

## 천해조 및 조간대가 발달된 하구에서의 부유사 이동 특성 Suspended Sediment Transport Characteristics in the Estuary with Significant Shallow Water Tides and Tidal Flat

강주환\* · 문승록\* · 안성모\*\*

Ju Whan Kang\*, Seung Rok Moon\* and Sung Mo Ahn\*\*

**요 旨** : 천해조가 발달된 하구에서의 소류사 이동 특성에 관한 선행연구에 이어 본 논문에서는 전과 동일한 하구 부유사 이동 특성을 규명하였다. 소류사 이동에 비해 다소 복잡한 양태로 발생하는 부유사 이동에 관한 수치 실험을 통해 turbidity maximum 형성과 변이에 관련된 기존 연구결과를 재확인할 수 있었으며, 천해조를 하류경계 조건에 포함시키는 것이 소류사의 경우와 마찬가지로 매우 중요함을 확인할 수 있었다. 또한 금강하구와 영산강하구에서의 소류사 및 부유사 이동특성의 차이점 뿐 아니라 낙조우세와 고조우세의 차이점도 규명할 수 있었다. 특히, 영산강하구의 경우 조간대 발달로 인해 낙조우세가 심화됨에 따라 소류사와 부유사가 서로 반대 방향으로 이동함에 의해 현재와 같이 조간대가 유지되고 있음을 규명하였다.

**핵심용어** : 부유사, 천해조, 조석왜곡, 조간대

**Abstract** □ The characteristics of suspended sediment transport are analyzed at the estuaries which show significant shallow water tides, following the previous research for bottom sediment transport at the same estuaries. Several theories which are related with the formation and transition of turbidity maximum are reconfirmed by the numerical experiments. The experiments suggest the necessity of modeling the shallow water tide as a boundary condition, as was also suggested for the bed sediment transport at the previous research. Both the differences of transport characteristics between bed and suspended sediment and the differences between flood/ebb dominances and high/low water dominances are also examined at the Keum River and Youngsan River estuaries. In addition, the transport of bed and suspended sediments are found to have the opposite directions at the Youngsan River estuary which has extensive tidal flat, and thus shows pronounced ebb dominance, which is considered to be a main reason of keeping present bathymetry.

**Keywords** : suspended sediment, shallow water tide, tidal distortion, tidal flat

### 1. 서 론

천해조와 조간대가 발달되어 있는 하구에서의 소류사 이동 특성을 규명한 선행연구(강 등, 2002)에 이어 본 논문에서는 해당하구에서의 부유사 이동 특성을 규명하였다. 한계소류력을 야기시키는 유속보다 큰 유속이 발생할 경우 즉각적인 유사의 이동을 유발하는 소류사 이동에 비해 부유사 이동은 좀 더 복잡한 거동을 보인다. 즉, 조석과

갖고 있는 에너지가 상류로 갈수록 점차 감소되어 조차(tidal range) 역시 감소됨과 더불어 침식지체(scour lag) 또는 침전지체(settling lag)(Dyer, 1988)에 따라 상류방향으로의 부유사 이동이 초래된다(Kreeke, 1996)는 것 등이 그 예이다. 또한 조간대가 발달된 하구에서는 낙조우세화 되는 경향(Speer and Aubrey, 1985)에 의해 하류방향의 소류사 이동이 야기되는 것과는 달리, 연속되는 두 번의 정조시 부유사 침강량의 차이가 발생함에 기인하여 부유

\*목포대학교 건축조경토목공학부(Corresponding author : Ju Whan Kang, Division of Architectural Engineering, Landscape Architecture and Civil Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea. jwkang@mokpo.ac.kr)

\*\*삼성물산(주) 건설부문 토목영업전직팀(Civil Design Part, Civil Department, SAMSUNG Corporation)

사의 이동양상은 소류사 이동과는 사뭇 다른 거동을 보이게 된다. 천해조가 발달된 하구에서의 부유사 이동 양상 역시 소류사의 거동과는 뚜렷이 구분되는 특성을 갖고 있는데, 소류사 이동이 창낙조 비대칭에 매우 민감한 반면, 부유사의 경우에는 고저조 비대칭에 매우 민감한 반응을 보이게 된다.

이와 같이 부유사 이동양상은 소류사에 비해 좀더 복잡한 거동을 보이고 있으며, 천해조가 발달된 하구에서는 한층 더 복잡한 양상을 띠게 된다. 이전 연구(강·문, 2001)에서도 지적했듯이 우리 나라 서해안은 황해 전반적인 조석특성 및 해당하구의 지역적인 특성에 의해 천해조가 매우 발달되어 있다(Kang and Jun, 2002). 특히 금강하구와 영산강하구는 천해조와 관련되어 서로 극명하게 대비되는 특성을 내재하고 있어 소류사 거동에 있어서도 뚜렷이 구분되는 양상을 보이고 있다(강 등, 2002). 이러한 특성적 차이는 부유사 거동에 있어서도 적지 않은 영향을 미치게 되는 바, 국내 기존 연구(강 등, 1987; 이·최, 1999)에서는 무시되어 온 천해조 및 조간대의 역할을 본 연구에서 새로이 조망하고자 한다.

본 논문에서도 이전연구(강·문, 2001; 강 등, 2002)에서와 동일한 금강하구와 영산강하구 모형에 대하여 부유사 거동과 관련된 일반적인 특성을 파악한 후, 천해조 경계조건 및 조간대가 부유사 거동에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였다.

## 2. 일반적 특성

### 2.1 조석주기에 따른 특성

Turbidity maximum이란 하구입구 부근의 탁도가 가장 높은 해역을 지칭하는 것으로서, 조석주기 또는 대소조 주기에 따라 그 위치와 강도가 변하며 하천유량의 영향도 크게 받는 등 하구에서의 순환과 유사이동 특성과 밀접한 관계가 있다. Turbidity maximum은 정조 시기에는 침전에 의해 점차 약화되는 특성이 있으므로 조석이 강한 하구에서는 주로 조석에 의해, 조석이 약한 하구에서는 주로 하천유량에 의해 유지된다(Allen *et al.*, 1980; Brenon and Hir, 1999). 하천유량에 비해 조석이 크게 작용하는 하구의 경우, turbidity maximum의 상류측 끝부분에서의 최대농도는 창조직후의 정조시에 발생하게 되고 하류단에서는 낙조직후의 정조시에 발생하게 되는 등 조석주기와 밀접한 관계가 있는 turbidity maximum의 상하류 이동 및 크기의 변화에 따라 부유사의 이동이 발생하게 된다. 조

석왜곡이 없는 경우에도 상류로 갈수록 조석과의 진폭이 작아지는 경우, turbidity maximum은 주기적인 변화를 하지만 침식지체(scour lag)와 침전지체(settling lag)(Dyer, 1988)에 따라 부유사는 점차 상류방향으로, 유속이 충분히 작아 다시는 부유되지 않는 지점까지 이동하게 된다. 이에 따라 일반적인 감조하천에서는 상류로 갈수록 세립의 저질상태를 보이게 된다.

조석왜곡이 발생하여 창조우세를 보이는 하구에서는, 창조시에 낙조시보다 저면 마찰력이 증대됨에 따라 소류사의 이동 뿐 아니라 더 많은 유사가 부유되어 turbidity maximum을 발달시켜 탁도가 높아지게 된 상태에서, 창조 직후의 정조시에 더 많은 침전이 야기되므로 역시 상류방향의 부유사 이동 양상을 유발하게 된다. 물론 낙조우세의 경우에는 반대되는 현상이 발생하게 된다.

이와 같이 조석이 우세한 하구에서는 한 조석주기 동안에도 부유사의 순수한 이동이 야기될 수 있는데, 이러한 부유사의 순수한 이동은 대소조 주기 동안에도 발생할 수 있다. 대조시에 하구의 하류에서는 고조위가 상승하고 저조위는 고조위의 상승만큼 하강하지만, 상류에서는 저조위가 고조위의 상승만큼 하강하지는 않게 된다. 따라서 상류쪽으로 갈수록 잔차조량(residual tidal volume)이 증가하게 되는데, 특히 조간대에서의 저류효과가 더욱 커지게 된다. 이에 따라 2주 주기의 잔차류가 발생되며 2주 주기의 부유사이동을 초래하게 된다. 이는 대소조 차이가 크고 조간대가 발달된 하구에서 특히 심하게 나타난다. 또한 일반 하구에서는 대조에서 소조로 진행되는 동안 최강유속이 감소하는 반면 정조 기간이 증가하게 되어 침식보다 퇴적이 증대된다. 반대로 소조에서 대조로 진행되는 동안에는 다짐(compaction)으로 인해 퇴적된 만큼 침식되지 못하므로 2주 주기로 얇은 층이 누적되게 된다(Allen *et al.*, 1980).

### 2.2 조석비대칭에 따른 특성

천해조가 그 모체가 되는 천문조와 함께 작용할 경우 조석왜곡이 발생하게 되는데, 그 양상은 양 조석의 상대지각에 따라 결정된다. 즉, 식 (1)과 같이 정의되는  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 수면변위  $\eta_2$ 와  $\eta_4$ 는 양 분조가 함께 작용할 경우 상대지각  $\psi (=2\psi \phi_2 - \phi_4)$  값에 따라 조석왜곡의 형태가 달라지게 된다.

$$\eta_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t - \phi_2) \quad (1a)$$

$$\eta_4(t) = A_4 \cos(\omega_4 t - \phi_4) \quad (1b)$$

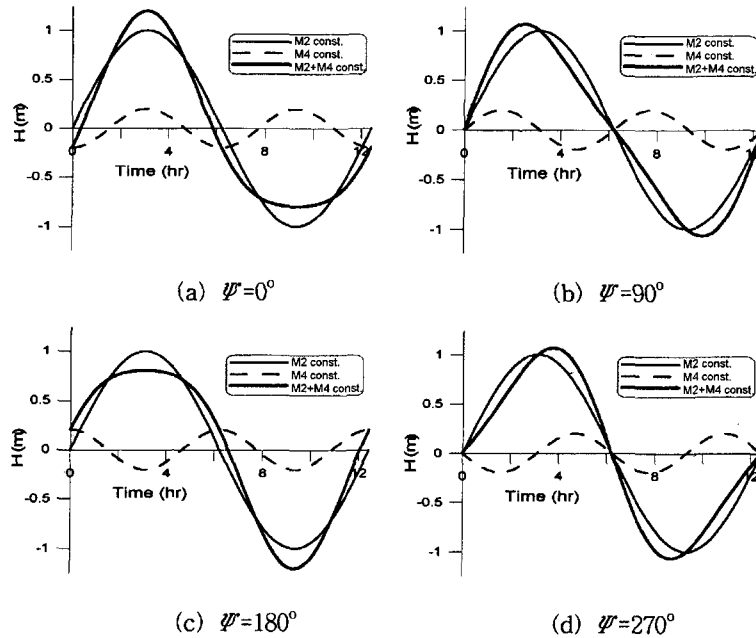


Fig. 1. Tidal distortions corresponding to the relative phases.

여기서  $A_2$ 와  $A_4$ 는 각각  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 진폭이고  $\varphi_2$ 와  $\varphi_4$ 는 각각 양 분조의 위상이다.  $A_2=1.0$   $A_4=0.2$  인 예를 보면 Fig. 1에 도시한 바와 같이 (a)  $\psi=0^\circ$ , (b)  $\psi=90^\circ$ , (c)  $\psi=180^\circ$ , (d)  $\psi=270^\circ$  등 크게 4가지 경우로 조석왜곡의 형태를 구분할 수 있다. Fig. 1(b)의 경우 창조시간이 짧고 낙조시간이 길어 낙조시 최대조류속도에 비해 창조시 최대조류속도가 더 큰 경우를 창조우세라 하고, 이와 반대인 Fig. 1(d)의 경우를 낙조우세라 한다. 조석비대칭에는 이렇게 창조시간과 낙조시간의 차이에 기인하여 창조우세와 낙조우세로 구분되는 비대칭이 있는 반면, Fig. 1(a)와 Fig. 1(c)와 같이 고조시간과 저조시간의 차이에 의한 비대칭이 있다. 전자는 주로 소류사 이동에, 후자는 주로 부유사 이동에 크게 영향을 미치게 된다(Eisma *et al.*, 1998).

창낙조시간 비대칭은 일반적으로 하구입구로부터 상류 방향으로 갈수록 천해조의 발달에 기인하여 조석왜곡 양상이 점차적으로 더욱 심화된다. 따라서 금강하구의 경우 창조우세가, 영산강하구의 경우 낙조우세가 상류방향으로 심하게 나타나며(강·문, 2001), 이에 따라 소류사 이동 양상도 금강하구에서는 상류방향, 영산강하구에서는 하류 방향을 향하는 경향을 보이게 된다(강 등, 2002).

고저조시간 비대칭 역시 천해조 발달에 의해 야기되는

것으로서, 상대지각이 0도와 180도에 가까우면 Fig. 1(a) 및 (c)에 보인 바와 같이 각각 저조시간과 고조시간이 길어지는 비대칭이 야기된다. 정조시 부유사의 퇴적량이 증대됨을 감안하면, 고조시간이 긴 경우에는 고조동안 부유사의 침강에 이어 낙조가 발생하기 때문에 유사는 상류 방향으로 이동하게 되고, 저조시간이 긴 경우에는 침강에 이어 창조가 발생하므로 하류 방향으로 이동하게 된다.

### 2.3 조간대가 발달된 하구의 특성

조간대가 발달된 하구는 일반적으로 낙조우세화 되는 경향이 있다고 알려져 있으며(Speer and Aubrey, 1985), 이러한 하구는 고조시에는 조간대상의 얇은 수심때문에 평균수심이 저조시의 평균수심보다 낮으므로 같은 정조라도 저조보다 고조일 때 유사의 침강량이 많아진다. 따라서 조간대가 발달된 낙조우세인 하구에서는 고조동안 평균수심이 더 얇기 때문에 침강되는 유사의 상당량이 조간대상에 침전되므로 부유되는 유사가 많지 않아 부유사의 농도가 낮게 된다(Eisma *et al.*, 1998). 따라서 이러한 하구에서의 부유사는 저조후에 상류쪽으로 이동되는 양보다 고조후에 낙조시 하류방향 이동량이 적어지므로 소류사는 하류방향, 부유사는 상류방향으로 이동하는 경향을 갖게 된다.

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 HD 모듈

본 연구에서도 소류사 이동 특성을 규명한 선행연구(강 등, 2002)와 동일하게 MIKE21 모형을 적용하여 수치실험을 시행하였다. MIKE21 모형은 덴마크의 DHI사가 개발한 프로그램으로서 전문가는 물론 비숙련자도 쉽게 사용할 수 있도록 메뉴의 운용이 쉽고 입출력 뿐만 아니라 실행환경 설정 및 실행 자체를 대화식으로 할 수 있게 되어 있다. 또한 대상영역 설정 및 모의결과의 분석을 단순화하여 효율적으로 운용할 수 있으며 각종 자료에 대한 시각화가 용이하다. 그리고 확장 가능한 단위 소프트웨어로 구성되어 있어 필요에 따라 원하는 모듈을 통해 여러 가지 분석을 할 수 있다. MIKE21은 수리학적 문제와 관련된 광범위한 분야에 적용할 수 있어, 환경수리학, 해안수리학, 해안 및 하구에서의 유사이동 및 파동분야 등이 주요 적용분야로서 총 13가지 계산모듈로 구성되어 있다. 본 연구에서는 이 중 HD(hydrodynamic) 모듈을 이용하여 흐름 계산을 한 후 MT(mud transport) 모듈로써 부유사 이동에 관한 계산을 실시하였다.

HD 모듈은 하구, 만 및 연안해역에서의 흐름 모의에 대한 일반적인 수치모델링 시스템으로서, 연직방향으로는 균질하다는 가정하에 2차원 비정상류를 모의하기 위한 것이다. 이는 2차원 천수방정식을 2차항 정밀도를 가진 ADI 유한차분법을 이용하여 계산함으로써 해수유동 현상을 재현하게 되며 조건대 모의도 가능한 모듈이다. 물론 소류사 이동보다 훨씬 복잡한 거동을 보이는 부유사 이동의 정확한 해석을 위해서는 Brenon and Hir(1999)와 Lee et al.(2001)이 지적한 바와 같이 연직방향의 부유사 거동 해석이 가능한 3차원 모형이 필요할 것이다. 그러나 천해조가 발달된 하구에서 천해조가 부유사 거동에 미치는 영향성에 초점을 맞춘 본 연구의 특성상 2차원 해석으로도 제한적이나마 소기의 목적을 이루는데는 큰 문제가 없을 것이다.

본 연구에서도 선행연구(강 등, 2002)와 동일하게 영산강하구와 금강하구를 택하여 표준모형으로 선정하였는데, 표준모형에서는 실제 감소하천의 선형과 길이방향 각 단면의 정확한 폭과 수심은 고려하지 않고, 단지 감소구간 길이와 폭 및 수심의 선형적 변화만을 감안하였다. 표준모형으로 선정된 영산강과 금강모형의 개략적인 제원은 Table 1에 제시한 바와 같다. 격자간격은 흐름방향(x방향) 200 m, 폭방향(y방향) 100 m로, 시간간격은 20초를 각각 선정하였다. 또한 금강하구와 영산강하구 입구에 각각

Table 1. Physical properties of Keum River estuary and Youngsan River estuary

		Keum River	Youngsan River
Mouth	Width B(m)	1800	1300
	Depth h(m)	8	24
Head	Width B'(m)	500	300
	Depth h'(m)	1	2
Length L(km)		60	62
Slope [(h-h')/L]		0.00012	0.00035
Convergence [(B-B')/2L]		0.0108	0.0081

2.0 m와 1.5 m의 가상적인  $M_2$  분조(필요시 0.2 m와 0.1 m의  $M_4$  분조)를 경계조건으로 부여하였으며 이전 연구에서 수차례의 시행착오를 통해 결정된 Manning의 n값 0.028을 그대로 사용하였고 파랑 및 바람에 의한 영향은 고려하지 않았다. 이렇게 설정된 금강하구와 영산강하구에 대한 표준모형의 수치실험 결과는 MT 모듈의 계산에 활용된다.

#### 3.2 MT 모듈

부유사의 이동은 MT모듈 중 multi-fraction 또는 multi-layer 모듈로써 모의할 수 있는데, multi-fraction 모듈은 일정한 침강속도의 퇴적과 이송에 의해 일어나는 하상의 침식이 모델링되고 multi-layer 모듈은 응집을 포함한 변화하는 침강속도와 불균일한 하상의 침식, 압밀 등이 포함되어 있다.

HD 모듈에서 유속장이 계산된 후 MT layer모듈에서는 다음 식 (2)와 같은 이송확산방정식을 풀게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[ h D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left[ h D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{h} \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 수심평균 농도( $g/m^3$ ),  $V_x$ ,  $V_y$ 는 수심평균 유속(m/s),  $D_x$ ,  $D_y$ 는 확산계수( $m^2/s$ ),  $h$ 는 수심(m),  $S_i$ 는  $i$ 점에서의 유입/유출항( $g/m^2/s$ )이다.

MT layer 모듈은 점착성 토사와 주변흐름과의 상호작용을 통계학적으로 처리한 모델로서 Krone(1962)에 의해 제시된 퇴적률(Deposition)은 다음 식 (3)과 같이 산정된다.

$$S_D = W_s C_b P_d \quad (3)$$

여기서,  $W_s$ 는 침강속도(m/s),  $C_b$ 는 하상농도( $g/m^3$ )이고  $P_d$ 는 퇴적의 확률로 다음식 (4)와 같이 산정된다.

$$P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}, \tau_b \leq \tau_{cd} \quad (4)$$

여기서,  $\tau_b$ 는 하상 전단응력(N/m<sup>2</sup>),  $\tau_{cd}$ 는 퇴적에 대한 한계전단응력(N/m<sup>2</sup>)이다.

침착성토사의 침강속도는 floc 크기, 온도, 입자농도, 유기물 함유율 등에 따라 좌우되는데, Krone(1962)에 따른 염도를 고려한 침강속도는 다음 식과 같다.

$$W_s = k_1 C^{\gamma_1} \left[ 1 + (C^{\beta_1} - 1) \min\left(\frac{s}{s_{min_1}}\right) \right], 0 \leq C \leq 0.3 \text{ kg/m}^3 \quad (5a)$$

$$W_s = k_2 C^{\gamma_2} \left[ 1 + (C^{\beta_2} - 1) \min\left(\frac{s}{s_{min_2}}\right) \right], 0.3 < C \leq 10 \text{ kg/m}^3 \quad (5b)$$

여기서  $k_{1,2}$ ,  $\beta_{1,2}$ ,  $\gamma_{1,2}$ 는 상수,  $s$ 는 염도,  $s_{min_{1,2}}$ 는 염분 응집의 한계치이다.

침식은 Mehta *et al.*(1989)의 식을 이용하는데, 하상이 조밀하고 압밀되어 있는가(dense and consolidated), 또는 느슨하고 부분 압밀되어 있는가(soft and partly consolidated)에 따라 달리 모의된다. 조밀하고 압밀된 하상에서는 식 (6a)가 적용되고, 느슨하고 부분 압밀된 하상에서는 식 (6b)가 적용된다.

$$S_E = E(1 - \tau_b / \tau_{ce})^m, \tau_b > \tau_{ce} \quad (6a)$$

$$S_E = E \exp[\alpha(\tau_b - \tau_{ce})^{1/2}], \tau_b > \tau_{ce} \quad (6b)$$

여기서,  $E$ 는 하상의 침식계수(g/m<sup>2</sup>/s),  $\tau_{ce}$ 는 침식에 대한 한계전단력(N/m<sup>2</sup>),  $m$ 은 침식의 멱승,  $\alpha$ 는 계수(m/N<sup>1/2</sup>)이다.

순수 조류만에 의한 바닥 전단응력은 다음 식 (7)과 같이 Fredsoe(1981)의 제안식이 적용되었다.

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_c V^2 \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $V$ 는 평균조류속(m/s),  $f_c$ 는 조류마찰계수로 다음 식과 같다.

$$f_c = 2 \left[ 2.5 \left( \ln\left(\frac{30h}{k}\right) - 1 \right) \right]^2 \quad (8)$$

여기서,  $k$ 는 하상조도(m)이다.

이상과 같은 매개변수 산정을 위하여 금강과 영산강 하상토의 입도분포와 유사특성 등을 감안하여 MT모들의 입력자료를 Table 2와 같이 선정하였다.

#### 4. 국내하구에서의 특성

##### 4.1 표준모형

3장에서 언급된 금강하구와 영산강하구의 표준모형에

**Table 2.** Input data for MT module

		Keum River	Youngsan River
Simulation period		30 days ( $\Delta t=20$ sec)	
Initial condition(g/m <sup>3</sup> )		15	10
No. of Layer		1	
Thickness Layer(mm)		100	
Boundary cond.(g/m <sup>3</sup> )	Head	5	5
	Mouth	30	10
Dispersion coeff.(m <sup>2</sup> /s)		5~50	
$\tau_{cd}$ (N/m <sup>2</sup> )		0.1	0.08
$\tau_{ce}$ (N/m <sup>2</sup> )		0.8	0.5

Table 2의 입력자료를 사용한 결과 양 표준모형 모두에서 turbidity maximum의 형성 및 변이 양상이 잘 나타나고 있다. 즉, Fig. 2에 제시된 영산강하구의 표준모형을 예로 들면, 창조기에 상류로 이동하여 고조시에 최상류에 도달한 turbidity maximum은 낙조시에는 하류로 이동하여 저조시에 최하류에 도달하게 되며, 정조시에는 유속이 매우 작으므로 다량의 부유사가 침전되므로 농도가 낮아지고 있음을 보이고 있다. 또한, 낙조우세인 영산강에서는 낙조시에 더 빠른 유속에 의해 더 많은 유사가 부유되므로 낙조시 부유사 농도가 창조시보다 높게, 그리고 낙조후 정조시 농도가 창조후 정조시 농도보다 높게 나타나고 있다.

서론에서 언급했듯이 감소하천 상류로 갈수록 조석파의 진폭 감소가 두드러진 하구에서는 ‘tidal pumping’ 현상(Dyer, 1988)에 의해 상류방향의 부유사 이동이 발생하게 되는데, 금강 표준모형이 여기에 해당된다. 한 주기 동안 발생한 부유사의 단위단면적당 이동량을 상류방향을 양의 값으로 하여 Fig. 3에 나타내었는데, 수심이 비교적 깊어 조석파의 감쇠가 심하지 않은 하류부를 제외하고는 상류방향의 부유사 이동을 확인할 수 있다. 그러나 금강에 비해 수심이 깊어 낙조우세적 경향을 보이는 영산강 표준모형의 결과인 Fig. 4를 보면 전반적으로 하류방향의 이동이 발생하고 있어 금강 표준모형과는 대조를 이루고 있다. 즉, 창조우세인 금강의 경우, ‘tidal pumping’ 효과와 함께, 창조시에 더 많은 유사가 부유되므로 상류방향의 부유사 이동이 발생하게 되고 낙조우세인 영산강은 반대의 경향을 보이게 된다.

##### 4.2 조간대/천해조 효과

2장에서 언급한 바와 같이 천해조가 발달된 해역에서 조석왜곡현상이 부유사 이동에 미치는 영향은 매우 크다고 알려져 있다. 먼저 창조우세와 낙조우세에 의한 영향

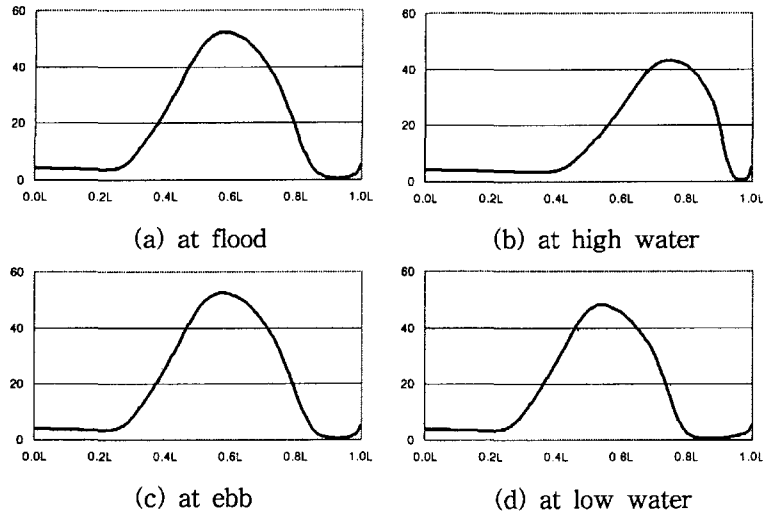


Fig. 2. Transitions of turbidity maximum at the Youngsan River estuary.

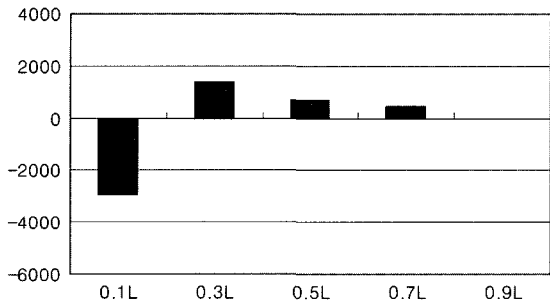


Fig. 3. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Keum River estuary).

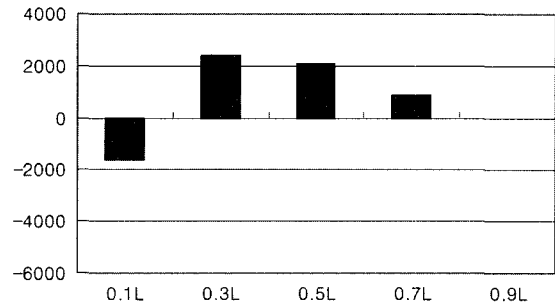


Fig. 5. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Keum River estuary; shallow water B.C.).

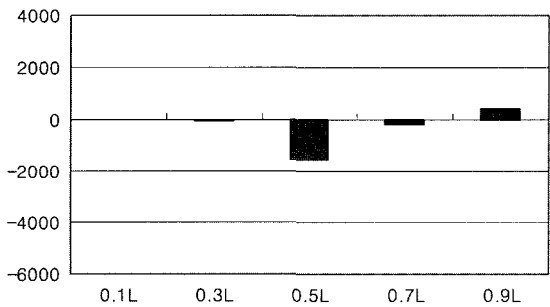


Fig. 4. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Youngsan River estuary).

성을 파악하기 위하여 소류사에 관한 이전 연구(강 등, 2002)에서 처럼 하류 경계조건에 천해조를 실제값과 부합하게 포함시켰다. 즉, 금강 표준모형에 천해조가 부가되어 창조우세가 더욱 심화되는 경우의 부유사 이동양상을 파악하였는데, Fig. 5에 보인 바와 같이 Fig. 3의 표준모

형에 비해 상류방향 부유사 이동이 더욱 심화되고 있다.

또한 고저조 비대칭이 부유사 이동에 미치는 효과를 파악하기 위하여 금강모형과 영산강모형에서 경계조건으로 부여되는 M<sub>4</sub>분조의 위상을 조정하여 가상적으로 고저조 비대칭이 발생하도록 한 후 수치실험을 실시하였다. 그 결과 Fig. 6의 금강 저조시간우세의 경우와 Fig. 7의 영산강 고조시간우세와 같이 고저조 비대칭이 부유사 이동에 미치는 영향은 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 6을 Fig. 3과 비교해 보면 금강에서 부유사의 상류방향 이동양상이 적지 않게 둔화되었음을 알 수 있는 반면, Fig. 7를 Fig. 4와 비교해 보면 영산강에서 부유사의 하류방향 이동양상이 소멸되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이, 소류사 이동에서는 창낙조우세만이 매우 중요한 요소였던(강 등, 2002) 반면, 부유사 이동에서는 고저조우세도 매우 중요한 요소가 된다.

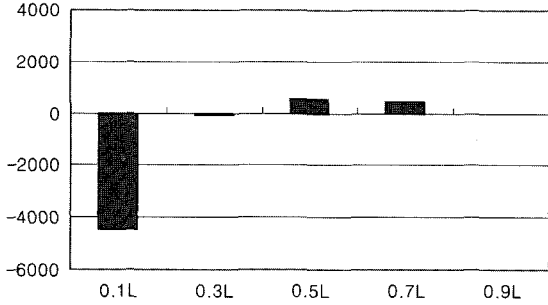


Fig. 6. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Keum River estuary; low tide dominance).

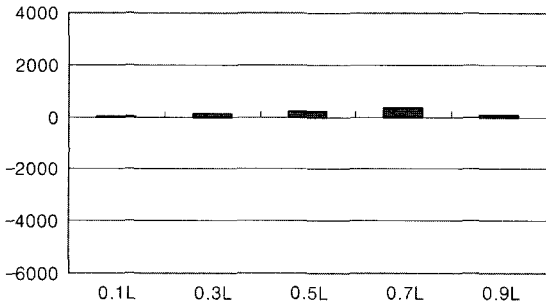


Fig. 7. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Youngsan River estuary; high tide dominance).

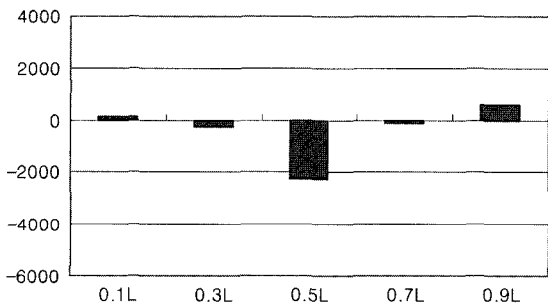


Fig. 8. Suspended sediment flux(g/m<sup>2</sup>)(Youngsan River estuary with tidal flat).

한편, 영산강모형에서 조간대가 부유사 이동에 미치는 영향을 분석한 결과, Fig. 8에서와 같이 낙조우세가 더욱 심화됨에 따라(강 등, 2002) Fig. 4에 비해 하류방향 이동량이 다소 증가함을 볼 수 있다. 그러나 이를 중류부에서 단면별 이동량으로 구분한 결과인 Fig. 9를 보면, 조간대가 발달하게 되면 낙조우세가 심화되므로 수로 중앙에서는 하류방향의 이동이 더욱 늘어나게 되는 반면, 고조시에 조간대 상에 침전된 부유사가 저조시에 비해 많기 때문에 조간대 상에서는 상류방향의 이동이 발생하는

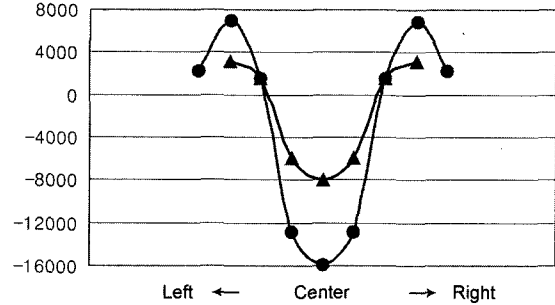


Fig. 9. Cross-sectional fluxes(g/m<sup>2</sup>)(Youngs River estuary) -▲- : No tidal flat, -●-: Tidal flat.

것으로 파악된다. 따라서 조간대가 부유사 이동에 미치는 영향은 전체적으로는 하류방향이지만, 조간대상에서는 상류방향인 것이다.

### 5. 결 론

이와 같은 수치실험을 통해 천해조를 하류경계조건에 포함시키는 것이 소류사의 경우와 마찬가지로 매우 중요함을 확인할 수 있었고, 양 하구에서의 소류사 및 부유사 이동 특성의 차이점 뿐 아니라 창조우세와 고저조우세의 차이점도 규명할 수 있었다. 또한 영산강하구의 경우 조간대의 발달로 인해 낙조우세가 심화됨에 따라 중앙수로에서는 소류사와 부유사의 하류방향 이동양상이 더욱 가속화되는 반면 조간대상에서의 부유사 이동은 상류방향으로 형성된다. 이에 따라 수로 중심에선 세굴되는 반면 조간대 상에서는 부유사가 퇴적되므로 조간대 자체의 형상이 유지되는 것으로 파악된다.

여기에 부연하여 이전 연구결과(강, 2000; 강·문, 2001; 강 등, 2002)를 모두 포함하는 종합적인 주요 결론은 다음과 같다. 첫째, Kelvin wave와 Poincare wave로 묘사되는 황해 전반적인 조류특성과 서남해안의 지형적 특성에 의해 야기된 금강에서의 창조우세와 영산강에서의 낙조우세는, 하류부에서의 그 크기는 미약하지만, 하구 상류로 갈수록 매우 심화되어 감소하천 상류에서는 심한 창조우세와 낙조우세를 보이게 된다. 이러한 조석왜곡현상 자체와 이에 따른 소류사 및 부유사 이동양상은 하구 하류부 경계조건에 천해조를 포함시켜야 정확한 해석이 가능하게 된다. 둘째, 금강의 경우 창조우세가 형성되어 상류방향으로의 유사이동이 발생하여 전반적인 수로의 수심이 비교적 얇게 형성되고, 얇은 수심에서는 창조우세가 되는 경향이 있어 창조우세가 유지되는 것으로 판단된다. 영산강

의 경우 입구부의 낙조우세에 따라 하류방향의 유사이동이 발생하여 수심이 깊어짐과 동시에 조간대가 형성되며, 형성된 조간대는 낙조우세를 더욱 심화시켜 중심부는 수심이 깊은 상태를 유지하게 하는 반면 조간대상에서는 부유사의 상류방향 이동으로 인해 조간대가 유지됨으로써 낙조우세가 지속되는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-31100-010-2)지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

- 강시환, 카알지글러, 윌버트릭, 1987. 하구 인접 내항의 퇴적물 수송에 대한 수치모델 해석, *한국해양학회지*, **22**(1): 25-33.
- 강주환, 2000. 우리나라 서남해역의 창·낙조우세와 황해에서의 조류타원도의 회전, *대한토목학회논문집*, **20**(2): 269-276.
- 강주환, 문승록, 2001. 천해조가 발달된 하구에서의 조석과 전파특성, *한국해양·해양공학학회지*, **13**(1): 56-60.
- 강주환, 문승록, 안성모, 2002. 천해조가 발달된 하구에서의 소류사이동 특성, *대한토목학회논문집*, **22**(4): 531-538.
- 이남주, 최홍식, 1999. 수심적분 이차원 유사이동모형의 적용, *한국해양·해양공학학회지*, **11**(2): 127-133.
- Allen, G.P, Salomon, J.C., Bassoulet, P., Du Penhoat, Y. and DeGrandpre, C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries, *Sedimentological Geology*, **26**, pp. 69-90.
- Brenon, I. and Le Hir, P., 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine Estuary (France): Identification of formation processes, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **49**, pp. 525-544.
- Dyer, K.R., 1988. Fine sediment particle transport in estuaries, in *Physical Processes in Estuaries*, J. Dronkers and W. van Leussen eds., Springer-Verlag, pp. 295-310.
- Eisma, D., Oer, B., De, Cadee, P.L., Dijkema, G.C., Ridderinkhof, K., Philippart, H., Eisma, C., Doeke and Boer, Poppe Lubberts De, 1998. Intertidal deposits, *CRC Pr*, pp. 363-381.
- Fredsoe, J., 1981. Mean current velocity distribution in combined wave and current, *Progress Report No. 53*, Technical Univ. of Denmark.
- Kang, J.W. and Jun, K.S., 2002. Flood and ebb dominance at the estuaries in Korea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (accepted).
- van de Kreeke, J., 1996. Net transport of fine sediment in a homogeneous tidal channel. in *Coastal and Estuarine Studies*, C. Pattiaratchi eds., American Geophysical Union, **50**, pp. 361-373.
- Krone, R. B., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial processes, *Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory*. Univ. of California, Berkely, California, Final Report.
- Lee, D.Y., Lee, J.L., Jun, K.C. and Park, K.S., 2001. A framework for cohesive sediment transport simulation for the coastal waters of Korea, *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*, W.H. McAnally, and A.J. Mehta eds., Elsevier Science, pp. 215-228.
- Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B. and Tee-ter, A. M., 1989. Cohesive sediment transport, I: Process description, *Journal of Hydraulic Engineering*, **115**(8), pp. 1076-1093.
- Speer, P.E. and Aubrey, D.G., 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part II: theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **21**, pp. 207-224.

Received July 18, 2002

Accepted August 12, 2002