



Original Article

인류세 준설과 하구언이 하구유동과 최대탁도에 미치는 영향: 수치모델연구

장종위¹ · 이관홍^{2,*}

¹인하대학교 해양과학과 대학원생

²인하대학교 해양과학과 교수

Anthropocene Effects of Dredging and Estuarine Dam on Hydrodynamics and Estuarine Turbidity Maximum at an Idealized Estuary: Numerical Study

Jongwi Chang¹ and Guan-hong Lee^{2,*}

¹Graduate Student, Department of Ocean Science, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Professor, Department of Ocean Science, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

20세기에 들어 전 세계의 많은 하구가 인간에 의해 물리적으로 변형되었다. 이런 변형은 수력학적 특성 및 퇴적물 이동의 변화를 야기하였다. 본 연구는 인간에 의한 물리적 변형이 하구에서 어떻게 작용하는지 수치모델을 이용해 규명하였다. 특히 하구언 건설과 준설에 의한 수력학적 특성 및 퇴적물 이동의 특성 변화를 파악하였다. 준설은 조석 증폭과 창조 우세를 증가시켰으며 퇴적물이 하구 상부에 퇴적되도록 만들었다. 이런 변화는 수력학적 마찰을 감소시켜 퇴적을 가속화하는 양의 피드백을 가져왔다. 하구언 건설의 경우, 조석이 증폭되었으며, 유속이 감소했다. 따라서 퇴적물의 부유 또한 현저하게 감소했다. 본 연구는 인간의 영향에 의한 변형이 하구에 수력학적, 퇴적학적으로 미치는 영향을 파악하는데 도움이 되었다.

Abstract – Many estuaries around the world have been physically altered over the last century due to the construction of estuarine dam, the reclamation of tidal flats, and the dredging of the channel. These alterations have modified the properties of hydrodynamics and sediment transport in the estuary. In this study, Regional Ocean Modeling System (ROMS) is utilized to assess the impact of human-induced physical alterations in the estuarine environment. In particular, this study examines adjustment of hydrodynamics and sediment transport caused by deepening of the channel and damming of an estuary. Deepening amplifies tidal range and increases tidal asymmetry to flood dominance, which lets the sediment trapped in the upper estuary. These changes decrease the effective hydraulic drag, which causes positive feedback to the system. In case of damming, the tide increases due to the presence of a dam and the current velocity decreased. Thus, the suspended sediment concentration also decreased significantly in the dammed estuary. This study shed light on the response of hydrodynamics and sediment transport by the anthropogenic alteration of an estuary.

Keywords: Anthropocene(인류세), estuarine dam(하구둑), dredging(준설), estuarine alternation(하구 변형), turbidity maximum(최대 탁도), numerical model(수치 모델)

1. 서 론

지난 몇 세기에 걸쳐 세계의 많은 하구들이 인간에 의해 변형되었다. 인간에 의하여 발생하는 가장 보편적인 물리적 형태 변화는

간척, 준설, 그리고 댐 건설을 들 수 있다(De Jonge *et al.*[2014]; Williams *et al.*[2013,2015]). 우리나라에서 가장 대표적인 하구변형은 댐 또는 갑문의 건설이라고 할 수 있다. 염수 침입을 막고 농업용수를 확보하기 위해 한국 하구의 약 50%가 댐 또는 갑문으로 막혀 있는데(Lee *et al.*[2011]), 이런 하구에서 댐은 조수 확산 및

*Corresponding author: ghlee@inha.ac.kr

조수 펌핑(tidal pumping)의 변화를 가져온다. 또한, 선박의 항행로를 확보하기 위해 수로를 확보하고 유지하기 위한 항로 준설도 하구의 변형을 가져온다. 항로 준설에 따른 수심 증가는 조석 증폭(tidal amplification)의 변화, 하구순환(estuarine circulation)의 강화, 그리고 조석 비대칭(tidal asymmetry) 증가를 야기한다(Winterwerp *et al.*[2013]). 인간의 간섭에 따라 하구에서 조석 비대칭과 하구순환이 강화되면 수력학적 마찰(hydraulic drag)이 감소하게 되고, 퇴적물 이동의 변화를 가져온다. 독일 Ems강 하구 연구에 따르면, 하구의 퇴적물 이동은 조석 비대칭과 하구 순환에 기인한 상류방향의 수송과 강에 의해 발생하는 하구 방향의 수송이 균형을 이루어 최대탁도를 형성하지만, 준설에 따른 수심 증가 및 수력학적 마찰 감소는 조석 비대칭과 하구 순환의 강화를 가져와 상류 방향의 수송이 우세하게 되고 퇴적물 농도가 감소하는 하구로 변화하게 된다(De Jonge *et al.*[2014]; Winterwerp *et al.*[2013]). 이러한 하구 변화는 최대탁도 지점의 변화를 평형상태로 이동하게 된다(Winterwerp[2011]). 이렇듯 하구언과 준설과 같은 하구 변형은 하구 체제변화(regime shift)를 가져오므로(예, Williams *et al.*[2013]; Winterwerp *et al.*[2013]), 인간에 의한 환경변화가 증대되는 인류세 하구변형으로 인한 하구순환과 퇴적작용 변화의 이해도를 높이는 것이 더욱 중요해졌다.

하구의 변형을 파악하기 위한 연구 가운데 연속방정식과 운동방정식에 기반한 하구 순환의 분석적 방법을 들 수 있다(예, Friedrichs[2010]; Lanzoni and Seminara[1998]; Toffolon and Savenije[2011]). 하구의 조석 변형과 수렴의 관계에 대해 연구한 Lanzoni와 Seminara의 연구는 양적 균형에서 하구 수렴의 역할을 규명했다(Lanzoni and Seminara[1998]). 이를 위해 운동방정식의 국지 관성(local inertia)과 소산(dissipation)의 강도에 따라 4가지 제한 사례에 대한 선형 1차원 해석해를 사용했다. Friedrichs는 다양한 형태의 하구에서 조류와 조위의 변화를 평가하기 위해 해석해를 사용했다(Friedrichs[2010]). 또한 하구의 수심, 너비의 수렴 효과를 포함한 조석 수역학 선형해를 개선하는 노력을 수반하고 있다(Toffolon and Savenije[2011]). 하지만 이러한 해석해는 수역학적인 변형을 파악하고 작용을 이해하는데 적합하지만, 하구변형에 따른 수역학적 변화, 그리고 퇴적물 이동과 지형변화의 피드백을 포함하는 변형 효과를 파악하기에는 한계가 존재한다. 최근에는 많은 연구자들이 이러한 한계를 극복하기 위하여 수치 모델을 이용하고 있다. 예를 들어(Van Maren *et al.*[2015])은 Ems 하구에서 수로의 수심 증가와 준설이 퇴적물 이동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치모델을 사용하였다. 더불어 인간의 영향에 따른 작용의 이해를 위한 이상적인 모델(Idealized model)의 적용 등 다양한 목적으로 수치모델이 사용되고 있다(Schuttelaars *et al.*[2013]).

하구 변형에 대한 연구는 특정 하구에서 발생한 다양한 변형을 종합적으로 평가하고 있으며, 개별적인 하구 변형을 독립적으로 이해하려는 노력은 부족한 현실이다(예, Van Maren *et al.*[2015]; Williams *et al.*[2013;2014]). 특히, 우리나라에는 하구언 건설에 따른 조석, 유속 및 생태환경 변화에 대한 연구가 다수 존재하지만,

하구언, 준설 및 간척 등 개별적인 하구 변형에 따른 수역학 및 퇴적역학적 변화에 대한 이해는 충분하지 않다. 그러므로 본 연구는 우리나라에서 보편적으로 나타나는 준설(수심증가)과 하구언 건설(하구단절)과 같은 하구 변형이 미치는 하구 수역학 및 퇴적역학적 영향을 모의하고 작용을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 수로 수심의 증가와 댐의 건설에 의해 발생하는 조석 증폭, 비대칭성의 변화, 그리고 퇴적물 이동 변화에 따른 하구 최대 탁도 변화를 비교하고 분석하였다.

2. 방 법

2.1 Regional Ocean Modeling System 모델

본 연구를 위해 Regional Ocean Modeling System (ROMS)을 사용하였다. ROMS는 오픈소스이며, 자유수면, 지형에 적합한 모델이다. 이 모델은 Boussinesq 및 정역학적 가정을 이용하여 레이놀즈 평균한 나비에-스토크스 방정식의 유한 차분 근사를 수행한다. 수역학과 퇴적역학의 관점에서 이 모델은 두 가지의 장점을 가진다. 첫째는 하구와 같이 염분 및 수온의 공간 구배가 크고, 이송이 물질 이동의 주된 역할을 하는 환경에 적합한 이송 계산식을 이용한다. 본 연구에서는 (Wu and Zhu[2010])에 의해 개발된 3rd HSIMT-TVD scheme을 이용했다. 이 계산법은 시간과 공간에서 각각 2차와 3차의 정확도를 갖고 비진동성의 장점이 있어서, 하구와 같이 구배가 큰 환경에서도 안정된 계산을 가능하게 한다. 둘째는 사용자가 원하는 개수의 퇴적물 등급을 이용해서 해저경계층을 구현할 수 있다는 점이다. 해저경계층을 계산하는데 다음 두 가지 방법을 사용할 수 있다. 1) 선형, 대수형, 또는 이차형의 마찰 계수를 이용하는 방법(linear, logarithmic, and quadratic drag coefficient), 2) 해저면 위에서 발생하는 해류와 파랑의 상호작용 모델을 이용하는 방법(Warner *et al.*[2008]). ROMS가 가지는 이러한 유연성은 ROMS가 이상적인 하구와 실제 하구 모두에서 사용되는데 큰 역할을 한다. 본 연구에서는 이차 방정식 형태의 마찰계수를 이용해서 해저 경계층을 계산했다.

2.2 모델 설정(Model description)

본 연구에서 고려하는 이상적인 하구의 수치모델 격자는 한국의 낙동강을 가정하여 구성하였다. 하구의 길이는 57 km이며 길이(종방향 격자간격)는 160 m이다. 하구 너비는 하구 입구에서 1500 m이고 상류 말단은 600 m까지 감소하며, 하구의 너비(횡방향) 격자는 15~6 m의 크기를 갖는다. 수심은 연구 목적에 따라 3가지 경우를 설정했다(Fig. 1). 첫째는 하구 입구에서 수심이 8 m, 입구로부터 38 km 지점에서 6 m의 수심을 가지며 수로의 폭은 300 m인 기본적인 수로를 가지는 경우이다(Normal case). 38 km부터 강의 입구까지는 수심이 6 m에서 3 m까지 감소하였다. 둘째는 준설로 인한 하구 변형을 모의하기 위하여 수심을 하구 입구에서 10 m, 입구에서 38 km 지점에서 8 m로 증가시켰다(Deepening case). 셋째는 Normal case와 같은 수심 격자를 갖지만 하구에서 46 km에 지점에 하구언이 존재하는

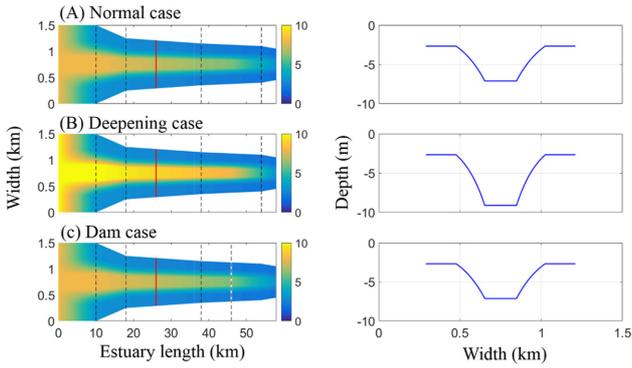


Fig. 1. Grid domain (left panel) and cross-section at the distance of 25 km from the river mouth (right panel) of three cases: (a) Normal case, (b) Deepening case (c) Dam case.

경우이다(이하 Dam case). 수직 격자는 총 30 층의 등간격으로 이루어져 있으며, 최대 0.3 m~0.06 m의 격자간격을 가진다. 수로의 양쪽으로는 3 m 이하의 얇은 수심을 가지는 구간이 펼쳐져 있다. 전체 하구 넓이와 얇은 수심 지역의 비율은 약 3:1이다. 하구는 수렴 정도에 따라 4개 구간으로 나뉜다. 구간 1은 하구 입구로부터 10,000~18,000 m이며 너비가 1,500 m에서 1,000 m로 빠르게 수렴한다. 구간길이 대비한 감소폭으로 산정한 감소율은 0.062이다. 구간 2는 18,000~38,000 m으로 총 20,000 m 동안 너비가 200 m 감소한다(감소율=0.01). 구간 3은 Dam case와 Normal/Deepening case의 경우가 다르게 설정했다. Normal 및 Deepening case의 경

우는 38,000~54,000 m 거리에 100 m의 너비가 감소한다(감소율=0.00625). Dam case는 38,000 m부터 댐이 존재하는 46,000 m까지 설정했다. 마지막 구간 4는 Normal과 Deepening case에만 존재하며, 54,000 m에서 하구의 끝(58000 m)까지 100 m의 너비가 수렴한다(감소율=0.025).

해저 퇴적물은 중립사, 세립사, 실트 및 점토로 구성되어 있다. 이들은 모델 영역전체에 해저면 전체에 균일하게 25%씩 분포되어 있다. 각 입경의 침강 속도는 (Van Rijn[1984])의 경험식으로 계산하였으며, 입계전단응력은 Soulsby and Whitehouse[1997] 공식으로 산정하였다. 방류에 포함되어 있는 퇴적물 입자의 크기는 해저면 퇴적물의 입경과 같다. 방류에 속한 퇴적물의 농도는 중립사와 세립사는 각각 540 kg/m³이, 실트 및 점토는 각각 360 kg/m³이며, 바다로부터 퇴적물이 유입되는 않는다(Table 1).

모델의 초기 상태는 35 psu의 염분과 10 °C의 수온으로 설정되었는데, 이는 담수의 영향이 없을 경우의 해수 평균 염도와 온도를 나타낸다. 해양 쪽에서는 모델 초기와 마찬가지로 35 psu염분과 10 °C의 수온을 가지는 수괴가 유입되며, 강 쪽에서는 0 psu와 26 °C를 가지는 수괴가 유입된다. 초기 유속과 해수면도 0으로 설정하였다. 본 모델에서 하구 순환을 재현하기 위해 사용한 외력은 조석과 하천 방류이다. 조석은 4가지 조화상수(M₂, S₂, K₁, O₁)를 합성하여 재현하였으며, 조석은 바다 경계에서 육지 방향으로 전파한다. 방류는 강 경계에서 600 m³/s의 담수를 지속적으로 배출한다. 이는 Deepening case와 Damming case에서도 동일하게 산정되었다. 위 두 가지 외력을 제외한 파랑 등 다른 외력은 배제하였다(Fig. 2).

Table 1. Sediment properties for sediment bed and river discharge

| | Medium sand | Fine sand | Silt | Clay |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Grain size | 300 μm | 150 μm | 50 μm | 2 μm |
| Settling Velocity | 43.5 mm/s | 15.9 mm/s | 2 mm/s | 0.0032 mm/s |
| Critical stress for erosion | 0.18 N/m ² | 0.14 N/m ² | 0.0967 N/m ² | 0.009 N/m ² |

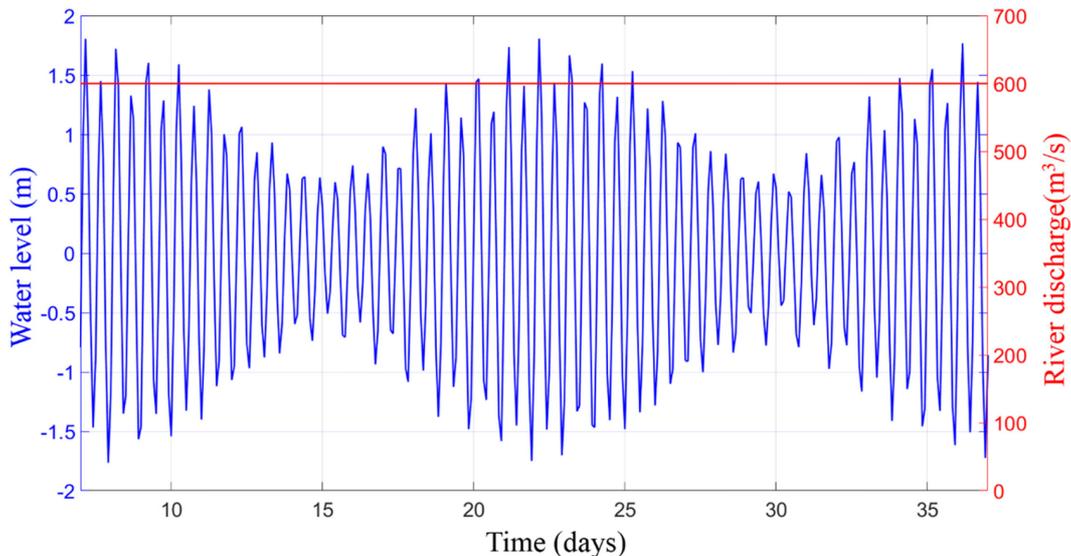


Fig. 2. Forcings in the model: tidal amplitude (blue) and river discharge (red).

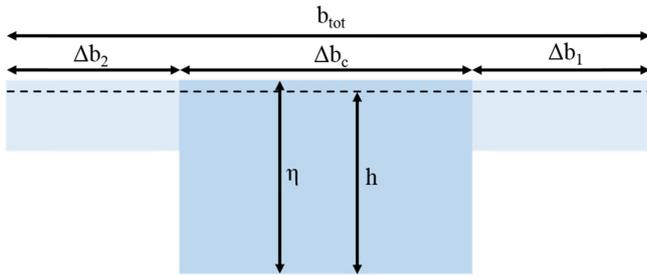


Fig. 3. Funnel-shaped idealized estuary ($b_{tot}=b_c$).

모델은 37일 간 5초의 간격으로 계산되었으며, 첫 7일은 모델의 안정화 기간으로 분석에서 제외됐다.

2.3 분석 지표(Parameters)

각 모델의 결과는 조수의 증폭/감쇠, 비대칭성, 수력학적 마찰 및 하구 최대 탁도 지점을 통해 수력학 및 퇴적역학적 변화를 보여주는데 사용하였다. 이를 위해 두 가지의 가정이 선행되었다. 첫째는 하구 단면이 수로 양안에 조간대를 갖는 깔때기 모양이라는 가정이고(Fig. 3), 둘째는 하구가 지수적으로 수렴한다는 가정이다.

$$b_c = b_o \exp\left(-\frac{x}{L_b}\right) \tag{1}$$

식 (1)에서 b_c 는 하구로부터 거리 x 의 하구 너비, b_o 은 하구에서의 하구 너비, 그리고 L_b 는 수렴거리이다.

이러한 가정을 바탕으로, Winterwerp *et al.*[2013]을 따라서 조수의 증폭/감쇠, 비대칭성, 수력학적 마찰 및 하구 최대 탁도 지점에 대한 파라미터를 계산하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

1. 각 구간에서 하구의 너비 변화에 의한 수렴 정도가 결정되는 수렴거리(Convergence distance, L_b)를 식 (1)에 따라 계산한다. 수렴거리는 하구의 너비 변화에 따라 수렴의 정도를 나타내는 지표이다. 그 수가 작을수록 수렴정도가 큰 것을 의미한다.

2. 하구의 기하학적 변화와 수심의 변화에 따른 수렴 정도를 나타내는 수렴수(Convergence number, A_e)는 다음과 같이 식 (2)에 주어졌다. 수렴수는 수렴거리와 달리 하구 너비의 변화뿐만 아니라 수심의 변화를 감안해 수렴의 정도를 나타내는 지표이다.

$$A_e = \frac{4L_b^2\omega^2}{gA_c/b_{tot}} \tag{2}$$

여기에서 A_e 는 하구의 단면 넓이, g 는 중력가속도, b_{tot} 는 하구의 너비, ω 는 주파수($=2\pi/T$, T =조석 주기)이다. 식 (2)의 각 요소는 Fig. 3을 기본으로 하며 조석 주기는 M_2 에 해당하는 12.42 시간으로 계산하였다.

3. 수력학적 마찰(C)은 Chezy 계수의 형태로 표현된다. Chezy 계수는 Wall 법칙(Law of the wall)과 관련이 있으며, 다음 공식과 같이 산정되었다.

$$C = \frac{U}{u_*} \sqrt{g} = 18 \log \left\{ \frac{12h}{k_s} \right\} \tag{3}$$

여기에서 u_* 는 마찰속도, k_s 는 해저면 거칠기, h 는 수심, 그리고 U 는 수심평균속도를 나타낸다. Chezy계수의 상대적인 비교를 위해서 Chezy 계수를 식 (4)와 같이 무차원 계수인 마찰수(Friction number, γ_*)로 계산하였다.

$$\gamma_* = \frac{gU}{\omega h C^2} \tag{4}$$

4. 수렴하는 하구에서 조석과의 전파를 나타내는 계수인 imaginary wave number (k_i)는 다음과 같이 식 (5)에 따라 계산하였다.

$$k_i = 1 \mp \frac{1}{2} \left[2\sqrt{(A_e - 1)^2 + A_e \gamma_*^2} - 2(A_e - 1) \right]^{1/2} \tag{5}$$

위 계산의 결과는 $K_r A_e$ 도표로 나타내며, 이를 통해 하구의 조석 증폭과 감쇠 정도를 판단할 수 있다.

5. 조석 비대칭(λ)은 창조와 낙조시의 조석과 속도 비율로 나타낸다.

$$\lambda = C_{hw} / C_{lw} \tag{6}$$

여기에서 C_{hw} 는 창조시 조석과 유속을 나타내고, C_{lw} 는 낙조시 조석과 유속을 나타낸다. 조석비대칭은 $\lambda > 1$ 일 때 창조우세, $\lambda < 1$ 일 때 낙조우세를 나타내고, $\lambda = 1$ 일 때는 조석 대칭을 나타낸다.

6. 마지막으로 공간에 따른 부유퇴적물 농도 분포를 통해 하구 최대 탁도 지점을 확인한다.

3. 결 과

3.1 수렴길이(Convergence length, L_b)와 수렴수 (Convergence number, A_e)

수렴거리(L_b)는 하구에서의 거리 증가에 대한 하구 너비 감소에 따라 수렴 정도가 결정되는 지표이다. Fig. 4는 구간별 수렴거리와 수렴수를 나타내고 있다. 수렴거리는 비교적 강한 수렴을 보이는 구역 1과 4에서는 감소하는 추세를 보이며, 약한 수렴을 갖는 구역 2와 3에서 증가하는 추세를 보이고 있다. 반면에 하구 너비와 수심 변화를 모두 포함하여 수렴 정도를 보여주는 수렴수(A_e)는 수심이 증가할수록, 수렴거리가 감소할수록, 조간대의 넓이가 감소할수록 감소한다. Normal case 경우는 수렴거리와 같은 추세를 보이고 있다. 하구 수로의 수심이 증가한 경우(Deepening case), 너비만을 포함한 수렴거리에는 변화가 없으나 수렴수에는 변화가 발생했다. 구역 1의 경우, 구역 내에서의 수심변화가 적기 때문에 수렴수의 변화가 미약하나, 구역 2와 3에는 수심의 증가로 인하여 수렴수가 감소했다. 구간 4는 수심 증가 전, 구간 내에서 눈에 띄는 수렴수의 감소세를 보였으나 수심 증가 후 약간의 증가세로 변화했다. 이를 통해, 구간 1은 하구의 너비 변화가 수렴에 큰 영향을 미치고, 구간 2와 3은 하구의 너비 변화와 수심의 변화가 중도적으로 영향을 미치는 반면, 구

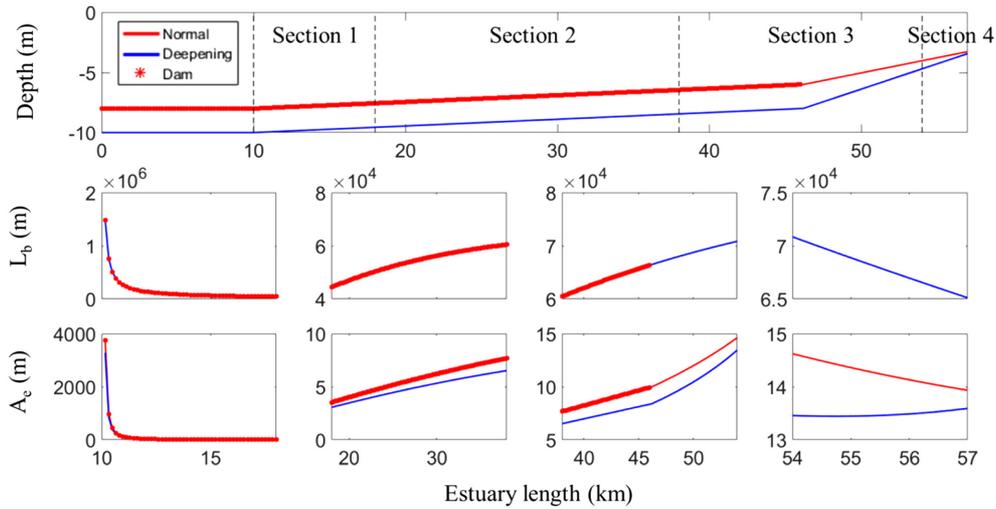


Fig. 4. Convergence length (L_b) and convergence number (A_c) for four sections of the idealized estuary. The top panel also shows the depth change of three cases (Normal case - solid red; Deepening case - solid blue; Dam case - dotted red).

간 4는 수심의 변화가 수렴에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그리고 Dam case의 경우 수렴거리와 수렴수에 변화를 갖지 않으므로 댐 건설 이후 퇴적물 이동이 발생하지 않는다면 댐 건설이 하구 형태변화에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다(Fig. 4).

3.2 유속(Velocity)

유속은 하구순환을 결정 짓는 중요한 요소이다. 일반적인 하구에서는 방류로 인해 표층에서 바다로 향하는 유속이 발생하며 저층에서는 상류로의 흐름이 발생한다. 이를 하구순환(Estuarine circulation) 혹은 중력순환(gravitational circulation)이라 부른다(Dyer[1973]). 하구변형이 가져오는 하구순환 변화를 비교하기 위하여 하구 유속에 36시간 Lanczos 필터를 적용해서 단주기성분을

제거하였다(Scully and Friedrichs[2007]; Williams *et al.*[2015]). Normal case는 강에서 가까운 경우 방류로 인하여 전 수층에서 하류방향의 흐름이 발생하였으며 표층에서 더 빠르게 나타났다(Fig. 5). 하지만 저층의 유속은 하류로 갈수록 상류방향으로 변환되었다. Deepening case는 Normal case보다 전 수층에서 강한 흐름을 보이는데, 이는 수심이 증가한 경우 하구순환이 강해지는 것을 의미한다. 따라서 하구 입구로 갈수록 표·저층 사이의 유속 차이가 커져서 이는 하구에서의 퇴적물 이동에 큰 영향을 미친다(3.5 참조). Dam case의 경우에 구역 1과 2에서 유속이 전체적으로 감소하였다. 구역 3에서는 Normal case에 비하여 바다 방향의 유속이 증가하는데, 이는 댐에서 방류되는 담수의 영향으로 보인다.

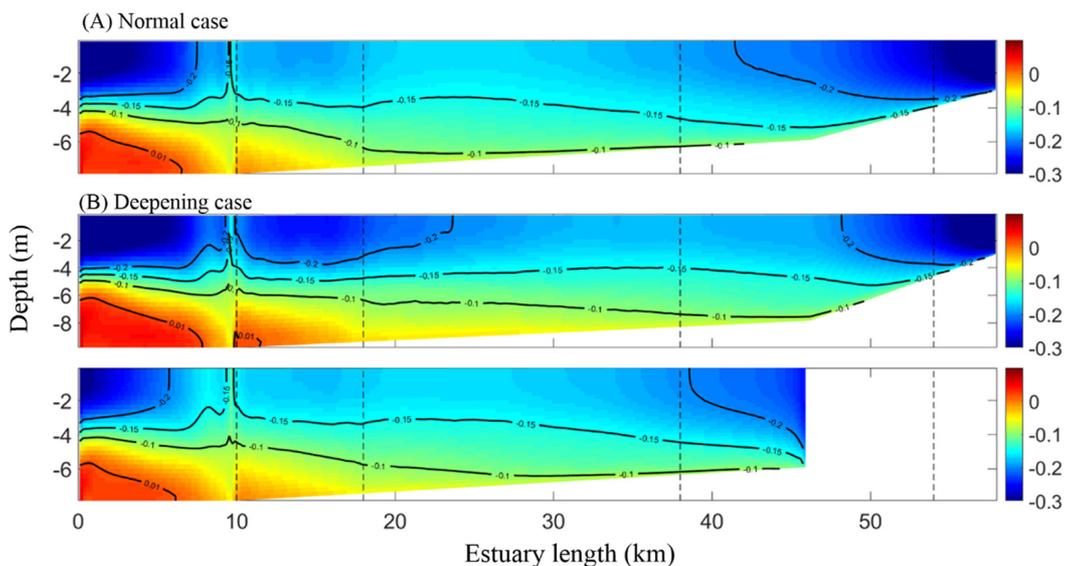


Fig. 5. Residual currents for three cases (A - Normal case; B - Deepening case; C - Dam case). Residual currents were obtained by applying 36 hours Lanczos filter.

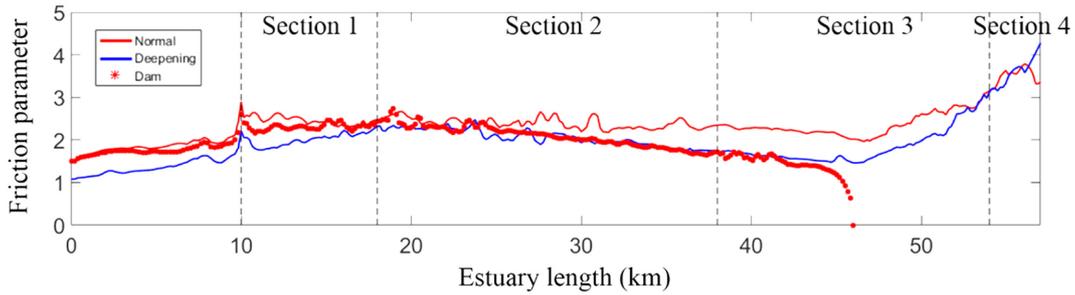


Fig. 6. Dimensionless friction number (γ) in the estuarine reach for three cases (Normal case - solid red; Deepening case - solid blue; Dam case - dotted red).

3.3 수력학적 마찰(Effective hydraulic drag)

수력학적 마찰의 감소는 조석 증폭을 가져오는 요소이다. 수력학적 마찰을 감소시키는 요인으로는 다음 세가지가 있다. 첫째는 해저면 거칠기가 변하지 않는 환경에서 수심의 증가이다. 둘째는 퇴적물 표면에서 발생하는 해저면 거칠기의 변화이다(Winterwerp[2011]). 셋째는 퇴적물에 기인한 성층이다. 부유 퇴적물로 인해 발생한 성층은 수직 난류 혼합을 저해함으로써 점성 소산을 감소시킨다. 특히 세립질 퇴적물 환경에서 이런 성층의 효과가 전 수층에 걸쳐 수력학적 마찰의 감소를 야기한다. 본 연구에 사용된 ROMS에서 해저면 거칠기는 상수로 표현되므로, 수력학적 마찰에 영향을 미치는 요소는 수심과 퇴적물에 의한 성층이다(Soulsby and Wainwright[1987]).

무차원 수력학적 마찰수(Friction number, γ)는 Fig. 6에 나타났다. Normal case에서 수력학적 마찰은 수심이 가장 낮은 구역4에서 가장 높지만, 수심 감소가 완만한 구역1에서 구역3까지 수력학적 마찰은 큰 변화를 보이지 않는다. Deepening case의 경우 Normal case에 비하여 전체 구간에서 수력학적 마찰이 감소했다. 이는 수심 증가에 따른 수력학적 마찰의 감소를 의미하고, 위에서 나타난 유속의 증가를 가져왔다. 특히 Normal case에서 수력학적 마찰에 큰 변화를 보이지 않던 구역 2와 3에서는 구역 내에서 수력학적 마찰이 함께 감소하는 추세를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 구간1과

구간3에서 구간4까지 수심이 급하게 변하는 지역에서는 수력학적 마찰이 증가하는 추세를 보이며 구간2와 3의 수심 변화가 작은 지역에서는 수력학적 마찰이 감소하는 경향을 보인다. Dam case의 경우 구간1에서는 Normal case의 경향과 비슷하고, 구간2와 3에서는 Deepening case와 비슷한 경향을 보인다. 또한 댐 전면에서는 상대적으로 강한 유속에 의해 수력학적 마찰이 빠르게 감소하고 있다. 이는 유속의 변화가 Chezy 계수의 변화를 일으킴으로써 수력학적 마찰에 영향을 미치기 때문이다. 특히 구간2에서 상류 방향으로 수심이 감소함에도 불구하고 수력학적 마찰이 감소하는데, 이는 수심 외에 다른 성분, 즉 Soulsby and Wainwright[1987]의 제안과 같이 퇴적물로 인한 성층으로 인한 것으로 생각된다. 이는 추후에 추가적으로 논의되었다.

3.4 조석(Tide)

하구변형에 따른 조석 특성의 변화를 나타내기 위하여 평균 해수면과 조석의 증폭을 Fig. 7에 나타냈다. 여기에서 평균해수면은 해수면 높이를 총 30일 평균하여 산정하였으며, 조석의 증폭은 모델의 결과를 조화분석 한 후 각 조화상수 진폭의 합으로 구했다. 수심을 증가시킨 Deepening case의 경우, 평균 해수면은 약간 하강하는 반면, 전 구간에 있어 조석이 증폭되었다. 이는 수심이 증가

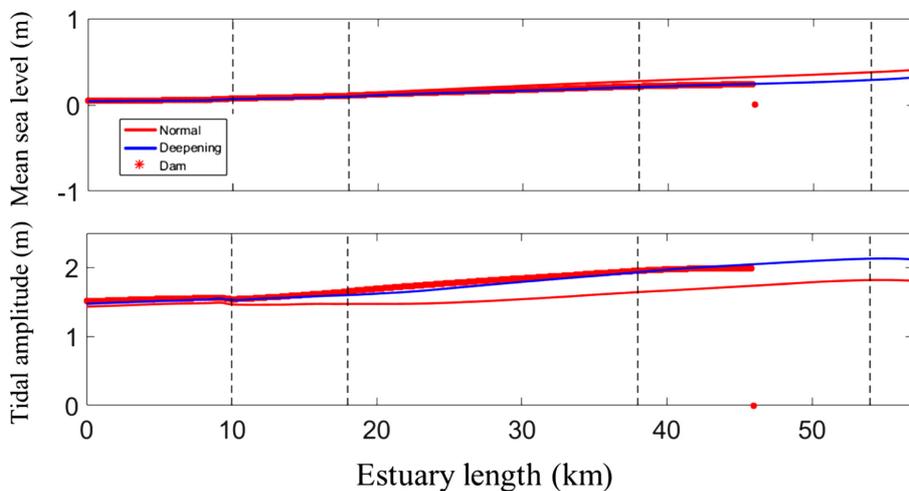


Fig. 7. Mean sea level and tidal amplitude.

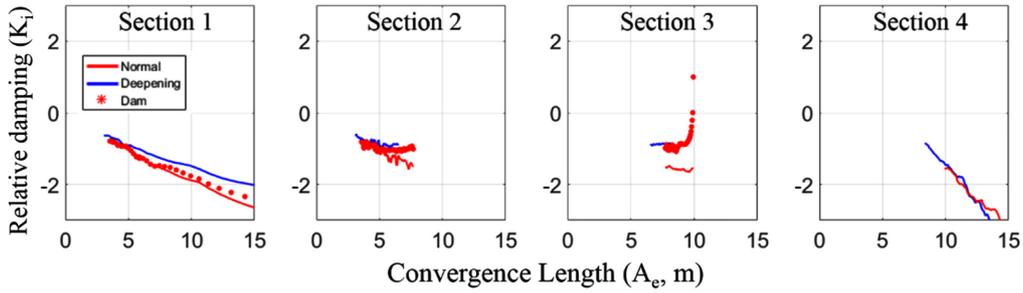


Fig. 8. Imaginary wave number for three cases (Normal case - solid red; Deepening case - solid blue; Dam case - dotted red).

함에 따라 조석파의 속도가 증가하고, 같은 시간 동안 하구로 유출입하는 해수의 양이 증가하기 때문이다. 댐이 존재하는 Dam case도 Deepening case와 마찬가지로 평균해수면은 하강하고 조석은 증폭되었다(Fig. 7).

조석 증폭과 감쇄의 물리적 특성을 파악하기 위해 Imaginary wave number(k_i)를 산정하고, Fig. 8에는 각 구간에서 수렴수에 따른 상대적 감쇄(k_i)로 나타냈다. k_i 는 조석파의 상대적 감쇄를 나타내는 값으로, 그 값이 클수록 강한 감쇄 경향을 나타낸다. Normal case의 경우, 구역 1, 2, 4에서는 수렴수가 증가할수록 감쇄가 약해지고 있지만, 구역3은 수렴수에 상관없이 비슷한 감쇄 정도를 보인다. 수심이 증가한 경우(Deepening case), Normal case에 비해 전 구간에서 k_i 가 감소해서 조석 감쇄가 감소하는 경향을 보인다. 그렇지만, 조석이 증폭되는 것을 의미하는 것은 아니다. Dam case의 경우에 구간1에서는 Normal case와 큰 변화가 없지만, 구간 2와 3으로 이동할수록 Deepening case와 비슷한 값을 갖게 되고, 하구언 전면에서는 k_i 가 양의 값을 갖게 된다. Dam case가 Normal case와 같은 수심을 갖지만 조석이 증폭하는 이유는 댐의 존재가 유출입하는 해수의 수용공간을 감소시켰기 때문이다. 즉, 댐 건설로 인해 같은 양의 해수가 유입되어도 더 이상 강 쪽으로 이동할 수 없기 때문에 수직 방향으로 물이 쌓이게 된다.

조석비대칭(λ)은 식 (6)에 제시한 창조류와 낙조류 비율을 사용해서 계산하였다. 모델 결과에서 조석을 제외한 잔차 성분을 제거하기 위하여 32시간 Lanczos 고주파 필터를 사용하였다. 식 (6)을 사용해서 얻은 조석 비대칭은 Fig. 9에 나타냈으며, λ 가 1에 가까울수록 조석은 대칭을 이루며, 1보다 큰 경우는 창조 우세, 그리고 1보다 낮은 경우는 낙조 우세를 나타낸다. Normal case의 경우 전 구간에 걸쳐 창조 우세를 보임을 알 수 있다. Deepening case 경우 구간1에서 조석 비대칭이 크게 변하지 않지만, 구간 2, 3, 4에서는 창조 우세가 조금 더 강해진다. Dam case 경우에 댐에서 먼 구간 1은 대칭성의 변화가 없지만, 구간2에서는 Deepening case보다 창조 우세가 커지는 경향을 보였으며, 구간3인 댐 전면에서는 오히려 창조 우세 정도가 감소했다. 수심 증가와 댐 건설에 따라 창조 우세가 강해지는 경향으로의 변화는 조석 증폭에 의해 기인한 것이다(Winterwerp[2011]). 하지만 댐 인근의 구역3에서는 댐에 의한 반사파가 조석에 영향을 미쳐 창조 우세가 약화된다.

3.5 하구 최대 탁도 지점의 위치

준설과 하구언 건설에 따라 하구에서 발생하는 수력학적 변화는 하천에서 유입하거나 해저면에서 부유하는 퇴적물의 이동 및 최대 탁도 지점에 변화를 가져온다. Fig. 10은 30일간 평균한 하구의 부

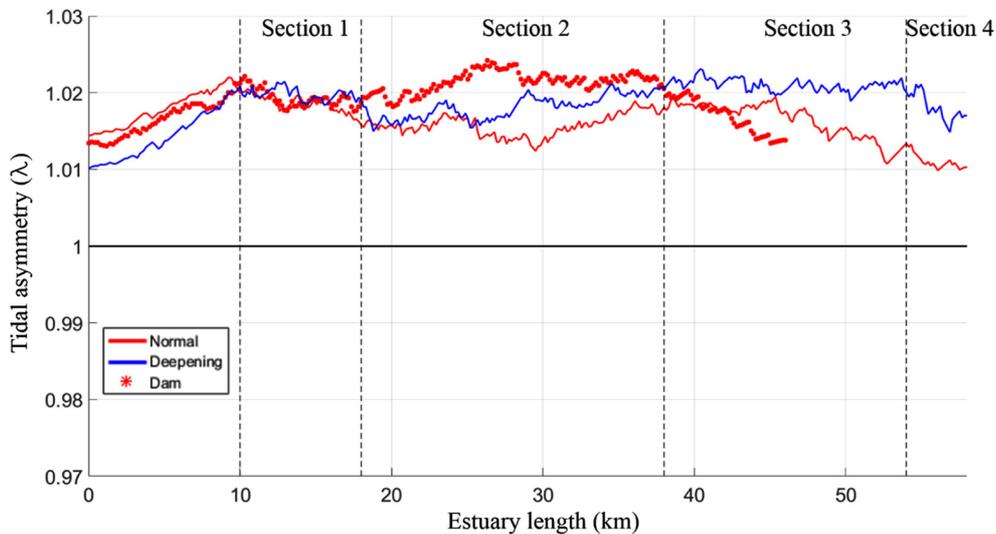


Fig. 9. Tidal asymmetry (λ) for three cases (Normal case - solid red; Deepening case - solid blue; Dam case - dotted red).

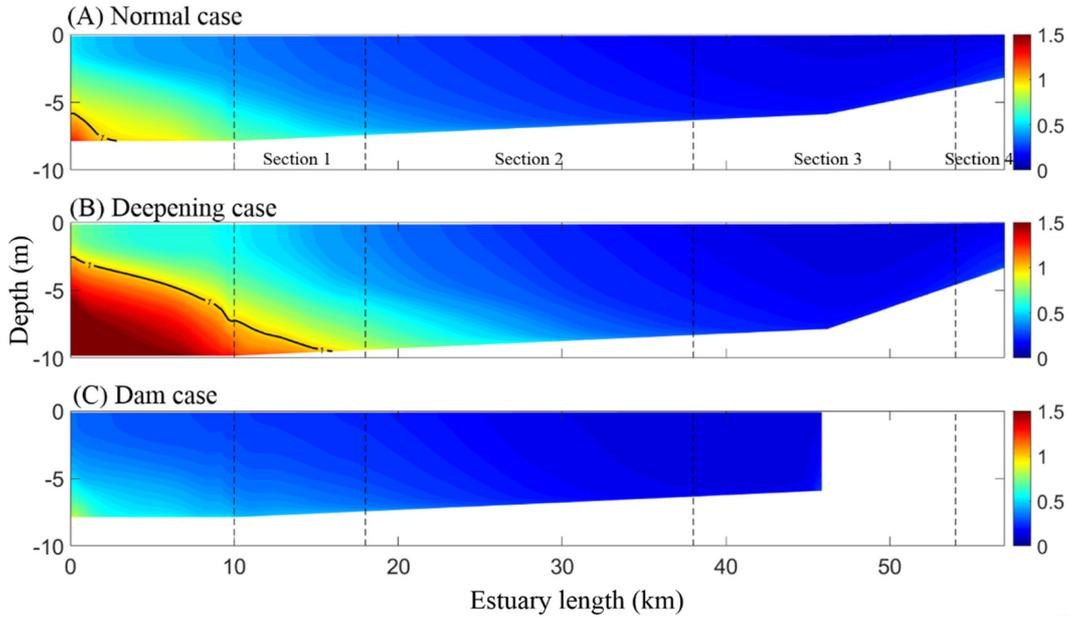


Fig. 10. Distribution of suspended sediment concentration for three cases.

유퇴적물 농도를 나타낸 것이다. 모든 모델의 결과는 하구의 입구에서 하구 최대 탁도를 보여주고 있다. 하지만 인간의 변형에 따른 수력학의 변화에 따라 그 정도와 위치가 다르게 나타났다. Normal case는 하구 최대 퇴적물 농도가 약 1.2 kg/m³를 보였으며 저층에

서 1 kg/m³ 이상의 퇴적물 농도를 보이는 구간이 하구 입구로부터 약 18 km이다. 하지만 수로 수심을 증가시킨 경우 최대 농도가 약 2배 증가한 2.03 kg/m³까지 나타났으며 1 kg/m³ 이상인 구간이 하구 입구로부터 약 16 km까지 달했다.

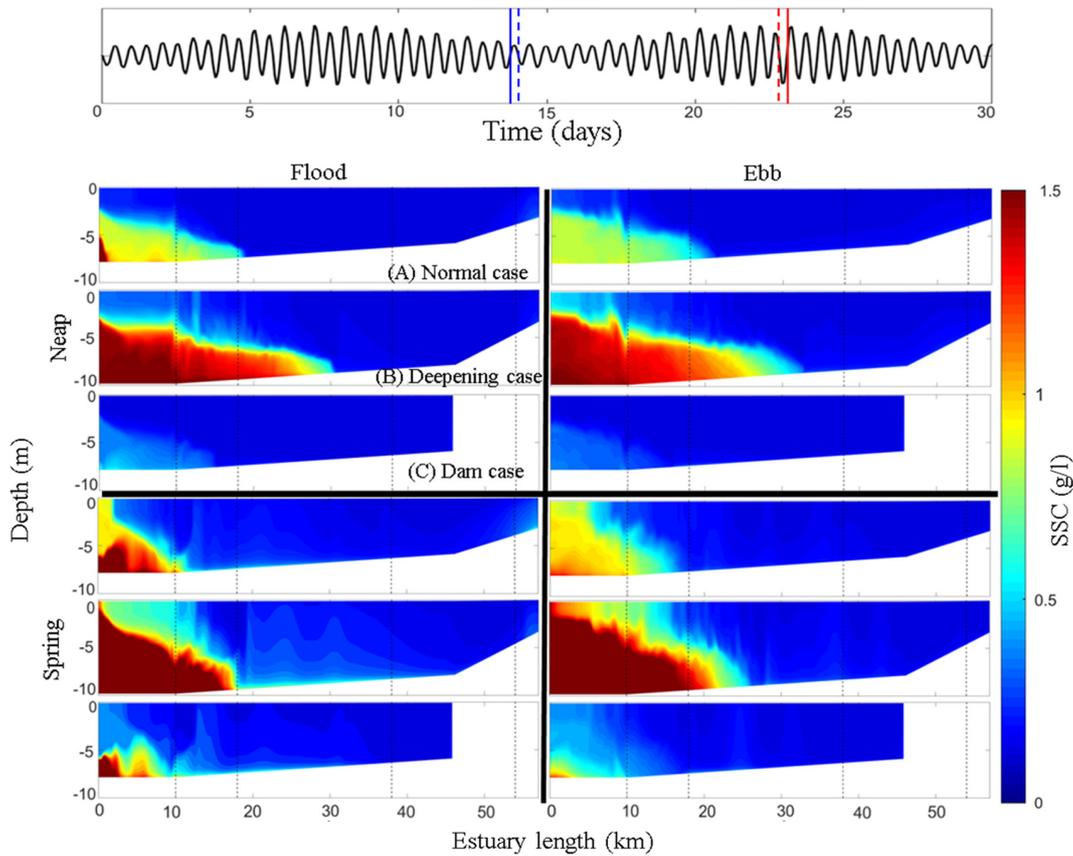


Fig. 11. Snap shot of suspended sediment concentration during flood and ebb.

평균 부유퇴적물 농도가 준설로 인해 수심이 증가하고 하구언이 존재할 경우의 퇴적물이동 특성을 보여주고 있지만, 사리와 조금, 그리고 창조와 낙조의 부유퇴적물 농도 및 표·저층의 차이를 확인하기 위하여 대조와 소조기의 창조 및 낙조시 부유퇴적물 농도를 Fig. 11에 나타냈다. 대조와 소조의 창·낙조 모두 평균 부유퇴적물 농도의 경우와 마찬가지로 하구 입구에서 높은 퇴적물 농도를 보인다. 특히 수로의 수심이 증가한 경우는 유속의 증가로 인해 Normal case에 비해 높은 퇴적물 농도를 보인다. Dam case의 경우는 약해진 유속으로 부유 퇴적물의 농도가 크게 감소했다. 특히 구간2는 소조시에 저층 퇴적물 농도가 크게 증가하여 표층과의 농도차이를 보인다. 대조기에는 하구 입구의 퇴적물 농도는 소조보다 높게 나타났다. 이는 대조기의 유속이 소조기에 비하여 강하기 때문이다. 또한 구간 2에서 소조보다 낮은 농도를 보인다. 따라서 퇴적물이 하구 입구에서 내부로 이동이 적다는 것을 알 수 있다. 창조와 낙조를 비교하면, 소조와 마찬가지로 창조 때 퇴적물 농도가 낙조보다 높게 나타난다.

4. 논 의

4.1 Adjustment of estuary according to human alteration: Deepening

많은 하구들이 대형 선박의 항행을 위해 수로를 확보하고 수로 수심의 증가를 실시하고 있다. 모델의 결과 수로의 수심 증가 이후 대부분 구간에서 수렴수가 작아졌다. 즉, 수심의 증가에 따라 수렴의 정도가 커지게 된 것이다. 수렴 정도가 변화함에 따라 조석도 변형되었다. 특히 수렴이 강하게 발생하는 구간에서는 조석의 반응이 크게 발생하였다. 또 수심의 증가는 조석과 속도를 증가시켜 하구로 출입하는 해수의 양을 증가시켰다. 이러한 작용들로 하구에서 상류로 갈수록 조석의 증폭과 상대적 유속의 증가를 야기하였으며, 이는 조석 비대칭을 강화하는 효과를 가져왔다(Winterwerp *et al.*[2013]). 하구의 바다 입구에서 조석 비대칭 변화는 크지 않았지만, 상류로 이동함에 따라 창조 우세가 강화되었다. 강화된 창조 우세는 하구의 바다 입구에서 발생하는 높은 농도의 부유 퇴적물을 하구로 유입하도록 만들고 하천에서 유입되는 퇴적물을 하구에 갇히도록 한다. 앞서 설명한 대로 표·저층의 퇴적물 농도차이로 인한 성층과 수심의 증가는 수력학적 마찰을 감소시켜서 하구 수력학 및 퇴적역학에 영향을 준다.

Deepening case에 있어서 수심 증가가 하구 전체 구간에서 수력학적 마찰이 감소하는 것을 보여주었고, 하구의 바다 입구에서 상류 말단까지 수심이 감소함에도 불구하고 수력학적 마찰이 감소하였다(구간 2과 3). 시간에 따른 부유퇴적물 농도를 보았을 때, 소조시에 해저 퇴적물의 부유가 구간 2까지 발생하였으며 이는 수층 간 큰 퇴적물 농도차이를 보였다. 대조시에는 높은 퇴적물 농도가 구간 1에서 주로 발생하였으며, 창조시에 퇴적물 일부가 구간 2로 이동하여 농도차이를 일으켰다. 따라서 수층 간 부유 퇴적물 농도차이로 기인한 성층이 수심의 감소 이외에 추가적인 수력학적 마찰의

감소에 기여하는 것을 알 수 있다. 결국 수력학적 마찰의 감소는 계속되는 조석과의 증폭에 영향을 미쳐 시간이 지속될수록 수로 수심증가의 효과가 강화되는 양의 피드백(positive feedback)을 일으킨다. 이것은 Winterwerp *et al.*[2013]이 관측자료로부터 밝혀낸 것과 일치하는 결과이다. 하지만 Winterwerp *et al.*[2013]과 달리 이 논문에서는 수층간의 부유퇴적물 농도를 보여줌으로써 수심의 증가 이후 저층 퇴적물의 농도가 증가하고 이는 대조와 소조간 구간의 차이가 발생함을 제안하였다.

4.2 Adjustment of estuary according to human alteration: Damming

하구언은 염수 침투를 억제해서 하천의 담수를 확보할 목적으로 우리나라의 많은 하구에 건설되었다. 본 연구에서는 하구언으로부터 거리에 따라 조석과 퇴적물 이동의 변형이 다르게 발생했다. 하구언이 갖는 가장 큰 영향은 해수가 유입되는 공간의 감소였다. 즉, 유입되는 해수의 공간 감소로 인해, 더 이상 강 상류로 이동을 하지 못하고 쌓이게 됨으로써 하구언 근처에서 조석을 증폭시키게 된다(Kang *et al.*[2009]). 반면에 하구언에서 거리가 먼 지역에서는 이런 현상이 비교적 작게 발생하였다. 따라서 조석의 증폭으로 인해 발생하는 비대칭 또한 하구언에서 먼 지역은 변화가 적었으며, 하구언에 가까워질수록 창조 우세가 강화되었다. 그렇지만, 하구언과 아주 인접한 지역에서는 댐에 의한 반사파가 발생함으로써 창조 우세가 오히려 약화되었다. 창조 우세에도 불구하고 감소한 유속으로 인해 전 구간에서 낮은 퇴적물의 농도를 보였다. 특징적으로는 댐 앞에서는 반사파에 의해 같은 지점에서 Normal case의 농도보다 낮게 나타나는 것이다. 이러한 특징은 하구언이 존재하는 낙동강, 영산강 및 금강에서 나타나는 유동 및 퇴적물이동의 특징과 비슷함을 알 수 있다(Kim *et al.*[2006]; Williams *et al.*[2013]; [2014]).

4.3 Suggestion for future studies

본 논문은 하구 수심증가와 하구언 건설에 따라 하구 수력학 및 퇴적역학적 변화에 중점을 두고, 변화를 가져오는 일련의 작용을 이해하였다. 그렇지만 본 연구에서 규명하지 못한 추후 연구가 필요한 부분은 다음과 같다.

1. 수로의 수심 증가로 인하여 저층 부유 퇴적물이 강 쪽으로 이동하였다. 이로 인해 수층 간 퇴적물 농도차이가 발생하였고, 이는 수력학적 마찰의 저하를 일으켰다. 결과적으로 수력학적 마찰의 감소로 인하여 퇴적물의 유입이 더욱 가속되었다. 반대로 퇴적물 유입증가로 인한 강에서의 퇴적 증가는 수심의 감소를 불러오고 수력학적 마찰을 증가시킨다. 즉 수로의 수심증가는 서로 반대되는 두 가지 효과를 일으킨다. 따라서 퇴적물 성층으로 인한 양의 피드백과 늘어난 퇴적물로 인한 수심의 감소가 일으킨 음의 피드백의 비교가 추후에 필요할 것으로 판단된다.

2. 이 연구는 댐의 건설로 인한 조석 증폭의 원인으로 수용공간의 감소를 제시하였다. 하지만 이런 수용공간 감소가 야기하는 결과를

정량적으로 밝히지 못했다. 따라서 하구 길이 및 하구언 위치가 조석 증폭에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 필요하다.

마지막으로 Diez-Minguito *et al.*[2012] 등 많은 연구자들이 하구언에서 발생하는 반사파가 조석과 퇴적물이동에 미치는 영향을 연구하였으나, 하구언 길이, 위치 등에 따라 다른 양상을 보였다. 이렇게 그 영향을 일반화하는 추가 연구가 필요하다고 본다.

5. 결 론

본 논문은 하구 준설과 하구언 건설과 같이 증가하는 인류세 인간 작용이 하구의 조석과 퇴적물이동에 미치는 영향을 이해하는데 목적이 있다. 이를 위하여 낙동강 수심과 조석에 기초한 이상적인 하구에 준설 또는 하구언 건설 시나리오를 적용한 ROMS 수치 모의를 수행하였다. 하구 변화를 비교 분석하기 위하여 수렴거리, 수렴수, 수력학적 마찰, 조석 증폭, 그리고 조석 비대칭 정도를 산정하였으며, 계산된 부유퇴적물 농도를 이용하여 하구 최대 탁도를 산정하였다.

준설로 인해 하구 수심이 증가할 경우 수렴거리가 증가하였고, 수심과 수렴의 변화로 조석이 증폭되었다. 또한 흐름의 상대적 증가를 야기하였으며, 창조 우세가 강화되어 조석 비대칭이 증가하였다. 따라서 수층으로 유입되는 퇴적물은 하구 상류에 집적되었으며, 저층에서 높은 퇴적물 농도를 나타낸다. 표·저층 간의 부유퇴적물 농도차이로 인한 성층은 수심의 증가와 함께 수력학적 마찰의 감소를 가져오고, 이는 조석 증폭을 가중시켰다. 이런 양의 피드백으로 인하여 수심 증가는 하구 최대 탁도 지점을 하구에서 강 쪽으로 이동시켰다.

하구언이 건설된 경우 하구의 변화는 하구언의 거리에 따라 다른 양상을 갖는다. 하구언에서 거리가 먼 경우, 환경 변화는 크지 않다. 그렇지만 하구언으로 가까워질수록 Deepening case와 비슷한 변화를 겪는다. 댐의 건설에 따라 조석은 증폭되고, 조석 비대칭성이 증가하였으며, 성층 강화로 인해 수력학적 마찰이 감소하였다. 하구언에 아주 인접한 지점에서는 조석 증폭이 가장 강했으나 하구언의 반사파로 인해 창조 우세가 약화되었다. 따라서 하구언 건설 전에 비해 하구언 전면에서 성층이 약화되었다. 이러한 이유로 Dam case에 있어서 부유퇴적물 농도는 재부유보다는 방류에 더 큰 영향을 받는다. 따라서 하구언 건설은 위치에 따라 조석 및 퇴적물 이동을 다르게 변화시켰다.

후 기

이 논문은 해양수산부재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(하구역 종합관리시스템 개발연구(II), 2014; 종합해양과학기지 구축 및 활용연구, 2017). 또한, 이 논문은 2017년도정부(교육부)의재원으로한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017R1D1A1B05033162).

References

- [1] De Jonge, V.N., Schuttelaars, H.M., Van Beusekom, J.E.E., Talke, S.A. and de Swart, H.E., 2014, The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 139, 46-59.
- [2] Díez-Minguito, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M.L., Ruiz, I. and Losada, A.M., 2012, Tidal wave reflection from the closure dam in the Guadalquivir estuary (SW SPAIN), *Coast. Eng.*, 1-7.
- [3] Dyer, K.R., 1973, *Estuaries: A Physical Introduction*, Wiley-interscience, New York and London.
- [4] Friedrichs, C.T., 2010, Barotropic tides in channelized estuaries, in: Valle-Levinson A., *Contemporary issues in estuarine physics*, Cambridge University Press, UK, 27-61.
- [5] Kang, J.W., Moon, S.R., Park, S.J. and Lee, K.H., 2009, Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea, *Ocean Eng.*, 36, 415-425.
- [6] Kim, T.I., Choi, B.H., Lee, S.W., 2006, Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea, *Estuarine, Coast. Shelf Sci.*, 68, 515-528.
- [7] Lanzoni, S. and Seminara, G., 1998, On tide propagation in convergent estuaries, *J. Geophys. Res.*, 103(13), 30793-30812.
- [8] Lee, K., Rho, B., Cho, H. and Lee, C., 2011, Estuarine Classification Based on the Characteristics of Geomorphological Features, Natural Habitat Distribution and Land Uses, *J. Korean Soc. Oceanography*, 16(2), 53-69.
- [9] Schuttelaars, H.M., De Jonge, V.N. and Chernetsky, A., 2013, Improving the predictive power when modelling physical effects of human interventions in estuarine systems, *Ocean Coast. Manag.*, 79, 70-82.
- [10] Scully, M.E. and Friedrichs, C.T., 2007, Sediment pumping by tidal asymmetry in a partially mixed estuary, *J. Geophys. Res.*, 27, 322-337.
- [11] Soulsby, R.L. and Wainwright, B.L.S.A., 1987, A criterion for the effect of suspended sediment on near-bottom velocity profiles, *J. Hydraulic Res.*, 25(3), 341-356.
- [12] Soulsby, R.L. and Whitehouse, R.J.S.W., 1997, Threshold of sediment motion in coastal environments, in *Proc. Pacific Coasts and Ports '97 Conf.*; volume 1, Christchurch, University of Canterbury, New Zealand, 145-150.
- [13] Toffolon, M. and Savenije, H.H.G., 2011, Revisiting linearized one-dimensional tidal propagation, *J. Geophys. Res.*, 116, C07007.
- [14] Van Maren, S.D., Van Kessel, T., Cronin, K. and Sittoni, L., 2015, The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration, *Continental Shelf Res.*, 95, 1-14.
- [15] Van Rijn, L.C., 1984, *Sediment Transport, Part 1: Bed load Transport*, *J. Hydraulic Eng.*, 110, 1431-1456.
- [16] Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C.K. and

- Arango, H.G., 2008, Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *Comput. & Geosci.*, 34, 1284-1306.
- [17] Williams, J., Dellapenna, T., and Lee, G., 2013, Shift in depositional environments as a natural response to anthropogenic alterations: Nakdong estuary, South Korea, *Mar. Geology*, 343, 47-61.
- [18] Williams, J., Dellapenna, T., Lee, G., and Louchouart, P., 2014, Sedimentary Impacts of Anthropogenic Alterations on the Yeosan Estuary, South Korea, *Mar. Geology*, 357, 256-271.
- [19] Williams, J., Lee, G., Shin, H., and Dellapenna, T., 2015, Mechanism for sediment convergence in the anthropogenically altered microtidal Nakdong Estuary, South Korea, *Mar. Geology*, 369, 79-90.
- [20] Winterwerp, J.C., 2011, Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening, *Ocean Dyn.*, 61, 203-215.
- [21] Winterwerp, J.C. and Wang Z.B., 2013, Man-induced regime shifts in small estuaries-I: theory, *Ocean Dyn.*, 63, 1279-1292.
- [22] Winterwerp, J.C., Wang, Z.B., Van Braeckel, A., Van Holland, G. and Kusters, F., 2013, Man-induced regime shifts in small estuaries-II: a comparison of rivers, *Ocean Dyn.*, 63, 1293-1306.
- [23] Wu, H. and Zhu, J., 2010, Advection scheme with 3rd high-order spatial interpolation at the middle temporal level and its application to saltwater intrusion in the Changjiang Estuary, *Ocean Modeling*, 33, 33-51.

Received 15 October 2018

Revised 30 October 2018

Accepted 13 November 2018