ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/271303224

Numerical Modeling of Sediment Transport during the 2011 Summer Flood in the Youngsan River Estuary, Korea

Article *in* Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers · April 2013

DOI: 10.9765/KSCOE.2013.25.2.76

CITATIONS
11

READS
213

9 authors, including:



Ki-Young Bang
GeoSystem Research Corporation
5 PUBLICATIONS **26** CITATIONS
SEE PROFILE



J.W. Kim
Inha University
21 PUBLICATIONS **81** CITATIONS
SEE PROFILE



Seung Buhm Woo
Inha University
108 PUBLICATIONS **874** CITATIONS
SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by J.W. Kim on 05 May 2020.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

한국해안 · 해양공학회논문집
제 25 권 제 2 호, pp. 76~93, 2013년 4월
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.2.76

영산강 하구의 2011년 하계 홍수시 퇴적물이동 수치모의
Numerical Modeling of Sediment Transport during the 2011 Summer Flood in the Youngsan River Estuary, Korea

방기영* · 김태인* · 송용식* · 이정현* · 김신웅* · 조재갑* · 김종욱** · 우승범** · 오재경**
Ki-Young Bang*, Tae In Kim*, Yong Sik Song*, Jung Hyun Lee*, Shin Woong Kim*, Jae-Gab Cho*, Jong Wook Kim**, Seung Buhm Woo** and Jae Kyung Oh**

요 지 : 영산강 하구는 하구둑 및 방조제 건설등의 개발 사업으로 해수유동 체계에 변화가 발생하였으며, 인위적인 하구둑 운영에 의해서 담수 방류가 조절되어 자연적인 하구와는 다른 하구순환 형태를 나타내며, 하천 기원 퇴적물의 유입이 제한적이다. 하구둑 방류가 빈번한 하계의 하구 퇴적물 이동양상과 수지를 파악하기 위하여 3차원 수치모델인 EFDC를 적용하였다. 외력 및 육상 유입 조건을 실시간으로 입력하고, 연구지역의 퇴적물 입도특성을 바탕으로 모래, 실트, 점토의 다중 입경을 적용하여 모델링을 수행하였다. 관측 조석, 조류와 부유사 농도에 대하여 보정·검정된 모델링 결과에 의하면, 2011년 8월에 부유 퇴적물은 표층에서 외해방향으로 이동하지만 중·저층에서는 하구 내측으로 이동한다. 하구둑 방류에 기인한 하구순환에 의해 실트 크기 입자에 의한 퇴적이 우세하게 나타나며, 점토 크기 입자는 대부분 하구 내에서 순환을 반복하는 양상을 보였다.

핵심용어 : 영산강 하구, 하구순환, 퇴적물이동 모델링, 다중 퇴적물 입경

Abstract : The hydrodynamics in the Youngsan River Estuary has changed due to coastal developments such as the estuary dam and two tidal barriers. As the freshwater discharge is artificially controlled, the circulation pattern is different from those of natural estuaries and the river-born sediment supply is restricted. 3D numerical modeling system EFDC was applied to investigate the sediment transport pattern and budget in summer with river floods. The real-time driving forces and the fluvial sediment discharges from the watershed modeling were assigned for the simulation period. The size classes of sand, silt and clay were adopted based on the grain-size distribution of bottom sediments. The modeling results were calibrated and validated with the observed tides, tidal currents and suspended sediment concentrations. The suspended sediments are transported to the offshore at surface layer, whereas upstream toward the dam at mid- and bottom layers in August 2011. The characteristic estuarine circulation induced by the freshwater discharge from the dam, causes the deposition of silt-sized sediments on the whole and the sustained suspension of clay-sized sediments.

Keywords : Youngsan River Estuary, estuarine circulation, sediment transport modeling, multiple sediment size classes

1. 서 론

하구는 육지로부터 유입되는 담수와 외해로부터 유입되는 해수가 혼합되는 반폐쇄성 수역이며(Prichard, 1967), 육지와 해양을 연결하는 전이지역으로서 하구내의 환경 변화는 인접한 해역에도 큰 영향을 준다(Krone, 1975). 한국의 일부 하구역은 하구둑과 같은 구조물에 의해 하천과 단절되어 있으며, 갑문을 통해 간헐적으로 유출되는 담수에 의해서 하구의 유동, 퇴적, 수질, 생태 환경 등이 영향을 받고 있는데, 금강, 낙동강, 영산강 하구가 이에 해당된다. 연구 지역인 영산강 하구는 낙조우세의 특성을 나타내는 해역으로 1981년 하구둑 건설과 1993년 영암방조제 및 1996년 금호방조제 건설 등의 개발 사업이 진행되었다(Fig. 1). 이로 인해 연구지역의 낙조우세 특성이 강화되었으며, 조류속이 감소하고 조석 확폭으로 인해 고조위는 상승, 저조위는 하강하였다(최, 1984; 이·신, 1991; 강, 1996; 정 등, 1997; 강 등, 1998, 2005a, 2005b; Kang, 1999; 강 · 문, 2000; Byun et al., 2004). 그 뿐만 아니라 하구둑 건설 후 하구내 수질과 플랑크톤 생물상의 변화도 발생하였다(신·윤, 2011). 하구둑 건설 이후 1982년부터 2006년까지 하구역에서 평균 2.26 m의 퇴적이 발생하였으며,

*㈜지오시스템리서치 (Corresponding author: Ki-Young Bang, GeoSystem Research Corp., Gyeonggi 435-824, Korea. Tel: 070-7019-0600, Fax: 031-479-7410, kybang@geosr.com)
**인하대학교 해양과학과 (Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

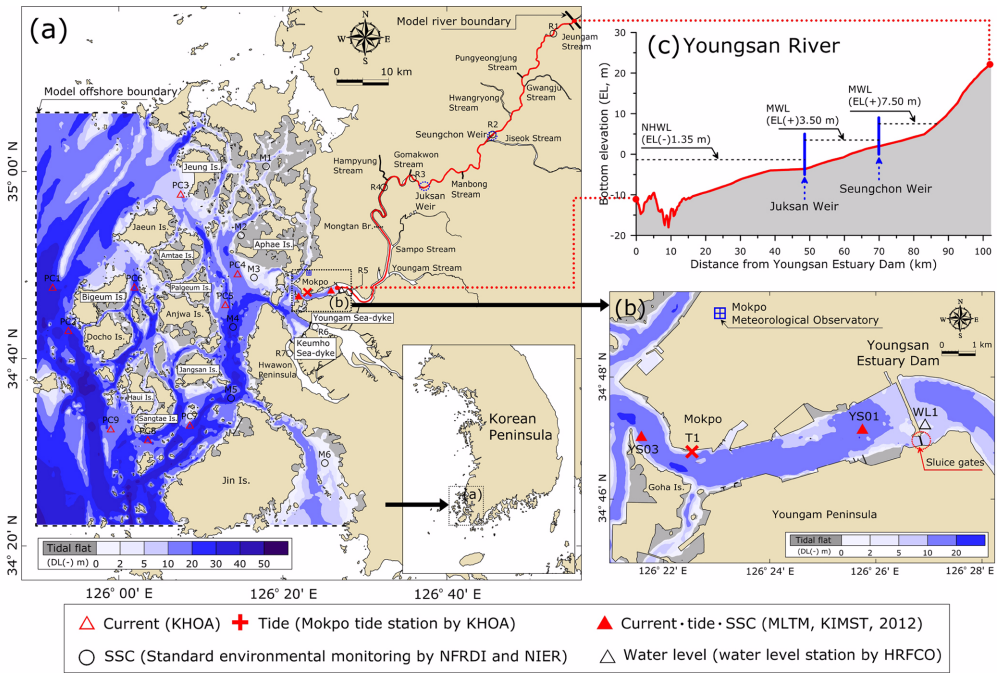


Fig. 1. Map showing the study area with bathymetry and monitoring stations. Stations M1to M6 and R1 to R7 in (a) are the standard environmental monitoring locations by NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute) and by NIER (National Institute of Environmental Research), respectively. NHWL and MWL in (c) is the abbreviation of normal high water level and management water level, respectively.

니질 퇴적물이 우세한 분포를 나타내고 있다(김, 2007).

영산강 하구둑 건설 후 환경에 있어 가장 큰 영향을 미치는 것은 간헐적으로 방류되는 담수라고 할 수 있다. 2000년부터 2011년까지 총 12년간의 하구둑 방류량 통계자료에 의하면 평균적으로 연간 총 방류량의 약 70%가 하계인 7월부터 9월 사이에 방류되었다(Table 1). 영산강 하구의 경우, 담수 방류에 의해 해수 특성의 변화가 발생하여 일반적인 하구에서 나타나는 2층 순환구조가 아닌 다층 순환 구조가 형성되며(박 등, 2001; Cho et al., 2004; Cho et al., 2009), 하계의 대규모 방류시에는 저염화와 강한 태양복사에 따른 표층수온 증가로 인해 성층구조가 강화되어 수직혼합이 억제되는 환경이 형성되기도 한다(박 등, 2012). 이렇듯 하구둑 방류에 의해서 특징적인 순환 특성을 나타내는 연구 지역에서 하구둑 방류는 퇴적물의 공급 및 순환 측면에서 매우 중요하며, 하구내 퇴적양상 파악을 위해서 반드시 고려해야 할 요인이다.

영산강 하구의 퇴적물 이동 및 퇴적에 관한 연구에는 단순모형을 적용한 부유사 및 소류사 이동특성 분석(강·문, 2001; 강 등, 2002a, 2002b), 2차원 모형을 적용하여 입력변수에 따른 점착성 퇴적물의 이동특성 분석(정 등, 2006; 최 · 정, 2012; 최, 2012), 수층에서의 퇴적물 성층 효과에 의한 유동특성변화 분석(Byun and Wang, 2005), 재부유 퇴적물에 의한 춘계 플랑크톤 번식 영향 분석(Byun et al., 2007) 등이 있다. 그러나 하구의 퇴적물 이동과 순환에 있어 매우 중요한 요인인 담수 방류를 고려한 3차원적인 퇴적물 이동 및 퇴적 양상에 대한 분석은 전무하며, 조석·조류, 하천 유량, 바람, 파랑 등과 같이 퇴적물이동에 영향을 미치는 외력을 모두 반영한 연구사례 또한 없었다. 따라서 본 연구에서는 영산강 하구 및 외해 지역과 하구둑 상류의 하천이 통합적으로 결합된 모델을 구축하고, 실시간 조석·조류, 바람, 하천유량

Table 1. Statistics of freshwater discharge from the sluice of Youngsan River Estuary Dam

Parameter	Monthly												Annual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Monthly discharge (10^6m^3)	44	45	54	64	86	166	459	446	328	46	35	34	(sum) 1,750
Frequency of opening	3	3	5	6	9	11	26	21	16	5	4	4	(sum) 108
Duration of an opening (hour)	2.0	2.2	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.5	2.4	1.9	2.0	1.9	(mean) 2.4
Av. discharge during an opening (m^3/s)	2,037	1,894	1,875	1,646	1,327	1,823	1,962	2,360	2,373	1,345	1,215	1,243	(mean) 1,875

※Raw data from Korea Rural Community Corporation (2000-2011).

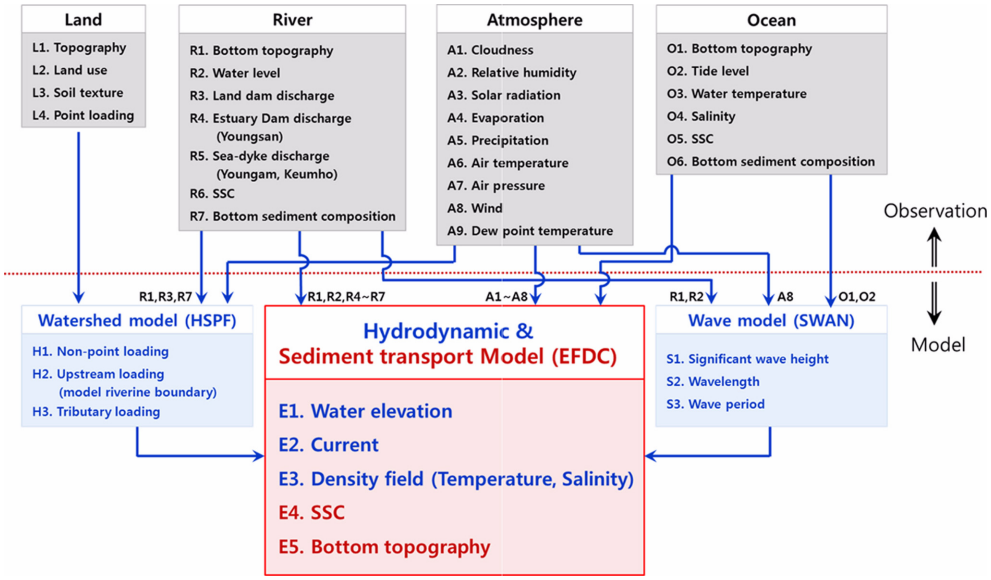


Fig. 2. Modeling concept and data flow.

을 적용하고 파랑에 의한 전단응력 변화를 고려하기 위해 별도의 파랑실험을 통해 산출된 실시간 파랑 분포를 입력하여 2011년 하계에 대해 실시간 퇴적물이동 모델링을 수행하였다(Fig. 2). 이때 육상으로부터 유입되는 유량과 퇴적물을 반영하기 위하여 검정된 유역모델을 통해 산출된 유역 단위별 유량과 퇴적물의 유출량을 모델에 입력하였다. 이를 통해 하구둑을 통한 담수 방류가 빈번한 하계 홍수기에 영산강 하구내의 퇴적물이동 특성과 퇴적물 수지를 분석하였다.

2. 사용 모델

2.1 모델 개요

본 연구에 사용한 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델은 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 수치모델로 유체정역학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하며, 연속방정식과 수평·수직방향 운동방정식, 열·염보존 방정식, 그리고 퇴적물 등을 포함한 물질보존 방정식들로 구성되어 있다(Hamrick, 1992). 열·염보존 방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. EFDC 모델은 수직방향으로 σ-좌표계를 사용하고, 수평방향으로 직선 또는 곡선 직교 좌표계를 사용한다. 수직난류 점성계수와 수직난류 확산계수를 산정하기 위한 난류모형으로 Mellor and Yamada(1982)의 turbulence closure scheme level 2.5를 사용하고, 수평난류 점성계수와 수평난류 확산계수는 Smagorinsky(1963)의 식을 통해 계산하며, 질량보존 기법(mass conservation scheme)을 사용한 조간대 처리가 가능하다(Hamrick, 1994; Hamrick and Moustafa, 1996). EFDC 모델은 다중입경의 퇴적물을 고려할 수 있으며, 점착성(cohesive)과 비점착성(noncohesive) 퇴적물을 동시에 모의할 수 있고, 비점착성 퇴적물의 소류(bed load)를 모의할 수 있다(Tetra Tech Inc., 2007).

본 연구에서는 영산강 하구둑 상류로부터 유입되는 부유퇴적물을 현실적으로 반영하기 위하여 승촌보 상류까지 모의 영역에 포함하였다. 또한 수리구조물 재현을 위하여 EFDC 모델에 보 모듈을 추가하여 4대강 사업의 일환으로 건설된 승촌보와 죽산보를 통한 유량과 퇴적물이동을 모의하였다.

2.2 하천 보 모듈 적용

EFDC 모델은 하천이나 하구의 수리구조물을 재현할 수 있는 기본적인 기능을 포함하고 있는데, 이는 상·하류의 수위차로부터 계산한 유량을 상류에서 하류로 부여하는 것으로, 고정보, 가동보와 소수력 발전소 등으로 구성되어 있는 다기능 보를 모의하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 국토해양부(2011)의 보 관리규정에 제시된 승촌보와 죽산보의 보 제원에 개선된 보 모듈((주)지오시스템리서치, 2011)을 적용하여 하천의 고정보와 가동보를 통한 하류방향으로의 유량과 퇴적물이동을 재현하였다.

2.3 퇴적물이동 모듈

다중입경 퇴적물을 고려할 수 있는 EFDC 모델의 수층내 퇴적물 입경별 이류 · 확산 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}+\frac{\partial (uC_i)}{\partial x}+\frac{\partial (vC_i)}{\partial y}+\frac{\partial (wC_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_H\frac{\partial C_i}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_H\frac{\partial C_i}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_V\frac{\partial C_i}{\partial z}\right)+\frac{\partial (w_{s,i}C_i)}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, 아래 첨자 i는 퇴적물 입경 계급(size class)을 나타내며, C_i는 농도, t는 시간, K_H와 K_V는 각각 수평 및 수직 확산계수, u, v, w는 각각 x, y, z 방향 유속, $w_{s,i}$는 퇴적물의 침강속도이다. 바닥경계층에서의 퇴적물 교환 조건, 즉 침

식과 퇴적이 고려된 순 퇴적물이동량, $J_{s,i}$는 다음과 같이 정의된다.

$$-w_{s,i}C_i - K_V\frac{\partial C_i}{\partial z} = E_i - D_i = J_{s,i} \tag{2}$$

여기서, E_i와 D_i은 각각 해저면 경계를 통한 퇴적물 침식량과 퇴적량이다. 해저면 경계에서 퇴적물의 침식, 퇴적, 이동여부는 일반적으로 흐름과 파랑 등에 의해서 저면에 작용하는 전단응력과 입도, 전밀도, 공극율 등과 같은 퇴적물 특성에 의해서 결정되는 저면 퇴적물의 저항력, 즉 한계 전단응력 간의 관계를 통해 결정된다. 특히 퇴적물이 점착성(cohesive)인가 비점착성(noncohesive)인가에 따라서 다른 형태의 침식, 이동 및 퇴적 과정을 나타내고 이로 인해 점착성 퇴적물과 비점착성 퇴적물에는 서로 다른 침·퇴적 공식이 적용된다(Tetra Tech Inc., 2007).

본 연구에서 전단응력은 흐름과 파랑에 의한 전단응력의 단순 합성식을 적용하여 매 계산시간마다 각 격자별로 계산하도록 하고 계산된 전단응력을 통해 전단속도를 산정하였으며, 이에 대한 내용을 부록 1에 자세하게 기술하였다.

EFDC 모델에서 점착성 퇴적물의 퇴적물 침식과 퇴적은 다음 식을 통해서 계산된다(Tetra Tech Inc., 2007).

$$D_i = \begin{cases} w_{s,i}C_{1,i}\left(1-\dfrac{\tau_b}{\tau_{cd,i}}\right) & \text{if } \tau_b < \tau_{cd,i} \\ 0 & \text{if } \tau_b \geq \tau_{cd,i} \end{cases} \tag{3}$$

$$E_i = \begin{cases} M_{0,i}\left(\dfrac{\tau_b}{\tau_{cr,i}}-1\right)^{\eta} & \text{if } \tau_b \geq \tau_{cr,i} \\ 0 & \text{if } \tau_b < \tau_{cr,i} \end{cases} \tag{4}$$

여기서, $C_{1,i}$는 바닥층의 퇴적물 농도, τ_b는 흐름과 파랑에 의해 해저면에 작용하는 전단응력, $\tau_{cd,i}$는 퇴적물의 침식한계 전단응력, $\tau_{cr,i}$는 퇴적물의 침식한계 전단응력, $M_{0,i}$은 기준침식율이다. 점착성 퇴적물의 침강속도, $w_{s,i}$는 퇴적물 농도의 지수함수로 다음과 같이 계산된다.

$$w_{s,i} = w_{0,i}\left(\frac{C_i}{C_{0,i}}\right)^{\gamma_0} \tag{5}$$

여기서, $w_{0,i}$는 기준 침강속도이고, $C_{0,i}$는 표준 농도, γ_0는 침강계수이다.

해저면 경계에서 비점착성 퇴적물의 퇴적과 부유(침식)에 의한 퇴적물 순 이동량은 다음과 같이 계산된다(Tetra Tech Inc., 2007).

$$J_{s,i} = w_{s,i}\left(\frac{2(1+R_i)}{2+R_i(1-z_{eq,i})}\right)(C_{1,eq,i}-C_{1,i}) \tag{6}$$

$$R_i = \frac{w_{s,i}}{u_*\kappa} \tag{7}$$

$$C_{1,eq,i} = \begin{cases} \dfrac{\ln(\Delta z_{eq,i}^{-1})}{(\Delta z_{eq,i}^{-1}-1)}C_{eq,i} & \text{if } R_i = 1 \\ \dfrac{[(\Delta z_{eq,i}^{-1})^{1-R_i}-1]}{(1-R_i)(\Delta z_{eq,i}^{-1}-1)}C_{eq,i} & \text{if } R_i \neq 1 \end{cases} \tag{8}$$

$$\Delta z_{eq,i} = \frac{z_{eq,i}}{h} \tag{9}$$

여기서, R_i은 라우즈 파라미터(Rouse parameter), κ는 폰카르만 상수(von Karman constant, 0.4), $C_{1,eq,i}$는 바닥층의 평형농도, $\Delta z_{eq,i}$는 평형농도가 정의되는 무차원 높이, h는 수심이며, $C_{eq,i}$는 유체역학적 요인과 퇴적물의 물리적 특성을 통해서 계산되는 평형농도, $z_{eq,i}$는 해당 평형농도가 정의되는 높이이다. EFDC 모델에서는 기본적으로 Smith and McLean (1977), van Rijn(1984b), Garcia and Parker(1991)에 의한 평형농도($C_{eq,i}$)와 기준높이($z_{eq,i}$) 계산식을 선택적으로 사용할 수 있으며(Tetra Tech Inc., 2007), 본 연구에 적용된 Smith and McLean(1977) 식은 다음과 같다.

$$C_{eq,i} = \rho_s\frac{0.65\Gamma_0 T_i}{1+\Gamma_0 T_i} \tag{10}$$

$$z_{eq,i} = \frac{26.3(\tau_b-\tau_{cr,i})}{(\rho_s-\rho_w)g} \tag{11}$$

$$T_i = \frac{\tau_b-\tau_{cr,i}}{\tau_{cr,i}} \tag{12}$$

여기서, ρ_s는 퇴적물의 밀도, ρ_w는 유체의 밀도, Γ_0는 실험상수($=2.4\times10^{-3}$), g는 중력가속도, T_i는 퇴적물 입자의 정규 초과 전단응력(normalized excess shear stress)이다.

비점착성 퇴적물의 경우, 외력에 의한 전단속도가 임계 전단속도보다 크고, 침강속도보다 작을 때 소류에 의한 퇴적물 이동이 발생한다. EFDC의 퇴적 모듈에 기본적으로 Bagnold (1956), Engelund and Hansen(1967), Meyer-Peter and Müller(1948), van Rijn(1984a), Wu et al.(2000)의 소류이동 공식이 내장되어 있다. 본 연구에서는 파랑의 쇄파 여부에 따른 소류 이동량의 변화를 고려할 수 있는 Bijker(1967)식을 추가하고, 소류이동 방향의 경사에 따른 영향을 고려하기 위하여 Bagnold(1966)의 경사계수를 적용할 수 있도록 코드를 개선하였으며, 이 식들을 적용하여 소류 이동량을 계산하였다. 본 연구에 적용된 소류사이동 공식은 부록 2에 기술하였다.

3. 모델 적용

하구는 다양한 외력의 상호 작용이 집중되는 지역으로(Kjerfve and Macill, 1989), 하구에서의 퇴적물이동 양상은 하천유량, 조석·조류, 파랑 등에 의해서 결정되며, 육상 또

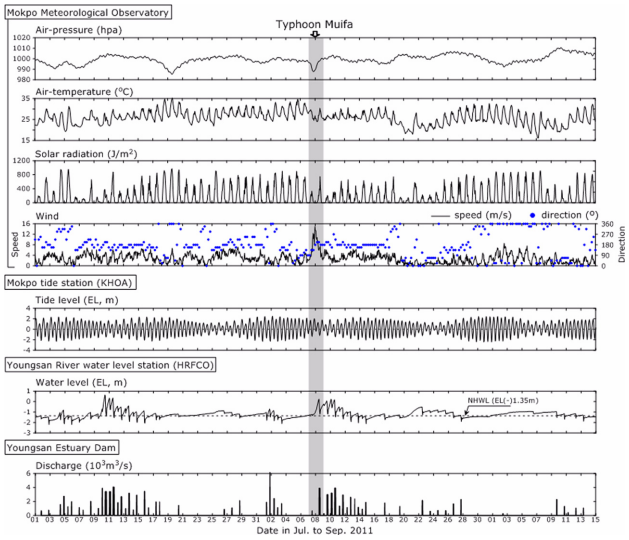


Fig. 3. Time-series of meteorological parameters, tide levels, lake water levels and freshwater discharge from the dam. Shaded period designates when the typhoon Muifa influenced the study area.

는 외해로부터 공급된 퇴적물은 담수와 해수의 혼합에 의해서 발생되는 순환작용(Bowden, 1967; Nichols and Poor, 1967; Dyer, 1973; Nichols and Biggs, 1985)에 의해서 하구 내에서 체류하다가 퇴적되거나 외해로 유출된다. 이렇듯 하구의 퇴적물 거동에 영향을 미치는 다양한 요인들을 충분히 반영하기 위하여 본 연구에서는 실시간 조석·조류, 수온·염분, 해양-대기 열교환, 바람, 파랑, 담수 유입, 외해 및 육상 유입 부유사 농도 등을 적용하여 3차원 퇴적물이동 모델링을 수행하였다(Fig. 2). 모델에 입력된 기압, 기온, 일사량, 바람, 영산강 하구둑 방류량 및 목포항과 하구둑 내측의 수위 시계열을 Fig. 3에 제시하였다. 모델링 기간은 2011년 7월 1일부터 9월 15일까지이며, 여기서 7월은 유동과 퇴적물 농도의 안정화 기간으로 간주하고, 영산강 하구에서 부유퇴적물 농도 관측이 수행된 8월 1일 이후의 모델링결과를 분석하였다.

3.1 모델 구축

모델의 계산영역은 영산강 하구의 외해지역과 영산강 하구둑 상류를 포함하도록 설정하였고, 해안선 위치는 국립해양조사원의 최신 수치해도, 국토지리정보원의 최신 지형도 및 인공위성 사진 등을 참고하여 입력하였다. 각 격자의 수심은 국립해양조사원에서 발행한 최근 수치해도, 하천정비기본계획의 수심자료(건설교통부, 익산지방국토관리청, 1999), 영산강 하구둑 부근의 최신 수심자료(국토해양부, 한국해양과학기술진흥원, 2012b)를 이용하여 입력하였다(Fig. 1 참조).

영산강 하구의 유동을 상세하게 재현하면서 외해에서의 계산시간을 절약하기 위하여 직교 곡선 격자체계를 적용하였다(Fig. 4). 수평 격자간격은 동서방향으로 70~400 m, 남북방향으로 20~400 m로서 772 × 238개의 격자로 구성하였으며, 계

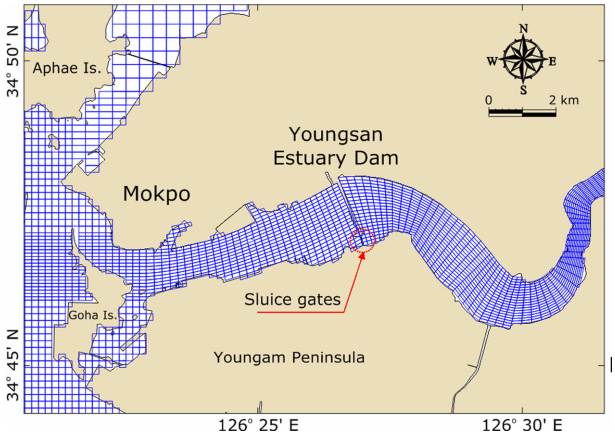


Fig. 4. Horizontal computation grids zooming in around the dam.

산에 사용되는 유효 격자는 27,773개이다. 수직방향으로 시그마 좌표계를 적용하여 11개 층으로 구성하였으며, 격자별 수직층의 두께는 동일한 비율로 설정하였다. 수치계산의 시간간격은 CFL(Courant-Friedrich-Lewy) 조건을 만족시키는 10초를 사용하였다.

3.2 유동 조건

3.2.1 초기 조건

영산강 하구둑 외측은 조위와 유속을 '0'으로 하는 cold start를 부여하였으며, 이 때 수위는 평균해면(MSL) 기준이다. 영산강 하구둑 상류의 수위는 관리수위를 적용하여, 하구둑부터 죽산보까지 EL(–)1.35 m, 죽산보부터 승촌보까지 EL(+)3.5 m, 승촌보부터 상류경계까지 EL(+)7.5 m 이상으로 적용하였다(Fig. 1 참조). 하구역의 염분과 수온 초기조건은 국립수산과학원 해양수산연구정보포털(http://portal.nfrdi.re.kr/)의 국가해양환경측정망 자료에서 최근 15년간(1997~2011년)의 8월 정점 관측자료 평균치를 입력하였다. 하구호와 하천의 경우, 염분은 0으로 지정하고 수온은 국립환경과학원 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr/)의 총량측정망 자료에서 7월 1일 부근 자료의 평균치를 입력하였다(Fig. 1 참조).

3.2.2 경계 조건

외해 개방경계의 조석은 NAO.99b 모델 결과(Matsumoto et al., 2000)를 이용하여 1차적으로 5개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)를 입력하였으며, 보정 과정에서 낙조 우세현상을 재현하기 위하여 기존 연구결과(정 · 최, 2010; 최 · 정, 2012)를 참고하여 M_4와 MS_4 분조를 추가 입력하고, 모델 영역내의 조석과 조류 관측자료를 정확하게 재현하도록 조석 조건을 조정하였다.

수온과 염분의 외해 개방경계는 해양수산연구정보포털(http://portal.nfrdi.re.kr/)의 국가해양환경측정망 자료에서 최근 15년간(1997~2011년)의 2, 5, 8, 11월 정점 관측자료를 보간하여 입력하였다(Fig. 1 참조). 실시간 해양-대기간 열교환 조건은 목포기상대의 기압, 기온, 운량, 일사량, 상대습도

자료를 Edinger et al.(1974) 식에 적용하여 입력하였다. 실시간 바람은 목포기상대의 매시별 풍향·풍속 자료를 적용하였으며(Fig. 3 참조), 풍속은 관측위치 및 고도, 지속시간, 대기와 해수·담수의 온도차에 대한 보정과정을 통해(Leenknecht et al., 1992; U.S. Army, 2008) 수면상 10 m의 풍속으로 보정하여 입력하였다.

3.3 파랑 조건

파랑에 의한 저면전단응력 변화를 고려하기 위하여 SWAN (Simulating WAves Nearshore) 모델로 모델 영역 내 실시간 파랑 분포를 산출하여 퇴적물이동 모델에 입력하였다. SWAN은 파랑 수치 모델로서 개방경계의 입사파, 바람, 해저면 및 흐름 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구에서의 파랑을 계산할 수 있다. SWAN 모델의 주요 기능과 기본 방정식 및 수치 기법에 대한 자세한 내용은 Booij et al.(1999), Ris et al. (1999), Tolman(1991)에 제시되어 있다. 본 연구에서는 제 3세대 모델(version 40.92)을 사용하고, 외해 전체 영역과 하구둑부터 몽탄대교까지의 하구호에 대해서 매 시별 바람과 하구 조위 및 하구호 수위를 입력하여, non-stationary 모드로 실시간 파랑 분포를 산출하였다. 바람은 목포기상대의 풍향·풍속 자료를, 하구 조위는 목포 조위관측소의 자료를, 하구호 수위는 하구둑 인근 수위관측소의 자료를 적용하였다(Fig. 3 참조). 풍속은 유동조건에 적용된 것과 동일하게 수면상 10 m의 풍속으로 보정하여 입력하였다.

3.4 육상 유입 조건

육상경계로부터 유입되는 유량과 부유사량을 산출하기 위하여 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)를 이용하여 영산강 본류와 지류 및 연안유역으로부터의 실시간 유량과 모래, 실트, 점토의 3가지 퇴적물 농도를 산출하고 이를 각 유입 위치에 입력하였다(Fig. 5). HSPF는 미국 환경청(US EPA)에서 오염총량제를 효과적으로 지원하기 위해 개발한 준분포형 유역 모델로, 투수층(PERLND), 불투수층(IMPLND), 하천(RCHRES)의 3가지 주요 응용모듈로 구성되어 있으며, 대상 유역의 지형, 토지이용 형태, 토성, 기상자료, 점오염원 배출량, 댐 방류량 등을 입력하여 하천 또는 유역의 유출 유량 및 물질 농도를 정량적으로 산정할 수 있다. HSPF 모델의 주요 기능 및 구조는 Bicknell et al.(1997)에 제시되어 있다. 본 연구에 적용된 영산강 지류와 하천 및 연안유역의 실시간 유량 및 부유사농도 산출 과정에 대한 자세한 내용은 국토해양부(2012c)에 제시되어 있다.

영산강 하구둑과 영암·금호방조제의 담수 유출량은 한국농어촌공사의 배수갑문별 조작현황 자료를 이용하여 입력하였다. 영산강 하구둑의 경우, EFDC의 취·배수(withdrawal/return) 기능을 이용하여 호에서 하구 방향으로 담수와 퇴적물의 유출을 반영하였다.

3.5 퇴적물 조건

3.5.1 퇴적물 계급 구분 및 저층퇴적물 조성

하구, 하구호와 하천에는 다양한 크기와 특성을 가진 퇴적물들이 존재하며, 퇴적물의 특성에 따라 다양한 형태로 이동·퇴적된다. 퇴적모델링에 있어서 적용되는 입경의 개수는 많을수록 더 정확한 모의가 가능하지만, 모델의 계산시간을 고려하여 결정하여야 한다(James et al., 2006). 선행 연구에 의하면 모델영역 내의 저층 퇴적물은 대체로 니질과 사질 혼합 퇴적물이 우세하게 분포한다. 하구둑 인근에서는 갑문 부근에서 자갈+모래 함량이 높게 나타나지만 대체로 니질 퇴적

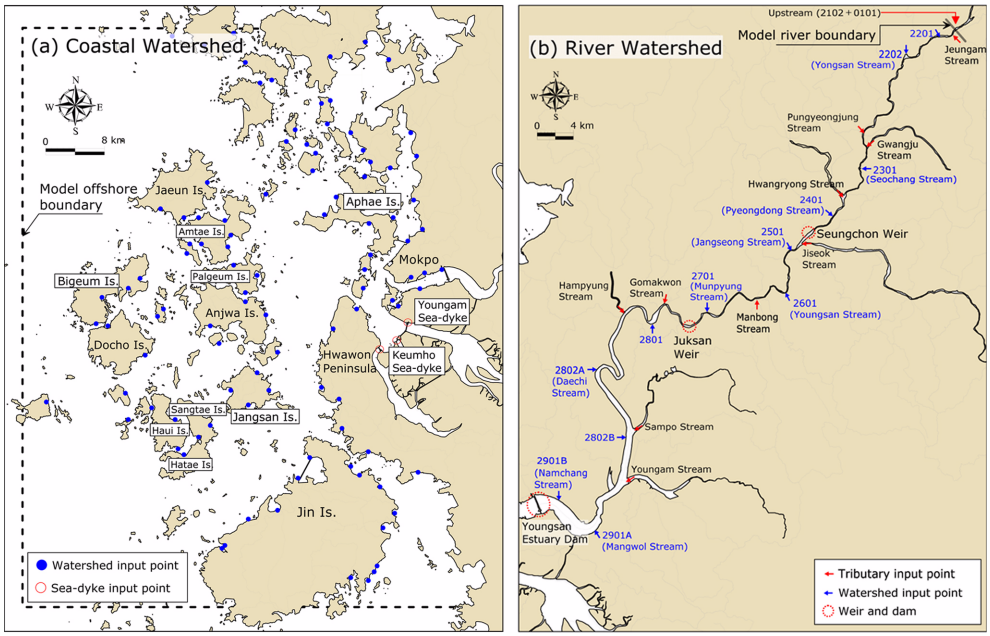


Fig. 5. Discharge points of freshwater and sediments from the coastal watershed (a) and the river watershed (b).

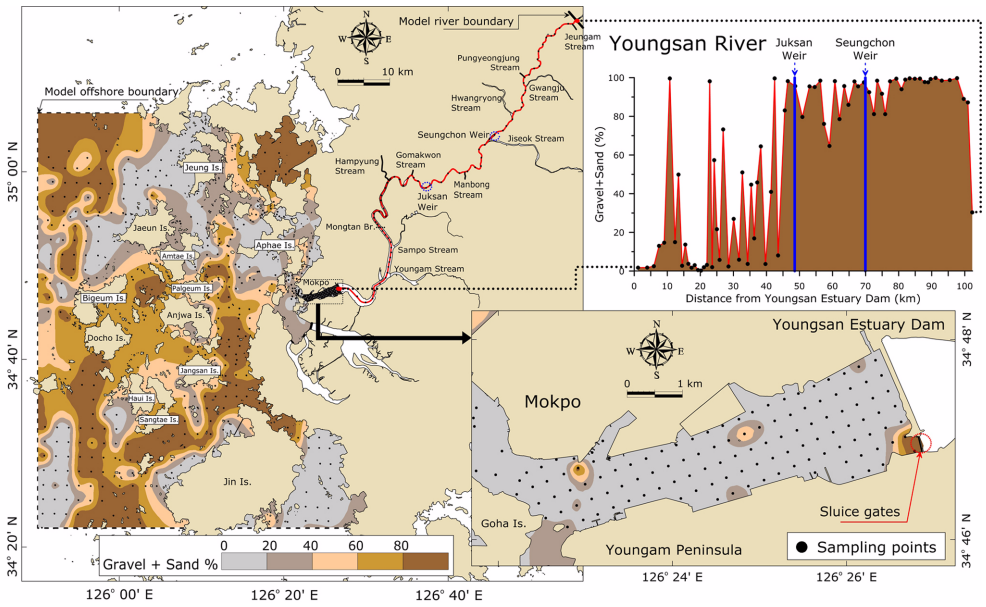


Fig. 6. Distribution of coarser contents (gravel+sand) in the bottom sediments.
※ Data from Koh (1992), Kim et al. (1994), You et al. (1996), Oh (2007), GeoSystem Research Corp. (2003), Kim (2007), Southwest Shipbuilding Industrial Development Inc. (2010), and Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2010, 2011).

물이 우세하게 분포하고, 하구둑 상류로 갈수록 자갈+모래 함량이 증가한다(Fig. 6). 모래, 실트, 점토의 평균적인 함량비는 하구둑 하류의 하구에서 42, 33, 25%, 상류의 하구호와 하천에서 59, 27, 14%로 나타났다. 평균적인 함량비와 각 퇴적물의 특성을 감안하여 본 연구에서는 퇴적물을 모래, 실트, 점토의 3가지 계급으로 구분하였으며, 모래는 비점착성 퇴적물로 실트와 점토는 점착성 퇴적물로 모의하였다. 해저질 공간분포 자료를 이용하여 각 격자마다 서로 다른 모래, 실트, 점토의 초기 퇴적물량을 입력하였다. 각 퇴적물 계급의 유효입경(effective particle size)은 정점 YS01과 YS03에서 채취한 저층퇴적물의 입도분석 결과(Fig. 7, 국토해양부, 2012a)를 James et al.(2006)의 입경별 중량비를 이용한 방법에 적용하여 계산하였다(Table 2).

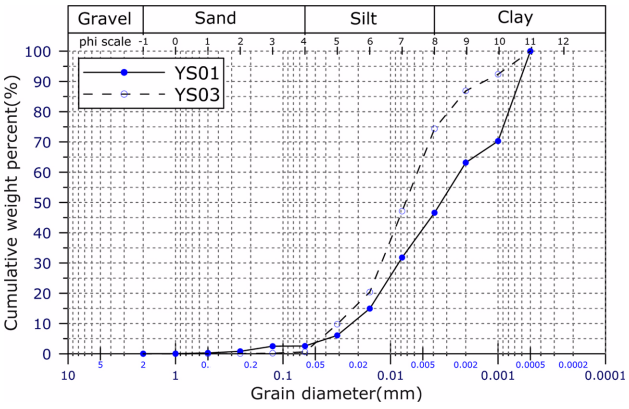


Fig. 7. Cumulative grain-size distribution of bottom sediment at stations YS01 and YS03. The phi scale (ϕ) is defined as $\phi = \log_2 d$, where d is grain diameter in mm unit.

Table 2. Effective particle size of each grain-size class

(Unit: mm)

Nomenclature	Grain-size	Effective particle size		
		YS01	YS03	Ave.
Sand	0.0625-2.0000	0.3166	0.1531	0.2349
Silt	0.0039-0.0625	0.0141	0.0147	0.0144
Clay	0.0002-0.0039	0.0014	0.0018	0.0016

3.5.2 부유퇴적물 농도

외해역의 부유사 농도는 조류와 파랑의 세기에 따라 변화하며 연안의 퇴적환경 변화에 영향을 줄 수 있으나, 관측자료의 한계 때문에 정온시 관측된 낮은 농도를 외력에 따른 변화 없이 일정하게 외해경계 농도로 적용하는 경우가 많다. Ganju and Schoellhamer(2009)는 모델경계 부근에서의 장기 부유사농도 관측자료를 분석하여 담수 유입, 풍파에 의한 재부유, 대 · 중 · 소조기의 변화를 확인하고 이러한 3가지 외력을 고려한 경계 부유사농도 시계열을 구성하여 퇴적물이동 수치모의에 적용하였다. 본 연구에서는 위 연구결과를 참고하여 모델영역 내 국가해양환경측정망의 최근 15년간(1997~2011) 관측 부유사농도를 기준으로 2011년 목포항의 조차(대 · 중 · 소조기) 변화와 목포기상대의 풍속(파고) 변화를 반영한 가상의 외해경계 부유사농도를 산정하여 모델에 입력하였다. 외해경계 부유사농도 시계열은 Fig. 8과 같으며, 태풍 무이파 내습시 가장 큰 농도를 나타낸다. 모델 경계에서의 입경별 농도는 침강속도가 가장 빠른 모래를 제외한 실트와 점토의 조성비를 이용하여 경계 격자별로 다르게 적용하였다.

외해경계 부유사농도를 정확하게 입력하기 위해서는 모델 경계 부근에서 수층과 해저경계층의 부유사농도뿐만 아니라

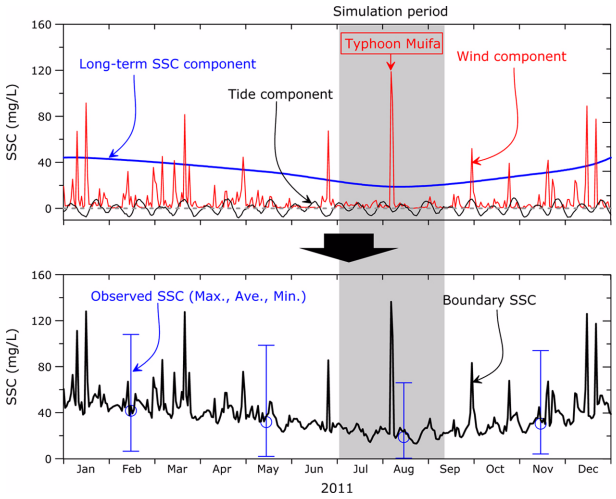


Fig. 8. Offshore boundary condition of suspended sediment concentration (black line in the lower panel) which is the sum of long-term variation of SSC, wind and tidal components (upper panel). The simulation period is designated with grey-colored shading. Quarterly observed SSCs (blue vertical bar in the lower panel) are the ensemble statistics at stations M1 to M6 from 1997 to 2011.

조석·조류 및 파랑을 포함하는 외력과 해저면 특성에 대한 장기적인 관측이 수행되어 저면조건 및 외력조건의 변화에 따른 부유사농도의 변동양상을 명확하게 파악하여야 한다. 이를 바탕으로 외해경계 부유사농도 시계열을 구성하여 입력하는 것이 최적으로 판단되지만, 이러한 관측을 수행하기에는 현장 여건과 경제적인 제약이 크다.

육상 경계로부터 유입되는 실시간 부유사농도는 전술한 HSPF를 통해 산출된 결과를 적용하였으며, 영암·금호방조제로부터의 유출 농도는 방조제 배수갑문 인근에서 관측된 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr/)의 일반측정망자료를 보간하여 입력하였다.

농도 초기치의 경우, 하구에서는 전술한 외해경계 시계열에서 7월 1일의 농도와 하구의 저층퇴적물 조성을 고려하여 실트와 점토로 구분하여 입력하였다. 하구호와 하천에서는 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr/)의 총량측정망에서 2011년 7월 1일 부근 자료의 평균치와 저층퇴적물 조성을 고려하여 실트와 점토로 구분하여 입력하였다.

3.5.3 퇴적물 입력계수

퇴적물 침식·퇴적조건과 연관된 입력계수는 연구지역의 퇴적물 조건과 기존 연구결과 및 보정 과정을 통해 결정하였으며, 이를 Table 3에 제시하였다.

입도계급별 기준 침강속도는 각 계급의 유효입경을 van Rijn (1984b) 식을 적용하여 계산하였으며, 점토는 보정 과정을 통해 침강계수를 1.0으로 결정하였다. 점착성 퇴적물에 적용되는 퇴적한계 전단응력의 경우, 퇴적물 구성과 수층 퇴적물의 물리화학적 특성에 의해서 좌우된다(Mehta et al., 1989). 기존 연구결과에 의하면 0.06~1.1 N/m^{2}의 넓은 범위를 나타내며, 지역 특성을 반영한 자료가 충분하지 않기 때문에 통상 보정계수로 사용된다(Tetra Tech Inc, 2007). 본 연구에서는 실트와 점토의 퇴적한계 전단응력을 0.08 N/m^{2}으로 적용하였다.

저면 퇴적층의 침식한계 전단응력은 퇴적물 조성, 퇴적층 구조, 공극수와 수층으로부터 유입되는 유체의 화학조성, 침식·퇴적 이력, 유기물 함량, 산화된 상태 등과 같은 다양한 요인에 의해서 영향을 받는다(Ariathurai and Krone, 1976; Mehta et al., 1989). 일반적으로 비점착성 퇴적물의 침식한계 전단응력은 입경에 따라 정의되며(van Rijn, 1993), 점착성 퇴적물의 경우, 모델 보정과정에서 결정되거나 침식량, 전밀도 등의 함수로 정의되기도 한다(Mehta et al., 1982; Villaret and Paulic, 1986; Hwang and Mehta, 1989; Sanford and Maa, 2001). 이러한 연구결과를 반영할 경우, 퇴적물 계급별로 다른 침식한계 전단응력을 적용하여야 한다. 그러나 다양한 퇴적물이 혼재되어 있을 경우, 외력이 작용했을 때 초기 거동을 위한 퇴적구조의 변화 또는 침식의 영향은 퇴적층내 단일 퇴적물에만 국한되어 나타나지 않으며, 다른 퇴적물에도 영

Table 3. Major input parameters to be used in the sediment transport model

Parameter		Value			Remarks
		Sand	Silt	Clay	
d_{eff} (effective particle size class, mm)		0.2349	0.0144	0.0016	1)
Deposition	$w_{0,i}$ (reference settling velocity, mm/s)	24.784	0.142	0.002	1)
	γ_0 (empirical settling constant)	-	0.0	1.0	2)
	$\tau_{cd,i}$ (critical shear stress for deposition, N/m^2)	-	0.08	0.08	2)
Erosion	$\tau_{cr,i}$ (critical shear stress for erosion, N/m^2)		0.32-0.94		1)
	k_s (bottom roughness, m)		0.015		2)
	$M_{0,i}$ (reference erosion rate, g/m^2/s)	-	0.0005	0.0001	2)
	η (empirical erosion constant)	-	2.2	0.0	2)
Bedload	d_{50} (median diameter of bed sediment, mm)	0.1467	-	-	1)
	d_{90} (90% diameter of bed sediment, mm)	0.4147	-	-	1)
	φ (angle of repose, °)	30.0	-	-	1)

1) Adopted from the observations and/or previous studies.
2) Tuned by calibration experiments.

향을 미쳐 2차적인 퇴적구조의 변화와 침식을 발생시킬 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 퇴적물 침식특성은 작용하는 주요 외력과 그에 따른 퇴적물 입도 특성에 따라 공간적으로 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 Villaret and Paulic (1986)의 제안식과 전술한 저층퇴적물 공간분포 자료를 이용하여 공간적으로 다른 침식임계 전단응력을 부여하고 이를 모래, 실트, 점토에 동일하게 적용하도록 하였다. 본 연구에 적용된 침식한계 전단응력 계산식은 부록 3에 기술하였다. 흐름과 파랑에 의한 전단응력 계산에 적용되는 조도는 0.015 m로 적용하였다. 비점착성에 적용되는 기준 침식율과 침식율 계수는 보정 실험을 통해 실트는 각각 0.0005 g/m^2/s와 2.2로, 점토는 각각 0.0001 g/m^2/s와 0.0으로 적용하였다. 소류사 이동량 계산에 적용되는 d_{50}과 d_{90}은 YS01과 YS03의 입도자료에서 0.0625 mm 이상의 모래질 입자를 이용하여 각각 0.1467과 0.4147 mm로 입력하였으며, 안식각은 Bagnold (1966)의 실험값을 이용하여 30°로 적용하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 모델 검정

4.1.1 유동 검정

유동장의 재현성을 확인하기 위해 2011년 8월 1일부터 31일까지의 31일간에 대해서 1개의 조석 정점과 9개의 조류 정점의 관측자료를 이용하여 모델과 관측의 조석 및 조류 조화상수를 비교하였다. T1은 국립해양조사원의 목포 조위관측소이고, PC1~PC9는 국립해양조사원의 기존 조류 관측정점이다(Fig. 1 참조). Table 4에 조석 7개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2, M_4, MS_4)의 조화상수와 모델 반조차의 오차(error) 및 절대상대오차(ARE; absolute relative error), 그리고 지각에 대한 오차를 제시하였다. 9개 조류 정점에 대한 조류타원의 장축 길이의 모델치와 관측치, 그리고 모델의 오차와 절대상대오차를 Table 5에 제시하였다. 오차와 절대상대오차는 아래와 같이 정의된다.

$$Error = x_m - x_0 \tag{13}$$

$$ARE(\%) = \frac{|x_m - x_0|}{x_0} \times 100 \tag{14}$$

Table 5. Observed and modeled semi-major axis of tidal current ellipse

Station (layer)	Constituent	Observed (m/s)	Model (m/s)	Error (m/s)	ARE (%)
PC1 (Surface)	M_2	0.86	1.11	0.25	29.4
	S_2	0.40	0.38	−0.02	4.1
	K_1	0.14	0.16	0.02	13.4
	O_1	0.14	0.11	−0.02	17.2
	N_2	0.22	0.17	−0.05	21.9
PC2 (Surface)	M_2	0.99	1.17	0.17	17.4
	S_2	0.46	0.43	−0.03	6.8
	K_1	0.21	0.17	−0.03	15.9
	O_1	0.18	0.16	−0.02	11.9
	N_2	0.22	0.18	−0.04	18.1
PC3 (Mid)	M_2	0.56	0.48	−0.08	14.1
	S_2	0.28	0.18	−0.09	33.3
	K_1	0.11	0.05	−0.06	58.1
	O_1	0.08	0.05	−0.03	32.0
	N_2	0.09	0.05	−0.04	47.3
PC4 (Mid)	M_2	0.71	0.74	0.03	4.2
	S_2	0.30	0.25	−0.05	15.3
	K_1	0.11	0.08	−0.03	25.4
	O_1	0.08	0.07	−0.02	21.6
	N_2	0.15	0.12	−0.02	15.5
PC5 (Mid)	M_2	0.62	0.77	0.15	23.6
	S_2	0.23	0.27	0.04	19.2
	K_1	0.08	0.10	0.02	24.3
	O_1	0.07	0.08	0.00	6.1
	N_2	0.13	0.13	0.00	1.0
PC6 (Surface)	M_2	0.83	0.80	−0.03	3.4
	S_2	0.39	0.26	−0.13	32.3
	K_1	0.12	0.07	−0.05	39.5
	O_1	0.09	0.06	−0.03	34.1
	N_2	0.17	0.11	−0.06	36.3
PC7 (Surface)	M_2	0.61	0.69	0.08	12.5
	S_2	0.25	0.24	−0.01	4.3
	K_1	0.08	0.08	0.00	2.9
	O_1	0.05	0.06	0.01	25.1
	N_2	0.12	0.12	0.00	0.3
PC8 (Surface)	M_2	0.77	0.97	0.19	25.3
	S_2	0.31	0.33	0.02	5.2
	K_1	0.13	0.11	−0.02	14.9
	O_1	0.08	0.07	−0.01	15.3
	N_2	0.14	0.11	−0.03	22.3
PC9 (Surface)	M_2	0.74	0.88	0.14	19.0
	S_2	0.32	0.35	0.03	9.8
	K_1	0.13	0.12	−0.01	7.2
	O_1	0.10	0.12	0.01	13.5
	N_2	0.16	0.20	0.04	22.1

Table 4. Observed and modeled harmonic constants of tide at Mokpo tide station (T1)

Constituent	Semi-range				Phage lag※		
	Obs. (m)	Model (m)	Error (m)	ARE (%)	Obs. (°)	Model (°)	Error (°)
M_2	1.393	1.378	−0.015	1.1	38.3	42.1	3.8
S_2	0.479	0.479	0.000	0.0	88.4	92.0	3.6
K_1	0.302	0.315	0.013	4.3	252.3	253.9	1.6
O_1	0.232	0.251	0.019	8.2	217.8	219.0	1.2
N_2	0.288	0.280	−0.008	2.8	19.1	25.4	6.3
M_4	0.197	0.132	−0.065	33.0	193.5	218.2	24.7
MS_4	0.155	0.134	−0.021	13.6	260.5	292.0	31.5

※The phase lag is referred to 135°E.

여기서 x_m은 모델치이고, x_0는 관측치이다. 절대상대오차는 모델치와 관측치의 절대적인 크기 차이를 백분율로 나타낸 것으로, 그 차이가 작을수록 모델치가 관측치의 절대적인 크기를 잘 재현하는 것을 의미한다.

조석 조화상수 중 M_2와 S_2 분조의 반조차는 0.02 m 미만의 절대 오차와 1% 이하의 절대상대오차를 나타낸다. M_4 분조의 경우, 절대상대오차가 33%로 상대적으로 크지만 오차는 0.07 m이다. 지각의 오차는 1.2~31.5°로, MS_4가 가장 크며, 전반적으로 모델치의 위상이 관측치보다 느리다. 조류 조화상수 중 M_2 조류타원 장축크기의 모델 오차는 –0.08~0.25 m/s이고 절대상대오차의 평균은 16.5%이다. S_2 분조류의 경우에 모델 오차는 –0.13~0.04 m/s이고 절대상대오차의 평균은 14.5%이다.

1개월 정도 관측된 조석과 조류자료로부터 산출된 조화상수에는 계절 및 월 변동이 내포되어 있으며, 이는 전체 운동의 변화, 하계의 성층 형성, 주기가 유사한 인접 분조의 간섭 등에 의하여 발생한다. 특히 조류는 해저지형에 민감하기 때문에 공간변동이 크게 나타나므로(Prandle, 1997), 격자화되어 있는 모델에서 조류를 정확하게 재현하는 것은 한계가 있다. 이러한 점들을 감안하면, 본 모델이 대상 해역의 조석과 조류를 잘 재현하고 있다고 판단된다.

4.1.2 퇴적 검정

퇴적물이동 양상의 재현성을 검토하기 위해 2011년 8월 1일부터 9월 15일까지 죽산보와 하구둑 사이에 위치하는 3개의 하구호 · 하천 정점(R3~R5)과 하구의 2개 정점(YS01, YS03)에서 관측된 부유사 농도를 이용하여 모델 검정을 수행하였으며, 이 과정에서 퇴적 관련 보정계수를 최적화하였다. 하구둑 상류의 부유사 농도 재현은 하구둑 방류 영향을 크게 받는 영산강 하구의 퇴적물이동 모의에 있어서 매우 중요한 요소이다. 하구호의 수위 시계열과 하구호·하천 3개 정점의 부유사농도 시계열을 Fig. 9에, 하구 2개 정점의 조위, 유속, 표층과 저층의 부유사 농도 시계열을 Fig. 10에 모델치와 관측치로 구분하여 제시하였으며, 모델의 입경별 부유사농도도 함께 도시하였다.

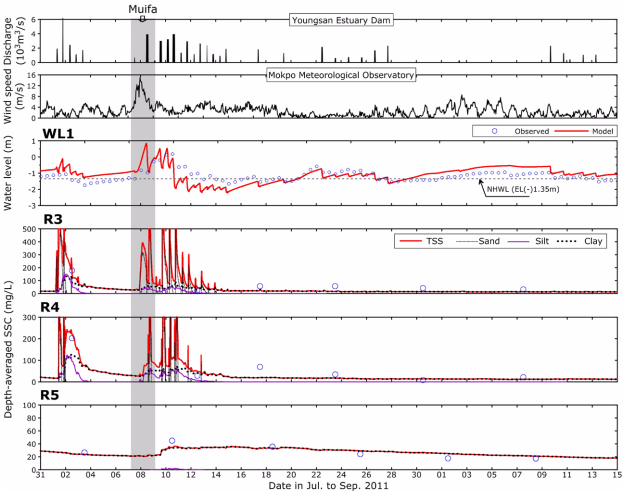


Fig. 9. Comparison of the observed and the modeling results for water level at WL1 and for depth-averaged SSC at R3 to R5, which are located in the upstream of the dam.

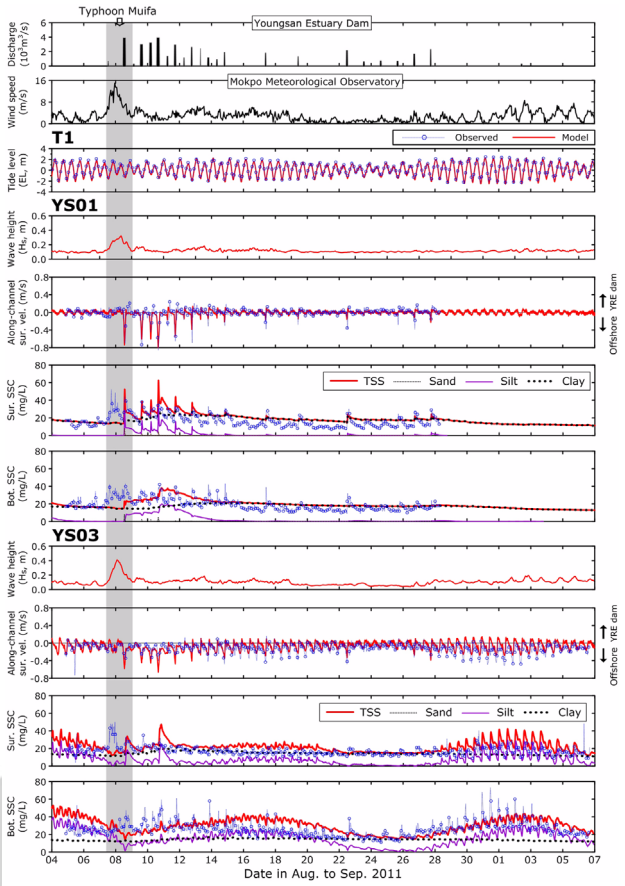


Fig. 10. Comparison of the observed and the modeled tide, current speed and suspended sediment concentration at YS01 and YS03, which are located in the downstream of the dam.

하구호·하천의 수심평균 부유사농도는 물환경정보시스템(http://water.nier.go.kr/)에서 제공하는 8일 간격의 총량측정망 자료이다. 관측농도와 비교할 때, 모델이 증가와 감소 현상을 잘 재현하였으며, 특히 하구둑에 가장 인접한 R5에서는 관측치와 매우 유사한 형태를 나타낸다. 모델결과에 의하면, 하구둑의 대규모 방류시 유속 증가에 의해 높은 농도를 나타내는데, 이러한 양상은 수심이 깊고 폭이 넓은 하류로 갈수록 미약해지고, 미방류시 또는 소규모 방류시에는 낮은 농도로 유지된다. 입경별 농도변화를 보면, 하구둑 방류시 모든 입경의 농도가 증가하며 상대적으로 침강속도가 빠른 모래는 급격한 증가와 감소를 나타내고, 실트와 점토는 수층에서 어느 정도 체류하는 양상을 보인다.

하구의 층별 유속은 ADCP를 이용하여 30분 간격으로 관측된 것이며, 부유사농도는 관측된 ADCP의 후방산란 음향강도로부터 환산된 것이다(국토해양부, 2012a). YS01에서는 하구둑으로부터 대규모 방류시에 유속 증가에 따른 농도 증가를 재현하였으나, 소규모 방류시에는 모델의 유속과 부유

사 농도가 관측치보다 낮으며, 미방류시에는 모델의 부유사 농도가 관측치보다 약간 높게 나타난다. YS03에서 모델 유속은 대규모 방류시에는 관측치보다 강하지만 대체로 관측치보다 약하게 나타나며, 부유사 농도는 표층에서 모델치가 대체로 관측치보다 높으며, 저층에서는 전반 대조기에는 모델치가 관측치보다 높고 후반 대조기에는 대체로 유사한 양상을 보이나 첨두 농도는 관측치보다 낮다. 정점 YS01과 YS03 모두에서 부유사 농도는 관측치에서 나타나는 유속 증가와 감소에 따른 농도 증감을 어느 정도 재현하고 있으나, 창·낙조 농도변화 양상과 첨두 농도는 재현하지 못하고 있으며, 특히 무이파 내습시의 농도 증가가 모델에서 충분하게 재현되지 않았다. 입경별 농도변화를 보면, YS01에서 하구둑 방류시 모래는 급격한 증가와 감소를 나타내고, 실트는 증가 후 어느 정도 유지되며, 점토는 하구둑 방류시 표층에서 약간 증가하지만 전반적으로 큰 변화를 보이지 않는다. YS03의 경우, 수층에서 모래는 거의 나타나지 않으며, 실트는 하구둑 방류와 대·중·소조기 변화에 따라 뚜렷하게 증가 또는 감소하는 양상을 보이며, 점토는 저층에서 일정한 농도를 유지하지만 표층에서는 하구둑 방류시에 약간 증가하는 양상을 보인다.

전술한 유동 검정과 동일한 방법으로 모델치의 오차와 절대상대오차를 계산하고 이를 평균하여 Table 6에 제시하였다. 하구호·하천의 오차 평균은 −10.7~0.2 mg/L, 절대상대오차 평균은 21.4~54.9%로 상류에서 하류로 갈수록 오차와 절대상대오차가 감소한다. 하구의 오차 평균은 1.5~4.6 mg/L, 절대상대오차 평균은 28.0~40.5%로 표층에서 오차가 크고 YS03이 YS01보다 상대적으로 오차가 크다. 하구둑 인근에서는 모델이 관측치를 비교적 잘 재현하였으나, 하구둑으로부터 멀어질수록 모델치가 관측치를 재현하는데 한계를 보였다. 부유사농도 관측치와 모델치 간의 차이는 퇴적물 입경 계급을 세분화하고, 보다 정교한 저면 경계층 모델을 적용할 경우 개선이 가능할 것으로 판단된다.

Table 6. Mean error and mean absolute relative error of modeled suspended sediment concentration

Station	Layer	Nr. of data	Mean error (mg/L)	Mean ARE (%)
R3	Depth-averaged	6	−10.7	54.9
R4	Depth-averaged	6	−5.3	51.3
R5	Depth-averaged	6	0.2	21.4
YS01	Surface	1,124	3.7	45.2
	Bottom	1,124	1.5	28.0
YS03	Surface	1,575	4.6	40.5
	Bottom	1,575	3.7	32.0

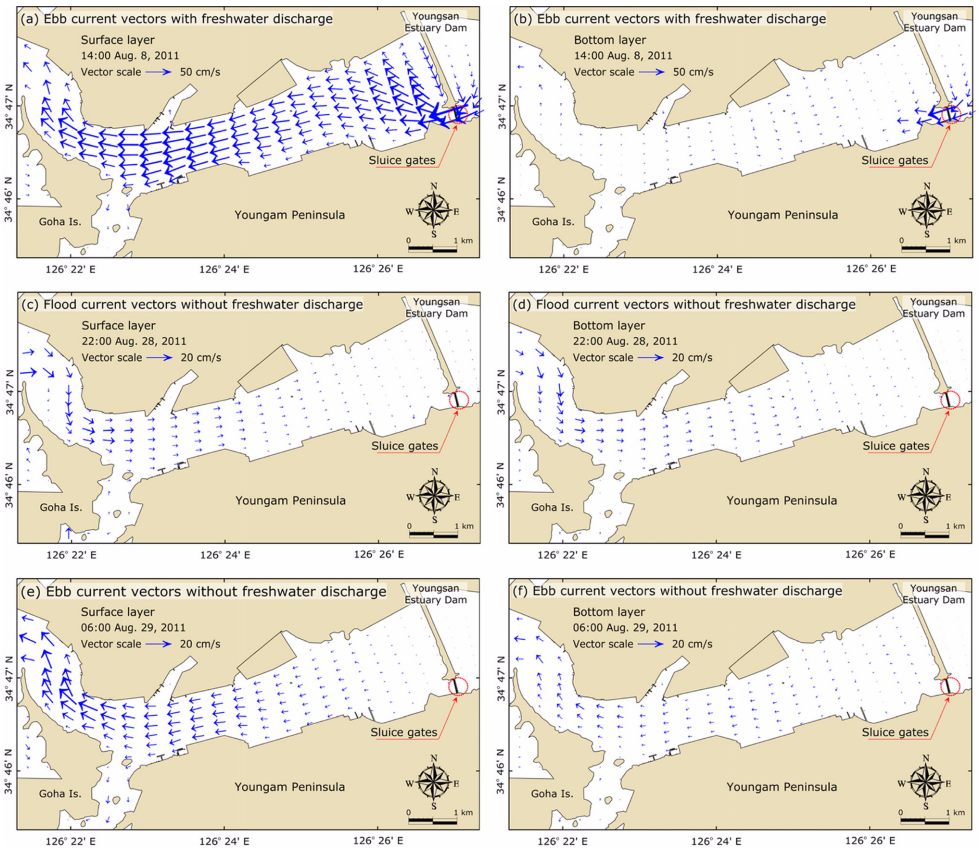


Fig. 11. Current vectors at surface and bottom layer with freshwater discharge from the dam (a and b), and without freshwater discharge (c and d for flood current, and e and f for ebb current).

4.2 하구 유동 특성

영산강 하구는 하구둑 방류시에 미방류시와는 다른 유동특성을 나타내며(이 등, 1995; 정 등, 1999), 하구둑 방류에 의해서 다층 순환구조가 형성되기도 한다(박 등, 2001; Cho et al., 2004; Cho et al., 2009). 이에 본 모델 결과로부터 하구둑 방류가 10회 이상 있었던 2011년 8월의 흐름 및 순환 특성을 검토하였다.

하구둑 방류시 배수갑문 인근에서 강유속이 발생하며, 특히 밀도가 작은 담수는 표층으로 부상하여 외측으로 이동되므로 하구내의 표층 유속이 전반적으로 0.5 m/s 이상 증가하지만, 저층에서는 하구둑 부근에서만 강유속이 발생한다(Fig. 11(a), (b)). 한편, 배수갑문 북측의 표층에서 시계방향의 와류가 형성된다. 하구둑 미방류시에는 낙조시에 고하도 북측 수로에서 0.2 m/s 이상의 흐름을 나타낼 뿐 전반적으로 매우 약한 흐름을 나타내며, 낙조시가 창조시보다 상대적으로 강한 유속을 나타낸다(Fig. 11(c), (d), (e), (f)).

Fig. 12에 제시된 4개 정점에서 2011년 8월의 수직 잔차류 분포에 의하면, 표층에서는 외해로 향하고, 중층과 저층에서는 하구둑으로 향하는 형태를 나타내며, 고하도 북측의 ST3에서는 표층에서 외해방향으로 0.2 m/s 정도의 강한 잔차류 속을 보인다(Fig. 13).

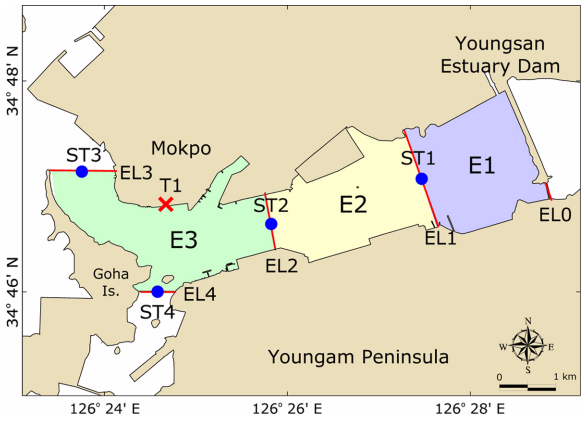


Fig. 12. Locations of some stations (T1 and ST1 to ST4), sections (EL0 to EL4) and segments (E1 to E3) to illustrate the modeling results.

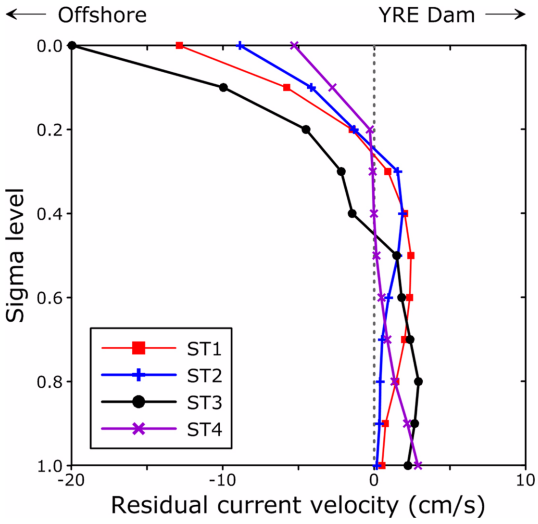


Fig. 13. Vertical profiles of the 31 day-averaged current velocity at stations ST1 to ST4.

4.3 하구 퇴적물이동

4.3.1 하구둑 방류시 부유사농도 변화

하구둑 방류에 따른 영산강 하구내 부유사농도 변화양상을 파악하기 위하여 Fig. 12에 제시된 4개 정점의 표층과 저층 부유사농도 시계열을 비교하였다(Fig. 14). 2011년 8월 8일, 태풍 무이파 통과시 고하도 북측의 파고가 0.6 m 정도까지 증가하였으나, 수심이 깊어서 파고 증가에 따른 농도의 증가는 나타나지 않았다. 표층의 부유사농도는 하구둑 방류시 증가하는데, 하구 내측에서 농도 증가 폭이 상대적으로 크게 나타나며, 미방류시에는 고하도 북측의 ST3에서 창·낙조에 의한 미세한 변화를 나타낼 뿐 그 외의 정점에서는 특징적인 변화를 나타내지 않는다. 저층의 부유사농도는 하구 내측의 ST1에서 방류에 의한 농도 증가 양상이 보이나, 고하도 북측으로 갈수록 방류에 의한 농도 증가보다 대·중·소조기의 유속변화에 따른 농도의 증감양상이 뚜렷해지며, ST3에서 낙조류와 하구둑 방류 영향이 중첩되어 저층에서 고농도가 발생하기도 한다.

4.3.2 하구 퇴적물 수지

Fig. 12에 제시된 5개 단면에서의 퇴적물 이동량(sediment discharge)을 계산하여 Fig. 15에 제시하였다. 또한 5개 단면의 순 퇴적물 이동량(net sediment discharge)을 계산하여 Fig. 12에 제시된 5개 구역에서 입경 계급별 퇴적물 수지를 Fig. 16에 제시하였다. 퇴적물 이동량과 순 퇴적물 이동량은

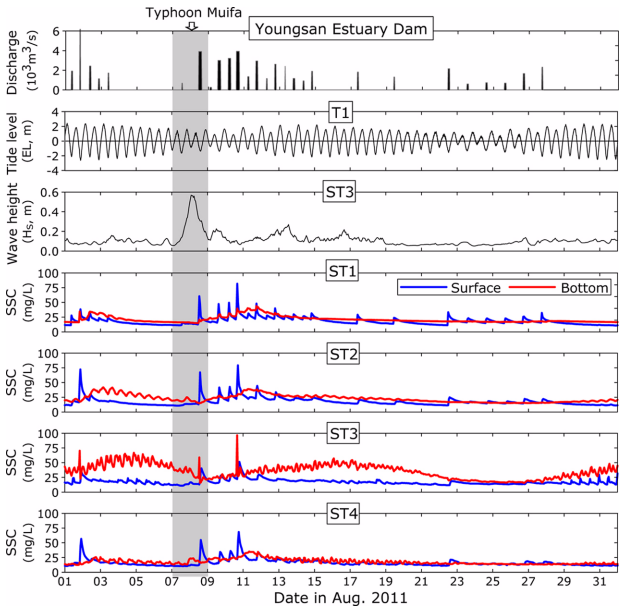


Fig. 14. Modeled tides at T1, significant wave heights at ST3, and SSCs at ST1 to ST4.

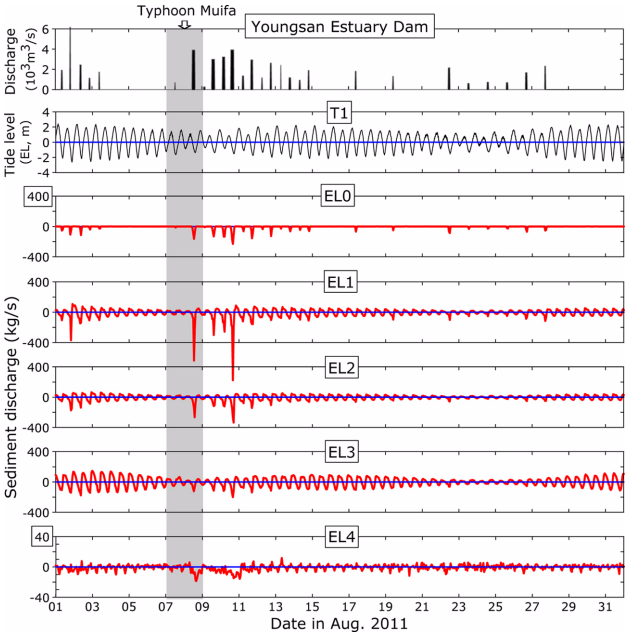


Fig. 15. Time variation of the modeled sediment discharge at sections EL0 to EL4.

1시간 간격으로 추출된 모델 결과를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Sediment\ discharge = SD_t = SSD_t + BSD_t \tag{13}$$

$$SSD_t = \begin{cases} +1 \times B\overline{h_t}\,\overline{C_t}\,\overline{V_t} & during\ flood\ period \\ -1 \times B\overline{h_t}\,\overline{C_t}\,\overline{V_t} & during\ ebb\ period \end{cases} \tag{14}$$

$$BSD_t = \begin{cases} +1 \times B\overline{BL_t} & during\ flood\ period \\ -1 \times B\overline{BL_t} & during\ ebb\ period \end{cases} \tag{15}$$

$$Net\ sediment\ discharge = \sum_{t=0}^{t=31day} SD_t \Delta t \tag{16}$$

여기서 SSD_t는 부유퇴적물 이동량, BSD_t는 소류퇴적물 이동량으로 창조시에 '+'로, 낙조시에 '–'로 설정하였으며, B는 단면 폭, $\overline{h_t}$는 단면평균 수심, $\overline{C_t}$는 단면평균 농도, $\overline{V_t}$는 단면평균 유속, $\overline{BL_t}$는 단면평균 소류사 이동율, Δt는 모델 결과의 출력 시간간격이다. 소류퇴적물 이동은 비점착성 퇴적물인 모래에만 적용된다.

Fig. 15에 의하면, 외해방향으로의 퇴적물 이동량은 하구둑 갑문 전면인 EL0보다 EL1에서 더 크게 나타나며, 이는 하구둑 방류시의 강유속으로 인하여 두 단면 사이 구역에서 침식된 퇴적물이 외측으로 이동하기 때문이다. 퇴적물 이동량의 변화 양상은 외측으로 갈수록 하구둑 방류에 의한 영향보다 대 · 중 · 소조기의 유속 변화에 따른 영향을 받으며, 고하도 동측 수로(EL4)의 퇴적물 이동량이 매우 적다.

Fig. 16에서 보듯이 소류와 부유에 의해 이동되는 모래의 경우, 하구둑으로부터 유입되는 양은 적지만 비교적 많은 양이 하구둑 전면 E1에서 침식·이동되어 E2에 퇴적되며, 하구 내측의 순 퇴적량은 0.1×10^3 ton/month 미만이다. 실트 또한 하구둑으로부터 유입되는 양이 적으며, 하구둑 전면 E1에서 침식·이동되어 E2에 퇴적되지만, 고하도 북측에서 유입된 퇴적물이 E3에 퇴적되어 하구 내측의 순 퇴적량은 9.0 ×

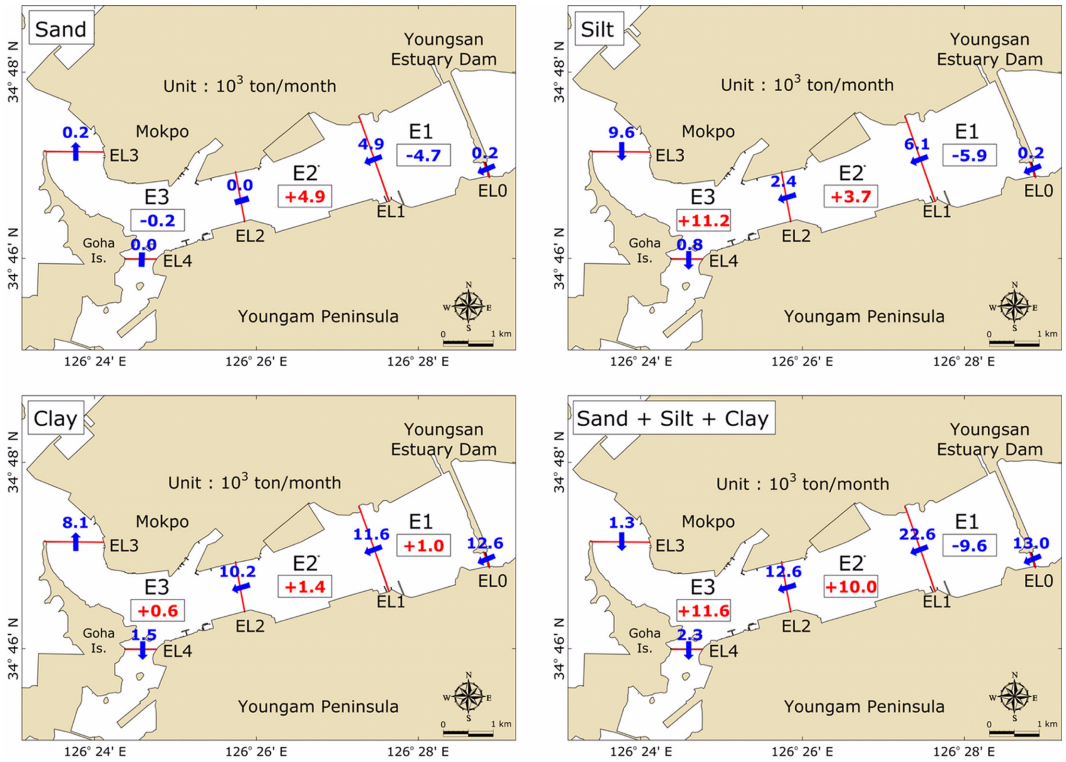


Fig. 16. Modeled sediment budget for each grain-size class in August 2011.

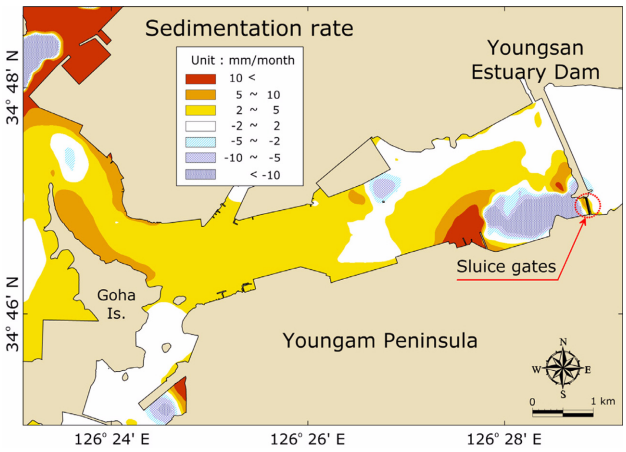


Fig. 17. Modeled sedimentation rate in August 2011.

10^3 ton/month를 나타낸다. 점토의 경우, 하구둑으로부터 유입되는 양이 가장 많지만, 하구 내에 퇴적되지 않고 대부분 외해로 유출되며, 하구 내측의 순 퇴적량은 3.0×10^3 ton/month이다. 전체 입경에 대한 퇴적물 수지를 보면, 하구둑 전면 E1에서는 침식이 발생하지만, E2와 E3에 퇴적이 발생하여, 12.0×10^3 ton/month의 순 퇴적을 나타낸다. 2011년 8월의 공간적인 퇴적율 분포에 의하면(Fig. 17), 하구둑 배수갑문 인근에서 침식된 퇴적물이 인근 전면부에 퇴적되며, 하구 내측에서 전반적으로 2~5 mm/month의 퇴적율을 나타낸다.

영산강 하구의 퇴적은 주로 실트와 점토의 퇴적에 의해서 발생하는데, 이를 공간적으로 명확하게 파악하기 위하여 5개 단면에서 표·중·저층의 퇴적물 순 이동량을 산정하였다(Fig. 18). 모델의 11개 층에서 저층 첫 번째 층부터 4번째 층까지를 저층(Bot.)으로, 5번째 층부터 7번째 층까지를 중층(Mid)으로, 그리고 8번째 층부터 11번째 층까지를 표층(Sur.)으로 정의하였다. 공간적인 퇴적물 순 이동양상을 볼 때, 하구둑으로부터 유입량이 적은 실트는 하구둑 전면 E1에서 침식된 후, 저염의 담수에 의해 표층으로 부상하여 외측으로 이동되지만 침강작용에 의해 일부만 외해로 유출된다. 중층과 저층에서 외해로부터 유입되는 실트는 침강작용에 의해서 내측으로 이동할수록 양이 감소하는 양상을 나타낸다. 점토는 하구둑으로부터 많은 양이 유입된 후, 저염의 담수를 따라 표층으로 부상하여 이동하므로 외해로 갈수록 표층의 이동량이 증가하는 양상을 나타낸다. 또한 실트와 유사하게 중층과 저층을 통해 외해로부터 유입되는 양상이 나타나지만, 침강속도가 매우 느려서 적은 양만 퇴적되고 대부분 내측으로 이동하여 다시 부상하는 양상을 나타낸다. 점토의 순 이동량은 EL1의 표층과 저층에서 외해로 향하고 중층에서 내측으로 향하는데, 이는 해당 단면 부근에서 형성되는 다층 순환 구조(박 등, 2001; Cho et al., 2004; Cho et al., 2009)와 관련이 있는 것으로 보인다. 이러한 결과를 종합할 때, 하계 하구둑 방류에 기인한 하구 순환에 의해 실트 입경 퇴적물의 재분배와 퇴적이 발생하고 있으며, 점토 입경 퇴적물은 하구둑 방류시 많은 양

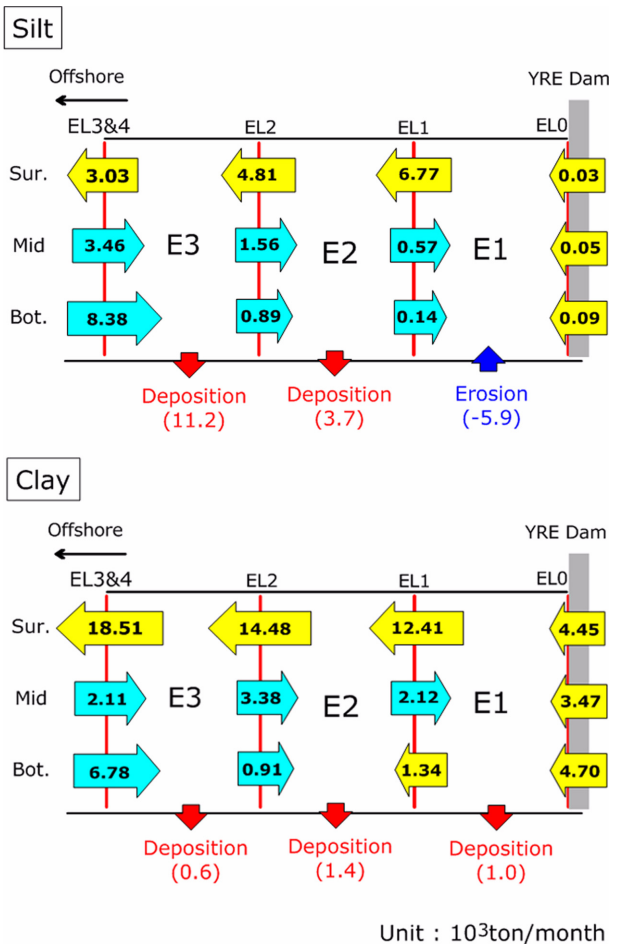


Fig. 18. Modeled sediment budget diagram for silt- and clay-size class in August 2011.

이 유입되지만 침강속도가 느려서 적은 양만이 퇴적되고 표층에서는 외해로, 중·저층에서는 내측으로 향하는 순환을 반복하는 것으로 해석된다.

5. 결 론

하구둑 방류에 의한 영향이 우세한 영산강 하구에서 2011년 하계의 퇴적물 이동양상을 파악하기 위하여 영산강 하구 및 외해 지역과 하구호·하천이 통합된 수치모델을 구축하고, 실시간 외력 및 육상으로부터의 유입 등을 고려하고 다중 입경을 적용한 퇴적물이동 모델링을 수행하였다. 퇴적물 이동 모델의 신뢰성을 확보하기 위해 조석·조류 및 실시간 부유사 농도에 대한 검정을 수행하고, 검정된 모델결과로부터 하구 퇴적물 이동양상과 퇴적물 수지를 정량적으로 분석하였다. 하구둑 부근의 부유사 농도는 방류에 의해 뚜렷하게 변화하는 양상을 보이며, 외측으로 갈수록 대·중·소조기의 유속 증감에 의해서 변화하는 양상이 뚜렷하다. 2011년 8월의 퇴적물 수지에 의하면, 하구둑 전면에서 침식이 발생하지만 외측에서 퇴적이 상대적으로 커서, 하구 전체적으로는 평균적인 퇴적 양상을 보인다. 하구둑 방류에 기인한 하구 순

환에 의해 실트 입경 퇴적물의 퇴적이 우세하게 나타나며, 점토 입경 퇴적물은 하구둑 방류시 많은 양이 유입되지만 침강속도가 느려서 적은 양만이 퇴적되고 표층에서는 외해로, 중·저층에서는 내측으로 향하는 순환을 반복하는 것으로 해석되었다.

본 연구에서는 실시간 외력 조건과 외해 및 육상 유입 조건을 반영하였으나, 시계열 부유사 농도의 재현성은 여전히 개선의 여지가 있다. 특히 퇴적물 입경 계급을 세분화하고, 정교한 저면 경계층 모델을 적용할 경우, 보다 만족스러운 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 과정을 통해 하구-하천-유역 결합 모형의 재현성을 향상시킴으로써 영산강 하구역의 시공간적 퇴적 과정을 더욱 현실적으로 모의하고, 하구환경 개선방안과 추가적인 개발사업에 대한 한층 신뢰성 있는 예측결과를 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구를 위해 퇴적물 관측자료를 제공하여 주신 인하대학교 이관홍 교수님과 유역모델링 결과를 제공하여 주신 (주)하이드로코어의 구본경 박사님, 박민혜 연구원님께 감사드립니다. 또한 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께도 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부 해양환경기술개발사업의 일환인 “하구역종합관리시스템 개발연구(No.20100051)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

강주환 (1996). 하구언 및 방조제 건설에 따른 목포해역의 환경변화. 대한토목학회논문집, 16(II-6), 611-619.

강주환, 문승록 (2000). 조석환경변화를 고려한 목포항의 고극조위 산정. 한국해안 · 해양공학회지 12(4), 203-209.

강주환, 문승록 (2001). 천해조가 발달된 하구에서의 조석과 전파특성. 한국해안 · 해양공학회지 14(3), 201-208.

강주환, 문승록, 박선중 (2005a). 조석확폭에 수반되는 조간대 영역 확대의 영향성. 17(1), 47-54.

강주환, 문승록, 박형섭 (2002a). 천해조가 발달된 하구에서의 소류사이동 특성. 대한토목학회논문집, 22(4-B), 531-538.

강주환, 문승록, 안성모 (2002b). 천해조 및 조간대가 발달된 하구에서의 부유사이동 특성. 한국해안·해양공학회지 14(3), 201-208.

강주환, 문승록, 오남선 (2005b). 서남해안의 해수면 상승. 대한토목학회논문집, 25(2B), 151-157.

강주환, 송재준, 오남선 (1998). 낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석. 대한토목학회논문집, 18(II-2), 185-193.

건설교통부, 익산지방국토관리청 (1999). 영산강 하천정비기본계획(보안).

고영구 (1992). 한국 서남해안의 목포-홍도 간에 발달하는 생물기원 퇴적물에 관한 연구. 한국지구과학회지, 13(4), 510-528.

국립해양조사원 (2010). 목포 부근 연안해역조사 결과보고서.

국립해양조사원 (2011). 2011년 서해남부 연안해역조사 결과보고서.

국토해양부 (2011). 보관리규정(국토해양부훈령, 2011.10.31 제정, 2012. 1.1 시행).

국토해양부, 한국해양과학기술진흥원 (2012a). 하구역 종합관리시스템 개발연구: 영산강 하구역을 중심으로, 2011년 연차실적 계획서.

국토해양부, 한국해양과학기술진흥원 (2012b). 하구역 종합관리시스템 개발연구: 영산강 하구역을 중심으로, II. 모니터링(유동퇴적/수질/생태), 2012년 연차실적 계획서 (세부연구내용).

국토해양부, 한국해양과학기술진흥원 (2012c). 하구역 종합관리시스템 개발연구: 영산강 하구역을 중심으로, III. 모델-IV. 정보, 2012년 연차실적 계획서 (세부연구내용).

김동주, 김주용, 고영구 (1994). 목포부근 해역의 표층퇴적물에 관한 퇴적환경학적인 연구. 한국지구과학회지, 15(1), 60-71.

김영길 (2007). 영산강 하구의 퇴적물 특성과 수심변화. 목포대학교 석사학위논문, 78 pp.

박래환, 조양기, 조철, 선연종, 박경양 (2001). 2000년 여름 영산강 하구의 해수 특성과 순환. 한국해양학회지:바다, 6(4), 218-224.

박효봉, 강기룡, 이관홍, 신현정 (2012). 2010년 여름 담수방류에 의한 영산강 하구의 염분 및 수온 분포 변화. 한국해양학회지:바다, 17(3), 149-159.

서남조선산업개발(주) (2010). 신안조선타운 일반산업단지 조성사업 환경영향평가서.

신용식, 윤보배 (2011). 하구언 건설 전,후의 영산강 하구 식물플랑크톤 군집 및 변화, 한국환경생물학회지, 29(3), 212-224.

오강호 (2007). 영산강 수계 퇴적환경과 지형체계. 한국지형학회지, 14(3), 91-102.

유환수, 류상옥, 유경아 (1996). 한국 남서 연안 사질 퇴적물의 퇴적상. 한국지구과학회지, 17(2), 213-223.

이관수, 이경훈, 이삼노, 박진형 (1995). 하구언 방류가 만내의 해수유동에 미치는 영향. 한국수자원학회 1995년도 학술발표회 논문집, 518~526.

이중우, 신승호 (1991). 영산강지구 대단위간척지 개발로 인한 조석변화에 대한 수치 실험. 한국항만학회지, 5(2). 65-75.

정대득, 이중우, 국승기 (1999). 영산강 하구둑 및 염암-금호방조제 방류에 의한 목포항 주변 수역의 유동변화 및 선박 운용에 미치는 영향에 관한 연구. 한국항만학회지, 13(1), 133-146.

정명선, 정대득, 신승호, 이중우 (1997). 목포해역 개발에 따른 항내 조석변화. 한국항만학회지, 11(1), 113-120.

정태성, 김태식, 정동국 (2006). 목포해역 점착성 퇴적물의 수송에 관한 수치모의. 한국해양환경공학회지, 9(1), 36-44.

정태성, 최종화 (2010). 목포해역 낙조류 우세현상의 수치모의. 한국해안 · 해양공학회논문집, 22(56), 333-343.

(주)지오시스템리서치 (2003). 목포시 관대 국대대체우회도로(고하죽교) 건설공사(T/K) 기본설계 해양조사 및 수치모형실험 보고서.

(주)지오시스템리서치 (2011). 수질예보를 위한 3차원 동적 수리수질모델 개선 연구 최종보고서. 환경부, 국립환경과학원 수질통합관리센터.

최병호 (1984). 영산강하구의 방조제건설에 따른 조위변화. 대한토목학회논문집, 4(2), 113-124.

최종화 (2012). EFDC 모형을 이용한 목포해역 점착성 퇴적물 이동 모의. 한남대학교 석사학위논문, 76 pp.

최종화, 정태성 (2012). 목포해역의 점착성 퇴적물 이동에 관한 2차원 수치모의. 한국해안·해양공학회지 24(4), 287-294.

Ariathurai, R. and Krone, R.B. (1976). Finite element model for cohesive sediment transport, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, pp. 323-338.

Bagnold, R.A. (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Series A, Vol 249, No. 964, 235-297.

Bagnold, R.A. (1966). An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics Geological Survey Prof. Paper 422-I, Washington.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr. and Johanson, R.C. (1997). Hydrological Simulation Program-Fortran: User's manual for version 11. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, Ga., EPA/600/R-97/080, 755.

Bijker, E.W. (1967). Some Considerations about Scales for Coastal Models with Movable Bed. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Bijker, E.W. (1986). Coastal Engineering, Vol. II. Lecture Notes, Delft Univ. Technology, Delft, The Netherlands.

Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 104(C4), 7649-7666.

Bowden, K.F. (1967). Circulation and diffusion. In:G.H.Lauff(ed.). Estuaries. Am. Assoc. Adv. Sci., pp. 15-36.

Byun, D.S. and Wang, X.H. (2005). The effect of sediment stratification on tidal dynamics and sediment transport patterns. Journal of Geophysical Research, 110(C03011), doi:10.1029/2004JC002459.

Byun, D.S., Wang, X.H. and Holloway, P.E. (2004). Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone, Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 59, 185-196.

Byun, D.S., Wang, X.H., Zavatarelli, M. and Cho, Y.K. (2007). Effects of resuspended sediments and vertical mixing on phytoplankton spring bloom dynamics in a tidal estuarine embayment. Journal of Marine Systems, 67, 102-118.

Cho, Y.K., Lee, K.S. and Park, K.Y. (2009). Year-to-year Variability of the Vertical Temperature Structure in the Youngsan Estuary. Ocean and Polar Research, 31(3), 239-246.

Cho, Y.K., Park, L.H., Cho, C., Lee, I.T., Park, K.Y. and Oh, C.W. (2004). Multi-layer structure in the Youngsan Estuary, Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61, 325-329.

Dyer, K.R. (1973). Estuaries: A physical introduction. John Wiley, 140 pp.

Edinger, J.E., Brady, D.K. and Geyer, J.C. (1974). Heat exchange and transport in the environment, Publication No. 74-049-00-3, Electric Power Research Inst., Palo Alto, Calif.

Engelund, F. and Hansen, E. (1967). A Monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 65 pp.

Ganju, N.K. and Schoellhamer, D.H. (2009). Calibration of an estuarine sediment transport model to sediment fluxes as an intermediate step for simulation of geomorphic evolution. Cont. Shelf Res., 29, 148-158.

Garcia, M. and Parker, G. (1991). Entrainment of bed sediment into suspension. J. Hyd. Engrg., 117, 414-435.

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, Williamsbug, VA. pp. 1-40.

Hamrick, J.M. (1994). Application of the EFDC, environmental fluid dynamic computer code to SFWMD Water Conservation Area 2A. A report to South Florida Water Management District. JMH-SFWMD-94-01, J.M.Hamrick, Consulting Engineer, Williamsburg, VA.

Hamrick, J.M. and Moustafa, M.Z. (1996). Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model: 1. Model formulation and physical process representation. In review.

Hwang, K.-N. and Mehta, A.J. (1989). Fine sediment erodibility in Lake Okeechobee. Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Unversity of Florida, Report UFL/COEL-89/019, Gainesville, FL.

James, S.C., Shrestha, P.L. and Roberts, J.D. (2006). Modeling noncohesive sediment transport using multiple sediment size classes. J. Coast. Res, 22(5), 1125-1132.

Kang, J.W. (1999). Changes in Tidal characteristics as a Result of the Construction of Sea-dike/Sea-walls in the Mokpo Coastal Zone in Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 48, 429-438.

Kjerfve, B.J. and Macill, K.E. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoon. Mar. Geol. 88, 187-200.

Krone, R.B. (1975). Effects of physical alterations. In: M. Wiley(ed.). Estuarine processes. Academic Press, 2; 1.

Leenknecht, D.A., Szuwalski, A. and Sherlock, A.R. (1992). Automated coastal engineering system, Technical reference, Version 1.07. U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, J. Oceanogr., 56, 597-581.

Mehta, A.J., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B. and Teeter, A.M. (1989). Cohesive sediment transport. I: Process description. J. Hyd. Engrg.,115(8), 1076-1093.

Mehta, A.J., Parchure, T.M., Dixit, J.G. and Ariathurai, R. (1982). Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, in Estuarine Comparisons, V.S.Kennedy, Ed., Academic Press, New York, 348-362.

Mellor, G.L. and Yamada,T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys.

Space Phys., 20, 851-875.
Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In: Proceedings of the International Association for Hydraulic Structures Research, Report of Second Meeting (Stockholm, Sweden), pp. 39-64.
Nichols, M.M. and Biggs, R.B. (1985). Estuaries. In: R.A.Davis, Jr.(ed.). Coastal sedimentary environments(2nd. ed.). Spring-Verlag, 77-186.
Nichols, M.M. and Poor, G. (1967). Sediment transport in a coastal plain estuary. J. Sed. Pet., 14, 222-234.
Prandle, D. (1997). Tidal currents in shelf seas-their nature and impacts. Progress in Oceanography, 40, 245-261.
Prichard, D.W. (1967). What is estuary: Physical viewpoint. In: G.H.Lauff(ed.). Estuaries. Am. Assoc. Ad. Sci., 3-5.
Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. and Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 2. Verification. Journal of Geophysical Research, 104(C4), 7667-7681.
Sanford, L.P. and Maa, J.P.-Y. (2001). A unified erosion formulation for fine sediments. Mar. Geol., 179, 9-23.
Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primative equations, I. The basic experiment. Mon. Weather Rev., 91, 99-164.
Smith, J.D. and McLean, S.R. (1977). Spatially averaged flow over a wavy bed. J. Geophys. Res., 82, 1735-1746.
Tetra Tech Inc. (2007). The Environmental Fluid Dynamics Code, Theory and Computation, Volume 2: Sediment and Contaminant Transport and Fate.
Tolman, H.L. (1991). A third-generation wave model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. Journal of Physical Oceanography, 21, 782-797.
U.S. Army (2008). Coastal Engineering Mannual, Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate, EM 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
van Rijn, L.C. (1984a). Sediment transport, Part I: Bedload transport. J. Hyd. Engrg., 110, 1431-1455.
van Rijn, L.C. (1984b). Sediment transport, Part II: Suspended load transport. J. Hyd. Engrg., 110, 1613-1641.
van Rijn, L.C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands.
Villaret, C. and Paulic M. (1986). Experiments on the erosion of deposited and placed cohesive sediments in an annular flume and a rocking flume. Coastal and Oceanographic Engineering Dept., University of Florida, Report UFL/COEL-86/007, Gainesville, FL.
Wu, W., Wang, S.Y. and Yia, Y. (2000). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. J. Hyd. Res., 38, 427-434.

원고접수일: 2013년 3월 25일
수정본채택: 2013년 4월 9일
게재확정일: 2012년 4월 12일

부 록

부록 1. 저면 전단응력 계산

파랑과 흐름의 상호작용에 의한 해저 전단응력(τ_b)와 전단속도(u_*)는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_b = \tau_c + \tau_w, \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \tag{1}$$

여기서, τ_c: 흐름에 의한 저면 전단응력(N/m^2)

τ_w: 파랑에 의한 저면 전단응력(N/m^2)

먼저 파랑의 영향이 없는 저면에서 흐름에 의해 가해지는 전단응력(τ_c)은 다음과 같이 계산된다(Bijker, 1986).

$$\tau_c = \frac{1}{8}\rho f_c V^2 \tag{2}$$

여기서, f_c : 흐름에 의한 해저면 마찰 계수(–)

$$f_c = \frac{8g}{C^2} = 0.24\left\{\log\left(\frac{12h}{k_s}\right)\right\}^{-2}$$

C : Chézy 계수($m^{0.5}/s$)

$$C = 18log\left(\frac{12h}{k_s}\right)$$

k_s : 해저면 조도(m)

V : 수심 평균 유속(m/s)

파랑에 의해 저면에 가해지는 전단응력(τ_w)은 다음과 같이 계산된다(van Rijn, 1993).

$$\tau_w = \frac{1}{4}\rho f_w U_\delta^2 \tag{3}$$

여기서, f_w: 파 마찰계수(≤ 0.3)(–)

$$f_w = \begin{cases} \exp\left[-6 + 5.2(A_\delta/k_s)^{-0.19}\right] & \text{if } A_\delta/k_s > 1.57 \\ 0.3 & \text{if } A_\delta/k_s \leq 1.57 \end{cases}$$

U_δ: 파 경계층에서 파랑에 의한 수립자의 최대 유속(m/s)

$$U_\delta = \omega A_\delta = \frac{2\pi}{T_w}A_\delta$$

A_δ: 파 경계층에서 파랑에 의한 수립자의 최대 이동거리(m)

$$A_\delta = \frac{H}{2\sinh(\vec{k}h)}$$

T_w 파 주기(s^{-1})

H : 파고(m)

$\vec{k}$: 파수(m^{-1})

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{L}$$

L : 파장(m)

부록 2. 소류사 이동량 계산

파랑의 쇄파 여부에 따른 소류사 이동량의 변화를 고려할 수 있는 Bijker 식은 다음과 같다(Bijker, 1967).

$$J_b = Ad_{50}\frac{V}{C_{d50}}\sqrt{g}exp\left[\frac{-0.27(s-1)d_{50}\rho_w g}{\mu\tau_b}\right] \quad (4)$$

여기서, J_b : 퇴적물 이동량(공극 포함)($g/s{\cdot}m$)

A : 경험계수로서 3개 지역으로 구분하여 적용함

쇄파대 외측($H/h < C_d$) : $A = BD(\simeq 1)(-)$

천이구역($C_d \le H/h < C_s$)

: $A = BD + \frac{H/(h-C_d)}{C_s - C_d}(BS - BD)(-)$

쇄파대 내측($H/h \ge C_s$) : $A = BS(\simeq 5)(-)$

C_d : 쇄파대 외측에서 상대파고(H/h)의 최대치 ($\simeq 0.05$)(–)

C_s : 쇄파대 내측에서 상대파고(H/h)의 최소치 ($\simeq 0.4$)(–)

d_{50} : 중앙입경(누적무게비 상위 50%에 해당하는 입자의 직경)(m)

s : 퇴적물의 비중(–)

μ : 사련(ripple)의 계수(–)

$$u = \left(\frac{C}{C_{d90}}\right)^{1.5}$$

C_{d90}: d_{90}에 기초한 Chézy 계수($m^{0.5}/s$)

d_{90} : 누적 무게비가 상위 10%에 해당되는 입자의 직경(m)

소류사 이동량 공식에 의해서 산정된 소류사 이동량은 Bagnold(1966)의 경사 계수(slope factor, α_s)를 적용하여 다음과 같이 보정된다.

$$J_{b,slope} = \alpha_s J_b \quad (5)$$

여기서, $J_{b,slope}$: 저면경사 보정 후 소류사 이동량($g/s{\cdot}m$)

α : 경사 계수(slope factor)(–)

$$\alpha = \frac{\tan\varphi}{\cos\beta(\tan\varphi \pm \tan\beta)}$$

(오르막 경사: +, 내리막 경사: –)

φ : 안식각(angle of repose)(^{o})

β : 이동 방향의 저면 경사(^{o})

부록 3. 침식 한계 전단응력 계산

침식한계 전단응력(τ_{cr})과 침식한계 전단속도($u_{*,cr}$)는 모래 함량비와 연관된 전밀도를 통해서 계산된다(Villaret and Paulic, 1986).

$$\tau_{cr} = \zeta(\rho_b - 1),\ u_{*,cr} = \sqrt{\frac{\tau_{cr}}{\rho_w}} \quad (6)$$

$$\rho_b = \rho_w + \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s}\right)\rho_d \quad (7)$$

$$\rho_d = 480\xi + (1300 - 280\xi)P_{sand}^{0.8} \quad (8)$$

여기서, ρ_b : 전밀도(g/cm^3)

ζ : 실험상수(–)

ρ_d : 건조 밀도(g/cm^3)

P_{sand} : 모래 함량비(0.0-1.0)(–)

ξ : 압밀계수(0-2.4)(–)

View publication stats