석적 연구. 한국해양학회지, (심사중).

인하대학교 해양과학기술연구소 (2003). 창후항 박지보수 및 창후리 교동간 항로보수를 위한 준설관련 해양조사 보고서.

임효혁 (1999). 경기만에서의 수치모델링을 이용한 한강수 유입 연구. 석사학위논문, 인하대학교.

정정호 (2007). 3차원 수치모델을 이용한 경기만 해수의 시공간적인 수리학적 거동과 환경조건 변화에 대한 예측 모델링 연구. 박사학위논문, 광운대학교.

Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models (Ed : N. Heaps) AGU, Washington, D. C, 1-16.

Dronker, J. (1986). Tidal asymmetry and estuarine morphology.

Netherlands Journal of Sea Research, 20(2), 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, 195pp.

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.

Friedrichs, C.T. and Aubrey, D.G. (1994). Tidal propagation in strongly convergent channels. Journal of Geophysical Research, 99 C2: 3321-3336.

Godin, G. (1999). The propagation of tides up rivers with special considerations on the upper Saint Lawrence River, Estuar. Coast. Shelf Sci., 48, 307-324.

Hamrick, J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317, 63 pp

Horrevoets, A.C., Savenije, H.H.G., Schuurman, J.N., Graas, S. (2004). The inuence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries. Journal of Hydrology 294, 213-228

Hunt, J.N. (1964). Tidal oscillations in estuaries. Geophys. J. R. Astron. Soc. 8, 440-455.

Ippen, A.T. and Harleman, D.R.F. (1966). Tidal Dynamics in Estuaries: Estuary and Coastline Hydrodynamics (Ed: Ippen, A.T.) McGraw-Hill, New York, 493-545.

Jay, D.A. (1991). Green's law revisited: tidal long-wave propagation in channels with strong topography. J. Geophys. Res., 96 C11: 20585-20598.

Lane, A. (2004). Bathymetric evolution of the Mersey Estuary, UK, 1906-1997: causes and effects. Estuar. Coast. Shelf Sci., 59, 249-263.

Lanzoni, S. and Seminara, G. (1998). On tide propagation in convergent estuaries, J. Geophys. Res., 103, 30,793-30,812.

Park, K., J.H. Oh, H.S. Kim and Im, H.H. (2002). Case study: Mass Transport Mechanism in Kyunggi Bay around Han River Mouth. Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 257-267.

Parker, B.B. (1991). The relative importance of the various nonlinear mechanism in a wide range of tidal interaction (review): Tidal hydrodynamics. John Wiley & Sons Ltd, 237-268.

Pugh, D.T. (1987). Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists. Wiley, Chichester, 472pp.

Savenije, H.H.G. (2005a). Salinity and Tides in Alluvial Estuaries, Elsevier, Amsterdam, 197pp.

Savenije, H.H.G. and Veling, E.J.M. (2005b). Relation between tidal damping and wave celerity in estuaries, J. Geophys. Res., 110, C04007, 1-10.

Speer, P.E. and Aubrey, D.G. (1985). Non-linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems Part II : Theory. Estuar. Coast. Shelf Sci., 21, 207-224.

원고접수일: 2011년 8월 31일
수정본채택: 2011년 9월 22일
게재확정일: 2011년 9월 28일