

EFDC를 이용한 군산항의 유사 퇴적고 계산에 관한 연구

A Study on the Sediment Deposition Height Computation at Gunsan Port Using EFDC

이동주* / 박영기**

Lee, Dong Joo / Park, Young Ki

Abstract

This paper was considered on the applicability of EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012) to calculate Gunsan Port sediment deposition height efficiently and to use for grasping its aspects quantitatively and providing its prevention measures reasonably based on well-known 3-dimensional EFDC sediment transport module. This model was calibrated and verified with various measured field data of A Report of Hydrological Variation on Kum River Estuary (2004). Due to the model calibration and relevant literature investigation for cohesive sediment parameters, settling velocity (WS), critical deposition stress (TD), reference surface erosion rate (RSE), critical erosion stress (TE) were identified as $2.2E-04 \text{ m/s}$, 0.20 N/m^2 , $0.003 \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$, 0.40 N/m^2 respectively on this model. In order to examine the applicability and precision of the model computation, the calculated model data of sediment deposition height at 13 stations for 71 days and suspended-sediment concentration at 2 stations, inner port and outer port for 15 days were compared and analyzed with the measured field data. As a result, the model applicability for sediment deposition height simulation was evaluated as NSE coefficient 0.86 and the precision for suspended-sediment concentration computation was evaluated as time averaged relative error (RE) 23%.

Keywords : Gunsan Port, EFDC, sediment deposition height, settling velocity, critical deposition stress, reference surface erosion rate, critical erosion stress

요지

본 논문은 군산항의 유사퇴적 현상을 정량적으로 파악하고 그에 합리적인 대책을 마련하는데 활용하기 위해, 잘 알려진 EFDC 3차원 유사이송모형을 기초로 군산항의 퇴적고를 효율적으로 계산하기 위한 EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012)의 적용성에 대해 고찰하였다. 본 모형은 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)의 여러 현장 관측치를 가지고 검정 및 검증을 수행했다. 검정 및 문헌조사를 통해, 본 모형의 점착성토사 침강속도(WS, Settling velocity), 퇴적한계전단응력(TD, Critical deposition stress), 기준침식률(RSE, Reference surface erosion rate), 침식한계전단응력(TE, Critical erosion stress)은 각각 $2.2E-04 \text{ m/s}$, 0.20 N/m^2 , $0.003 \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$, 0.40 N/m^2 으로 확인되었다. 그리고 모형의 적용성을 검토하기 위해, 군산항의 13정점의 퇴적고(71일) 및 내항과 외항 정점의 부유사농도(15일)의 모형 계산치와 현장 관측치를 비교 검토했다. 그 결과 퇴적고 계산을 위한 모형의 적용성은 NSE계수가 0.86, 부유사농도 시간평균 상대오차(RE)가 23%로 평가되었다.

핵심용어 : 군산항, EFDC, 유사퇴적고, 침강속도, 퇴적한계전단응력, 기준침식률, 침식한계전단응력

* 교신저자, 군산대학교 토목공학과 교수 (e-mail: djlee@kunsan.ac.kr, Tel: 063-469-4754)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kunsan National Univ., Kunsan 573-701 Korea

** 전북대학교 토목공학과 교수 (e-mail: parkyk@jbnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756 Korea

1. 서 론

우리나라 서해안에 위치한 군산항은 대 중국 교역항과 새만금 근접한 항만으로 앞으로 국가발전과 지역사회 발전을 위해 중요한 역할을 담당할 것이다. 원래 군산항은 수심이 얕고 조석 간만의 차가 크며 하구라는 자연 환경으로 인하여 해황이 복잡하고 항내 토사 퇴적이 큰 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 1990년부터 최근까지 도류제 공사 방파제공사, 금강하구둑공사 등 대규모 건설공사가 끊임없이 이루어 져서 군산항 인근의 유황이 변하고 퇴적이 크게 발생하였다. 그래서 항내 수심을 유지하기 위해 연평균 내항 10 cm/yr, 외항 66 cm/yr 이상의 준설이 요구되고 있다. 군산항의 퇴적현상을 파악하기 위한 연구는 항내 퇴적방지를 위한 종합적인 대책을 세우기 위해 수년간의 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004, 2010)에서 현장 실측과 수치실험 및 분석결과를 찾아 볼 수 있다. Kim (2002)은 금강하구에 대한 수년간 연구 조사에 대한 종합 분석을 했으며, 여기서 군산항의 퇴적물 이동에 관한 주요 수치실험에 대한 분석 결과를 보면, 금강하구에서 퇴적물의 이동을 일으키는 기본 외력은 조류, 하계홍수 및 동계의 파랑이 계절별 퇴적특성을 결정하는 요인으로 보았다. 그리고 흐름과 파랑을 별도의 모형으로 계산하고 그 다음 부유사 이동과 소류사 이동 및 퇴적고 계산을 각각의 별도의 모형으로 계산하였다. 즉 유동계산은 LNH-EDF(프랑스 전력공사 국립 수리시험소)와 SOGREAH가 공동 개발한 2차원 수심 평균모델인 Cythere를 사용했고, 파랑은 섭동법으로 유도된 천수방정식 Lee (1998)를 기초한 2차원 CPWAVE모형을 사용하여 계산하고, 부유사퇴적 계산은 퇴적물의 부상(resuspension), 이류(advection) 및 침강(settling)을 고려한 2차원 연직수심적분 물질수송모형을 사용하고, 소류사 이동과 퇴적고 계산은 흐름과 파랑을 동시에 고려할 수 있는 Bijker (1967)의 식을 사용하였다. 또 Suh (2004)는 금강하구의 퇴적변화 및 선박통행지장에 대해 모의실험하기 위해 유한요소모형으로 비선형 조석을 모의하는 2차원 TEAnl모형을 적용하여 환경변화에 대한 유동 및 해저마찰충력 변화를 정량적으로 평가하여 퇴적변화를 해석한 바 있다. 지금까지 군산항 및 금강하구에 대한 퇴적계산은 2차원 퇴적모형이 사용되었고, 흐름, 파랑, 부유사, 소류사 및 퇴적고 계산을 각각 별도의 모형으로 중앙입경(D_{50})을 토사 대표입경으로 사용하여 계산하였다. 그런데 2차원 중앙입경 퇴적모형은 금강하구역과 같이 담수 유입 및 외해와 강으로부터 여러 등급의

토사가 유입되는 복잡한 수리현상과 퇴적과정을 반영하여 유사 퇴적고를 계산하는데 한계가 있고, 그 계산이 여러 과정으로 나누워 있어 번잡하여 능률이 저하된다. 그래서 실제 현상에 보다 접근할 수 있고 보다 효율적인 퇴적고 계산을 위해 3차원 다중 입경모형이 유용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 군산항의 퇴적고를 보다 정확하고 효율적으로 산정하기 위해 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code, Hamrick) 3차원 퇴적모형을 기본으로 통합 모형인 EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012)를 구성하고 그 적용성을 검토하고자 한다.

본 연구에서 수립한 퇴적모형의 검정 및 검증은 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)에 게재된 조석, 조류, 부유사 농도, 하구둑 유출량, 해저질 입도분포, 퇴적고 현장 관측자료를 인용한다. 모형의 검증 항목 및 정점 수는 조위 및 조류는 2개소, 퇴적고는 13개소, 부유사농도는 2개소 정점을 설정하고, 모형의 적용성은 현장 관측치와 모형 계산치를 비교하여 유동 및 퇴적고의 경우는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 계수 및 평균제곱근오차(RMSE)로 나타내고, 그리고 부유사 농도는 시간평균 상대오차(RE)로 나타낸다.

2. EFDC 퇴적모형 기본식

2.1 EFDC 모형의 개요

EFDC는 미국 버지니아 해양연구소에서 1992년에 처음 개발하여 2007년에 완성된 연구용으로 인터넷에 소스 코드가 일반인에게 공개된 환경해석을 위한 종합 수치모형이다.

EFDC모형의 특징은 동수역학, 질량수송, 수질해석이 통합된 3차원모형으로써 곡선-직교좌표계 사용과 가변격자 소영역의 분할이 가능하다. 간사지(tidal flat) 처리 및 식생 피복저항과 수리구조물 해석이 가능하며 프로그램 구조가 모듈형식으로 구성되어 있어 모형을 특정지역에 적용시킬 경우 소스 프로그램을 수정하지 않고 주 입력파일(edc.inp)을 중심으로 기타 입력파일들을 그 지역에 맞게 새로 작성하여 모형을 운영할 수 있다. 현재 United States Environmental Protection Agency와 Tetra Tech. Inc. 및 Dynamic Solution Inc.에 의해 개발 관리되고 있고, 전 세계적으로 환경동역학 문제를 연구하고 해결하는데 활용되고 있다.

EFDC모형의 기본 물리학과 수치계산 방식은 Blumberg-Meller 모형(Blumberg and Meller, 1987)과 미공병단의

Chesapeake Bay 모형과 유사하다. EFDC 모형은 가변 밀도흐름에 대해 수직적으로 정수압을 가정하며, 자유수면, 그리고 난류 평균의 3차원 운동방정식의 해를 구한다. 운동방정식에 동역학적으로 연결된 난류 운동에너지, 난류 길이 스케일, 염도, 그리고 온도 이송 방정식 또한 함께 풀이 된다. 또한 부유물질 또는 용존물질에 대한 Eulerian 및 Lagrangian 이송방정식도 함께 풀이가 가능하다. EFDC 모형은 유체의 이동, 염분 및 온도와 함께 흡착성 및 비흡착성 부유물질의 이동과 하상 및 해저 퇴적물질량을 계산하여 퇴적고를 계산할 수 있도록 구성되어 있다. 퇴적토사 이송 모듈의 특징은 점착성토사(점토+실트) 최대 2개 등급과 비점착성토사(모래) 4개 등급까지 입경 크기별로 나누어 부유사 농도나 퇴적토사 이동량 및 퇴적고를 시간과 공간적으로 계산할 수 있고, 주요 매개변수인 침강속도, 퇴적 또는 침식 한계전단응력도 토사등급별로 일정한 현장 및 실험값이나 여러 경험식들을 이용하여 선정할 수 있도록 준비되어 있다. 개방경계에서 유입토사량은 시계열 수직 농도분포로 입력하며, 유사이송에 미치는 파의 영향은 시계열 풍자료(풍향, 풍속)를 입력하거나 별도의 파랑모형으로부터 파특성 자료(파고, 주기)를 입력하도록 구성되어 있다.

2.2 유사 퇴적모형 기본식

EFDC 모형의 퇴적 유사 이동 모듈은 해수유동 모듈과 연계하여 운용된다. 수평면에 곡선-직교 좌표계와 수직면에 시그마 좌표계(sigma coordinates)를 사용하여 지배 방정식을 Hamrick (1992a, b)와 Tetra Tech, Inc. (2007a, b) 참고하여 나타내면 EFDC모형에서 계산되는 x, y 방향의 운동량 방정식은 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H u) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) \\ & + \partial_z(m_x m_y w u) - f_e m_x m_y H v \\ & = -m_y H \partial_x(p + p_{atm} + \emptyset) + m_y (\partial_x z_b^* + z \partial_x H) \partial_x p \\ & + \partial_z(m_x m_y \frac{A_V}{H} \partial_z u) + Q_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y H v) + \partial_x(m_y H u v) + \partial_y(m_x H v v) \\ & + \partial_z(m_x m_y w v) + f_e m_x m_y H u \\ & = -m_x H \partial_y(p + p_{atm} + \emptyset) + m_x (\partial_y z_b^* + z \partial_y H) \partial_y p \\ & + \partial_z(m_x m_y \frac{A_V}{H} \partial_z v) + Q_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$m_x m_y f_e = m_x m_y f - u \partial_y m_x + v \partial_x m_y \quad (3)$$

$$(\tau_{xy}, \tau_{yz}) = A_V H^{-1} \partial_z(u, v) \quad (4)$$

여기서, u, v 는 각각 곡선-직교 좌표계로 x,y방향의 유속 성분이다. m_x, m_y 는 평면좌표의 축척계수(scale factors)를 표시한다. w 는 σ 연직좌표 z 의 속도성분이다. 자유수면과 바닥의 물리적 연직좌표는 각각 zs^* , zb^* 이다. 총 수심은 H 이고, 자유수면 포텐셜은 \emptyset 는 gzs^* 와 같다. 유효 코리올리스 가속도 f_e 는 Eq. (3)에 의해 곡률가속도항에 포함된다. Eqs. (1) and (2)에서 Q 항은 선택적 수평 운동량 확산항을 표시한다. 수직 난류 점성계수 A_V 는 Eq. (4)에 의해 수평방향 속도성분의 수직전단응력과 해저전단응력이 관련되어 있다. 물의 밀도를 기준으로 하는 동압력은 $patm$ 이고, 수주의 초과 정수압은 다음 식으로 구한다.

$$\partial_z p = -g H b = -g H (\rho - \rho_o) \rho_o^{-1} \quad (5)$$

여기서, ρ 와 ρ_o 는 실제와 기준 물의 밀도이고, b 는 부력이다. 운동량 방정식 풀이를 위한 수직 경계조건은 바닥($z=0$)과 수면($z=1$)에서 각각 다음식과 같이 마찰응력이 기초가 된다.

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u_1 v_1) \quad (6)$$

그리고

$$(\tau_{xz}, \tau_{yx}) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_w^2 + V_w^2} (U_w, V_w) \quad (7)$$

여기서, U_w, V_w 는 수면 위 10m 지점의 x, y방향 풍속성분(m/sec)을 나타낸다. 첨자 1은 바닥 수층의 중간지점의 유속을 표시한다. 해저의 항력계수는 다음식과 같다.

$$c_b = \left(\frac{k}{\ln(\Delta_1/2z_o)} \right)^2 \quad (8)$$

여기서, k 는 Karman 상수이고, Δ_1 은 무차원 저층 두께이고, $z_o = z_{0*}/H$ 는 무 차원 조도이다. 바람 수면마찰계수는 풍속을 대입하여 다음 식으로 구한다.

$$c_s = 0.001 \frac{\rho_a}{\rho} (0.8 + 0.065 \sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad (9)$$

여기서, ρ_a 는 각각 공기의 밀도이다. 다음에 부유사에 대한 3차원 수송방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& \partial_t(m_x m_y H C) + \partial_x(m_y H u C) + \partial_y(m_x H v C) \\
& + \partial_z(m_x m_y w C) - \partial_z(m_x m_y W_S C) \\
& = \partial_x\left(\frac{m_y}{m_x} H K_H \partial_x C\right) + \partial_y\left(\frac{m_x}{m_y} H K_H \partial_y C\right) \\
& + \partial_z\left(\frac{m_x m_y}{H} K_V \partial_z C\right) + S_C
\end{aligned} \tag{10}$$

여기서, C는 부유사 농도(mg/L)이고, K_H 와 K_V 는 수평과 수직 난류 확산계수(m^2/s)이고, W_S 는 침강속도(m/s)이고, S_C 는 부유사의 생성/소멸항을 나타낸다. 모형이 3차원 모의를 구성할 때, Eq. (10)에서 수평 질량 확산항 K_H 는 일반적으로 수치해석에서 생략된다.

운동량방정식과 이송방정식에서 난류 점성계수와 확산계수는 각각 난류폐쇄모델(Galperin et al., 1988; Meller and Yamada, 1982)을 사용하여 결정된다. 시그마-곡선적 교좌표계의 3차원 연속방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& \partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) \\
& + \partial_z(m_x m_y w) = Q_H + \delta(0)(Q_{ss} + Q_{sw})
\end{aligned} \tag{11}$$

여기서, Q_H 는 강우량, 증발산량, 침투량과 무시할만한 운동량 플럭스를 갖는 측면 유입유량과 유출유량을 포함하는 체적 생성/소멸항을 표시한다. 그리고 Q_{ss} 와 Q_{sw} 는 퇴적고 계산 모드에서 해저면에서 수주에로 토사 및 물의 순플럭스(net flux)를 나타낸다. 델타 함수, $\delta(0)$ 는 이들 플럭스가 수주 저층에 유입함을 나타내 준다. Eq. (11)을 수심에 걸쳐 적분하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
& \partial_t(m_x m_y H) + \partial_x(m_y H \bar{u}) + \partial_y(m_x H \bar{v}) \\
& = \bar{Q}_H + Q_{ss} + Q_{sw}
\end{aligned} \tag{12}$$

퇴적고 계산 모드에서 수주 연속방정식은 토사이동상에 대한 겉보기 체적 연속방정식과 연계된다.

$$\partial_t(m_x m_y B) = Q_{GW} - Q_{ss} - Q_{sw} \tag{13}$$

여기서, B는 토사이동상의 총 두께이고, Q_{GW} 는 토사이동상에 유입한 지하수 유량이다. 해저면 표고는 다음 식으로 정의된다.

$$\eta = B + Z_{bb}^* \tag{14}$$

Eq. (14)에서 Z_{bb}^* 는 시간에 따라 변하지 않으면 Eq. (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\partial_t(m_x m_y \eta) = Q_{GW} - Q_{ss} - Q_{sw} \tag{15}$$

Eqs. (12) and (15)를 합하면, 다음 식과 같다.

$$\partial_t(m_x m_y \zeta) + \partial_x(m_y H \bar{u}) + \partial_y(m_x H \bar{v}) = \bar{Q}_H + Q_{GW} \tag{16}$$

여기서, 수면고 ζ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\zeta = Z_S^* = H + \eta \tag{17}$$

2.3 유사의 퇴적 및 침식량 계산식

점착성 및 비점착성 유사의 퇴적(deposition)과 재부유량(resuspension) 또는 침식량(erosion)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_C = S_E - S_D \tag{18}$$

여기서, S_C : 수주내의 부유사의 생성/소멸량

S_D : 단위시간, 단위면적당 저면에 퇴적량

S_E : 단위시간, 단위면적당 저면으로부터 침식량 수주로부터 저면에 퇴적토사의 플럭스 S_D 는 다음과 같다.

$$S_D = P_s W_s C \tag{19}$$

여기서, P_s 는 퇴적확률이고, C는 수주 유사농도이다. 점착성토사($D < 200 \mu\text{m}$)에 대해 Krone (1962)는 다음 식을 제안하였다.

$$P_s = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} & : \tau_b \leq \tau_d \\ 0 & : \tau_b > \tau_d \end{cases} \tag{20}$$

다음에 비점착성토사($D \geq 200 \mu\text{m}$)에 대해, Gessler (1967)는 P_s 를 Gaussian분포 또는 오차함수로 나타내었다.

$$P_s = \text{erf}\left(\frac{Y}{2}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{Y/2} \exp(-\xi^2) d\xi \tag{21}$$

여기서,

$$Y = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\tau_d}{\tau_b} - 1 \right) \tag{22}$$

여기서, $\sigma=0.57$: 전단응력변량에 대한 표준편차이다. 만일 $Y < 0$ 이면, 다음 식을 사용한다.

$$P_s(Y) = 1 - P_s(|Y|) \tag{23}$$

다음 저면으로부터 수주에로 퇴적물 플럭스 S_E 는 다음

과 같이 침식률과 해저면에 가해지는 전단응력(τ_b) 그리고 침식한계 전단응력(τ_{ce})의 함수로 나타낼 수 있다.

$$S_E = \frac{dm_e}{dt} \left(\frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right)^\beta : \tau_b \geq \tau_{ce} \quad (24)$$

여기서, τ_b 는 해저면에 가해지는 전단응력(N/m^2)으로 수류에 의한 마찰응력으로 결정된다. 그리고 퇴적 및 침식한계 전단응력(N/m^2) τ_d 와 τ_{ce} 는 점착성 토사의 경우, 지역의 토사 특성에 따라 보통 현장 또는 실험실 측정치를 참고하여 τ_d 는 $0.06\sim1.1 N/m^2$, τ_{ce} 는 $0.1\sim1.0 N/m^2$ 범위의 상수로 결정한다. 그리고 β 는 실험상수로 보통 1.0을 취한다. 토사의 침강속도 $W_s(m/s)$ 는 점착성 토사의 경우, 경험적 상수로 $0.1E-04\sim2.5E-04 m/s$ 범위, Hwang and Mehta (1989), Shrestha and Orlob (1996), Ziegler and Nisbet (1995)의 계산식들 중에서 선택적으로 사용할 수 있다. 그리고 기준 침식률 dm_e/dt 도 역시 경험적 상수로서 $0.0005\sim0.1 g/s \cdot m^2$ 범위의 값을 사용한다. 비점착성 토사의 경우, 토사의 침강 속도는 van Rijn (1984b)의 식으로 결정하고, 침식한계 전단응력, 무차원 한계소류력을 van Rijn (1984a), Garcia and Parker (1999), Smith and Mclean의 계산식들 중에서 하나로 결정할 수 있다.

2.4 유사 이동량 계산식

본 퇴적모형에서 등급별 소류사량을 구하는 일반식은 다음과 같다.

$$\frac{q_B}{\rho_s d^2 \sqrt{g' d}} = \Phi(\theta, \theta_{cs}) \quad (25a)$$

$$g' = g \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \quad (25b)$$

$$\theta = \frac{\tau_b}{g' d} = \frac{u_*^2}{g' d} \quad (25c)$$

여기서, q_B 는 흐름방향의 소류사량($Kg/s/m$)이고, Φ 함수는 Meyer-Peter and Müller와 Bagnold의 식이 있으나, 다음의 van Rijn (1984a)식을 본 퇴적모형에서 사용한다.

$$\Phi = \phi(\theta - \theta_{cs})^{2.1} \quad (26a)$$

$$\phi = \frac{0.053}{R_d^{1/5} \theta_{cs}^{2.1}} \quad (26b)$$

Φ 함수는 다음식으로 나타내지는 한계 소류력 θ_{cs} 와 레이놀드수 R_d 와 관계한다.

$$\theta_{cs} = \frac{\tau_{cs}}{g' d} = \frac{u_{*cs}^2}{g' d} = f(R_d) \quad (27a)$$

$$\theta_{cs} = \begin{cases} 0.24(R_d^{2/3})^{-1} & : R_d^{2/3} \leq 4 \\ 0.14(R_d^{2/3})^{-0.64} & : 4 \leq R_d^{2/3} < 10 \\ 0.04(R_d^{2/3})^{-0.1} & : 10 \leq R_d^{2/3} < 20 \\ 0.013(R_d^{2/3})^{0.29} & : 20 \leq R_d^{2/3} < 150 \\ 0.055 & : R_d^{2/3} \geq 150 \end{cases} \quad (27b)$$

$$R_d = \frac{d \sqrt{g' d}}{\nu} \quad (27c)$$

3. 군산항에 EFDC 퇴적모형 적용

3.1 모형 대상 지역 및 격자구조

대상 지역인 군산항은 금강하구에 위치하고 있으며 금강하구역은 길이가 22 km, 폭이 1~3 km, 수심은 DL(-) 2~10 m의 나팔 모양의 수로이다. 금강하구에는 2개의 수로가 있다. 주수로는 남북측도류체 사이를 지나서 군산 외항과 장항항으로 이어지는 남수로인데 폭이 1.5~2.0 km정도이다. 또 하나는 개야도로부터 장항항으로 이어지는 북수로(개야수로)이다. 두 수로는 장항항 서쪽에서 합쳐져서 내항을 거쳐 하구둑에 이른다. 금강 입구 명암에서 8 km, 22 km, 26 km 지점에 군산 외항, 내항, 하구둑이 위치하고 있다. 수로 수심은 외항부근에서 DL(-)8~10 m이고, 상류로 가면서 점점 얕아져 장항항 부근에서 약 DL(-)5 m이다. 내항 부간교 부근에서 국지적으로 DL(-)8 m까지 깊어지다가 하구둑으로 가면서 점점 얕아져 DL(-)2 m 정도이다. 개야수로는 전반적으로 얕아 장항과 대죽도 사이가 DL(-)2 m보다 얕다. 하구에는 3개의 큰 사주가 있다 제일 큰 사주는 대죽사주로서 길이는 동서 방향 9 km, 남북방향 5 km이고 정상부 높이 DL(+)-6~7 m이다. 그리고 정상부 높이 DL(+)-2 m 해망동사주, 정상부 높이 DL(+)-4 m 구포사주가 있다. 금강하구둑은 1983년에 착공하여 1988년 1월에 완전히 체결되고 1994년 8월에 수문을 닫았다. 그리고 1990년부터 북측도류체(1997), 남측도류체(1998) 및 북방파제 축조공사가 시행되었다.

군산항 퇴적모형 범위는 하구둑에서 군산 내항 및 외항과 개야도 및 연도를 포함한 넓은 해역으로 설정했다. 격자망은 Explorer_SEAGRID 프로그램을 이용하여 격자를 반자동으로 생성했다. 여기서 이용된 지형 및 수심도는 전자 해도(ENC) KR4F2O30.000, KR4F2O40.000, KR4F4C10.000, KR4F4C20.000이다. 격자 형식은 곡선-직교격자로서 격자 간격은 65~850 m인데 내항과 외항 수로는

격자를 작게, 면 바다로 나갈수록 격자를 크게 만들었다. 수평 격자의 구조는 IC=159, JC=89이고, 활성 격자 수는 LC=6674이다. 위해 개방경계 격자 수는 82개이고 하구둑 유입 유입 개방 경계의 격자수는 4개로 설정했다. 그 결과 생성된 격자망과 수심 분포도를 그림으로 나타내면 Fig. 1 과 같다. 본 모형의 격자망 수직구조는 수층 수는 5층이고 토사이동층의 수는 8층으로 수층의 두께는 중분비가 모두 동일하게 0.2이고, 초기 토사 이동상의 두께는 총 3 m이고, 1~6층까지 모두 동일하게 0.5 cm로 배정하고 7층은 퇴적층(depositional layer), 8층은 변동층(active layer)으로 모두 0 cm로 배정했다. 본래 초기 토사층의 수와 두께는 현장 수직 퇴적층 및 고정상면 깊이 조사를 실시한 자료를 토대로 공간적으로 다르게 설정함이 합리적이나, 여기서 현장 수직 토층조사 자료가 없어서, 임의로 일정하게 설정했다.

3.2 동역학 및 토사 입력자료

본 모형에서 계산 기원($t=0$)은 1999.1.1.0:00로 설정하고 그에 따른 천문조석상수는 조석계산용 제표(수로국 간행)의 값을 사용했다. 계산 시간간격(time step)은 동역학 계산에 3 sec 토사 이송 계산에 15 sec, 코리올리스계수는 $8.4E-05/sec$, 정상 풍향풍속은 SW 4.5 m/s, 해저 조도계 수 0.02로 설정했다. 조위 초기치는 보통 0을 입력하나, 여기서는 처음 계산시점($t=0$)의 외해경계 조위를 모든 격자에 동일하게 입력하였다. 초기 유속은 모두 0으로 놓았으며, 초기 염도와 수온은 각각 30.0 ppm, 10°C로 모든 격자

에 동일하게 설정하였다. 서쪽 개방경계의 조위는 군산항의 조화상수를 참고로 6개 분조, 즉 M2, S2, N2, K1, M4, O1를 합성하여 계산하였다. 그리고 모든 폐경계에서 유속 벡터는 모두 0 (no-slip)으로 놓았다.

다음에 동쪽 개방경계의 유입 시계열 유량(inflow rate)은 하구둑 수문 방류 기록을 참고하여 Fig. 2와 같이 입력하였다. 염분농도 경계치는 서쪽 외해에서 30.0 ppm, 하구둑에서 2.5 ppm으로 항상 일정하게 설정했고, 수온의 경계치도 서쪽 외해에서 22.2°C, 하구둑에서 15°C로 항상 일정하게 설정했다.

퇴적모형에서 수주(water column) 초기 부유사 농도는 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)의 5월 평균 농도 26.325 mg/L로 설정하였다. 그리고 토사층의 초기 질량분율(mass fraction)은 Fig. 3에 표시된 50개 대표 정점의 저질 입경분포 조사 자료에 의거 Table 1과 같은 5개의 토사 등급으로 나누어 구하고, LSH_Krige를 이용하여 모든 격자의 값을 공간 보간하여 입력했다.

하구둑으로부터 토사 유입농도는 현장관측 자료가 없어서 다년간 연평균 토사 유입 질량을 추정하고 그 기간 방류 유량을 이용하여 구했다. 그래서 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)의 2001.6~2002.5와 2004.5의 연간 토사 유입량의 추정치가 $1478E+03$ ton/yr이고, 그 기간 연간 평균 방류량은 $5629E+03$ m³/yr로 조사되어, 이것으로부

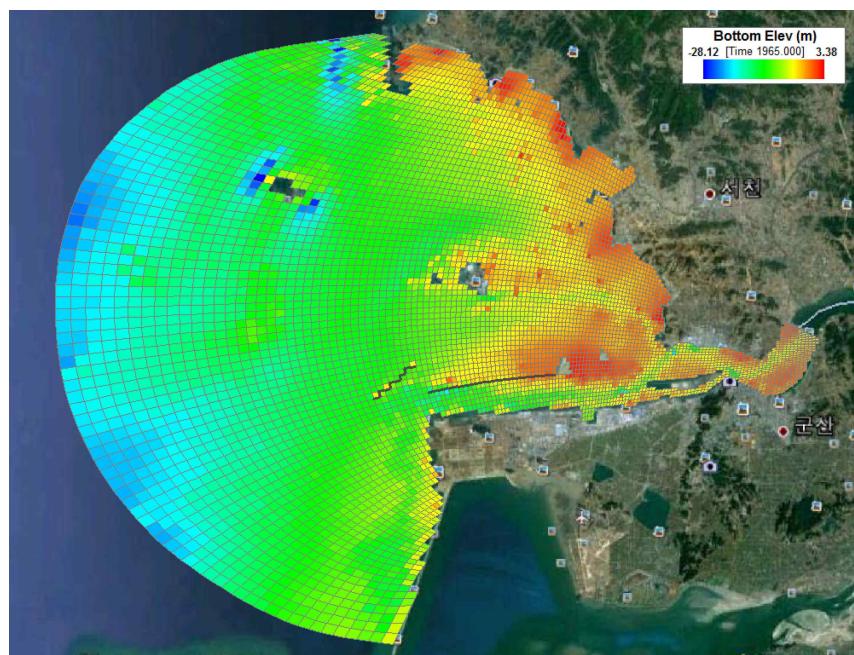


Fig. 1. Grid System with Bathymetry of Gunsan Port

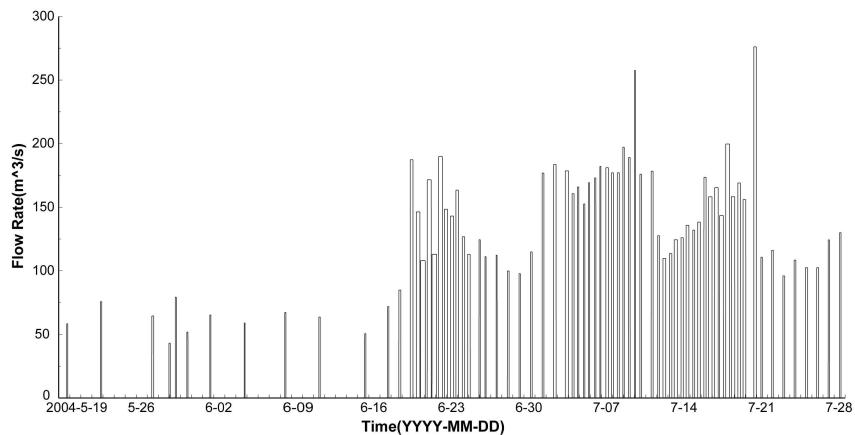


Fig. 2. Outflow rate at Kum River Estuary Barrage

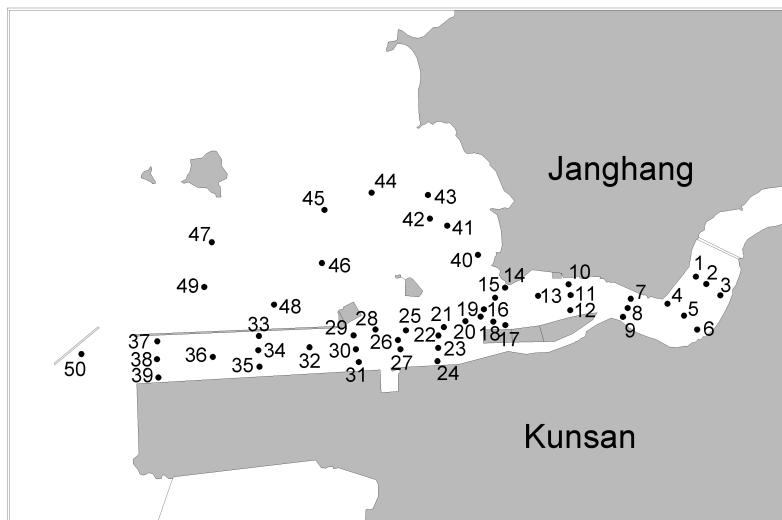


Fig. 3. Location (50 points) for Surveying of Bed Material Distribution

Table 1. Sediment Diameter Classification

Sediment Class	Division (mm)	Median size (mm)	Sediment Type
cohesive (SED1)	$\angle 0.06$	0.0001	Clay+Silt
non-cohesive (SND1)	0.06~0.10	0.0800	VF. Sand
non-cohesive (SND2)	0.10~0.20	0.1500	F. Sand
non-cohesive (SND3)	0.20~0.30	0.2500	M. Sand
non-cohesive (SND4)	$0.30\angle$	0.4000	C. Sand

터 유입 토사 총농도가 262.56 mg/L가 계산되었다. 이 농도는 전 토사 등급이 통합되어 있기 때문에 각 등급으로 나누기 위해 하구둑에서 내향 사이 저질 정점조사 자료로부터 얻은 SED1:SND1:SND2=0.85:0.12:0.03 비율을 기준으로 나누었다. 그 결과 하구둑 유입 점착성 토사농도 SED1은 223.2 mg/L, 비점착성 토사농도 SND1은 31.5 mg/L, SND2는 7.8 mg/L로 산정되었다. 그리고 외해 경계에서

토사 유입 농도는 시산법에 의해 항상 일정하게 수면에서 바닥으로 SED1을 5~10 mg/L의 수직농도분포로 설정하였다.

3.3 점착성 매개변수 설정

점착성 퇴적물의 수송 모형에서 모의 결과에 크게 영향을 주는 인자로는 침강속도, 침식률, 퇴적률 등이 있다. 퇴

적률 이동을 정확히 모의하기 위해 현장 퇴적물에 대한 그들의 매개변수에 대한 정확한 이해와 정보가 필요하다. 외국에서는 Mehta (1986), Villaret and Paulic (1986) 등이 그들에 대한 연구를 실험실과 현장에서 진행되어 왔다. 그리고 국내에서는 목포해역의 점착성 토사 매개변수들에 대해 Jung and Choi (2012), 금강하구역의 점착성 토사 매개변수들에 대해 Hwang et al. (2008), Kim (2002)의 연구결과가 있다. 여기서는 EFDC 문헌(Tetra Tech, 2007), Kim(2002)과 Hwang et al. (2006, 2008)의 문헌에 근거하고 퇴적고 및 부유사 현장 관측치를 이용한 검정을 통해 관련 매개변수들을 설정하였다.

먼저 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010)에 의하면 점착성 토사의 침강속도(WS)는 $(0.09\sim 2.29)E-04 \text{ m/s}$ 로 추정된 바 있고, Hwang et al. (2006)의 금강 하구역의 토사에 대한 수조 침강실험에 의해 부유사 농도 값이 $1 < C < 80 \text{ g/L}$ 범위에서 침강속도를 $(0.1\sim 10.0)E-04 \text{ m/sec}$ 범위로 발표한 바 있다. 그리고 Kim (2002)은 금강하구역에 대해 퇴적수치모형의 점착성 침강속도는 $(1.5\sim 4.0) E-04 \text{ m/s}$ 로 제시한 적이 있다. 그래서 본 퇴적모형의 침강속도는 검정을 통해 $2.2E-04 \text{ m/s}$ 로 설정했다.

그리고 EFDC 문헌(Tetra Tech, 2007)에 의하면 점착성 토사의 퇴적한계전단력(TD)는 $(0.06\sim 1.1) \text{ N/m}^2$ 의 값을 갖고, Mehta (1986)의 실험에 의하면 $(0.04\sim 0.15) \text{ N/m}^2$ 의 값을 갖는다. 또 Kim (2002)은 금강하구역의 퇴적모형을 위한 퇴적한계전단력으로 0.20 N/m^2 를 제시한 바 있다. 그래서 여기서 검정을 통해 퇴적한계전단력은 0.20 N/m^2 로 설정했다.

또 EFDC문헌(Tetra Tech, 2007)에 의하면 점착성 토사의 기준침식률(RSE)은 $(0.0005\sim 0.1) \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$ 또는 $(0.18\sim 36) \text{ mg/cm}^2\text{hr}$ 의 값을 갖는다. 그리고 Hwang et al. (2008)의 금강하구역 퇴적물 침식실험에 의하면 저면 밀도 $(1.14\sim 1.38) \text{ g/cm}^3$ 범위에서 기준침식률은 $(0.15\sim 0.0213) \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$ 또는 $(54.26\sim 7.7) \text{ mg/cm}^2\text{hr}$ 로 발표했다. Hwang et al. (2008)이 제시한 값의 범위에서 검정해본 결과, 모형의 퇴적고 및 부유사농도 오차가 약 150% 이상으로 과대 계산되어 현장 관측치와 잘 맞지 않았다. 그래서 EFDC문헌(Tetra Tech, 2007)이 제시한 값의 범위에서 검정을 해본 결과, 현장 관측치와 비교적 잘 맞는 $0.003 \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$ ($1.08 \text{ mg/cm}^2\text{hr}$)를 기준침식률로 설정하였다.

마지막으로 Villaret and Paulic (1986)의 실험식과 해저질 관측자료에 의하면 점착성 토사의 침식한계전단력(TE)은 $(0.38\sim 0.93) \text{ N/m}^2$ 로 추정된 바 있고, Hwang et al.

(2008)의 실험결과에 의하면 금강하구역 점착성 퇴적물은 저면 밀도 $(1.14\sim 1.38) \text{ g/cm}^3$ 범위에서 $(0.19\sim 0.41) \text{ N/m}^2$ 로 발표된 바 있고, Kim (2002)은 금강하구역의 퇴적모형을 위한 침식한계전단력으로 0.40 N/m^2 을 제시한 적이 있다. 그래서 본 모형에서 침식한계전단력은 0.40 N/m^2 으로 설정했다.

3.4 퇴적 모형 계산

본 EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012)를 군산항에 적용하여 퇴적고를 계산하였다. 전절에서 작성한 격자망과 설정한 초기치, 경계치, 주요 매개변수를 이용하여 모형의 검증을 위해 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)에 유동과 부유사농도 및 퇴적고 관측치가 존재하는 2004.5.16에서 2004.7.29까지 71일 동안 계산하여 보았다. 본 퇴적모형의 계산내용은 Table 2에 수록하고, 사용된 매개변수 및 입력치는 Table 3에 정리하였다.

4. 퇴적모형 검증 및 분석

4.1 모형 검증 기준

일반적으로 수치모형의 적용성을 검토하기 위해 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) 계수를 이용하여 판단한다. NSE 계수는 관측치와 계산치의 오차를 관측치의 분산 정도에 대해 나타낸 값으로 관측치의 분산 정도가 커지면 상대적으로 관측치와 계산치의 오차가 적어진다. NSE 계수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (28)$$

여기서, O_i 는 관측치, X_i 는 계산치 그리고 O_m 은 전 관측치의 평균을 표시한다.

또 보통 수치모형 계산의 정확성을 검토하기 위해 평균 제곱근오차(RMSE)를 구하여 평가한다. RMSE는 작을수록 정확도가 좋으며 다음 식으로 계산한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}{N}} \quad (29)$$

Moriasi and Van Liew (2007)은 여러 수치모형의 적합도와 정확도를 NSE계수와 RMSE를 이용하여 평가하는

Table 2. Simulation Conditions for Deposition Calculation at Gunsan Port

Item	Values / Ranges / Names
Used model, working tool	EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012) EFDC_Explorer5 FULL
Type, number of grid (LC)	Curvilinear grid, 6674
Grid span (DX, DY)	65~850 m
Number of water column layer (KC)	5
Number of sediment bed layer (KB)	8
Number of sediment class	Cohesive : 1, non-cohesive : 4
Time step (DT)	Hydrodynamic : 3 sec, sediment : 15 sec
Reference period	86400sec
Origin of computation (t=0)	1999.1.1.0:00
Computation time	2004.5.16~2004.7.29 (71 day)
List of computation and output	1) tidal level (SEL) m 2) velocity (U, V) m/sec 3) suspended sediment concentration (SSC) mg/L 4) deposition height (DH) m

Table 3. Primary Input Parameter Values for Sediment Model Computation

Parameter	Input Values
Coriolis coefficient (f)	8.4E-05, $\psi=36.2^\circ$
Roughness coefficient (Zo)	0.02
Horizontal mass diffusion coefficient (KH)	0.1 m ² /sec
Cohesive settling velocity (WS)	2.2E-04 m/s
Cohesive critical deposition stress (TD)	0.20 N/m ²
Cohesive reference erosion rate (RSE)	0.003 g/s·m ²
Cohesive critical erosion stress (TE)	0.40 N/m ²
Mean wind velocity and direction	SW 4.5 m/s
Nikuradse roughness (Ks)	2.5E-06

기준을 설정한 바 있다. NSE계수는 $-\infty$ 에서 1.0 사이 무차원 값으로 1에 근접할수록 적합성이 크고 0 이하이면 부적합을 나타낸다. 일반적으로 수리수문 수치모형의 적용성은 NSE계수가 1.0, RMSE가 0%에 근접할 때 “최적”으로 평가하고, 유사모형에서 NSE계수가 0.50 이상이고, 상대오차(RE)가 55% 이하이거나, RMSE가 허용오차 범위 내에 들면 “만족(satisfactory)”으로 평가했다.

4.2 유동모의 검증

군산항에 대한 구성된 퇴적모형의 유동을 검증하기 위해 2004.5.16~5.30(15일)동안 모형으로부터 조위와 유속의 계산치와 현장 관측치를 이용했다. 검증은 Fig. 4에 표시된 조위는 내항(T-1)과 외항(T-2) 2곳, 유속도 내항(PC-1, S-1), 외항(PC-3, S-3) 2곳의 대표 정점을 선정하

여 수행했다. 검증에 사용한 현장 관측치의 조위자료는 조석표(2004)의 조위를 사용하고, 유속 및 부유사 농도 관측치는 금강하구수리현상변화조사 보고서(Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office, 2004)의 자료를 이용하였다. 군산항내 2곳의 현장관측 조위와 모형계산 조위를 비교한 결과를 그림으로 나타내면 Figs. 5 and 6과 같다. 그들의 정확도를 나타내는 RMSE는 T-1의 경우 0.091 m, T-2의 경우 0.088 m로 계산되었고, 조위계산에 대한 모형의 적합도를 나타내는 NSE계수는 T-1의 경우 0.94, T-2의 경우 0.89가 나와 매우 만족스러운 결과로 평가되었다. 유속에 대해서 내항(PC-1) 그리고, 외항수로(PC-3) 2곳에서 조위계산과 같은 기간 동안의 현장 관측치와 모형의 계산치를 가지고 검증을 수행했다. 그 결과 중 내항(PC-1)과 외항(PC-3)에 대한 U 유속성분의 비교 그림은 Figs.

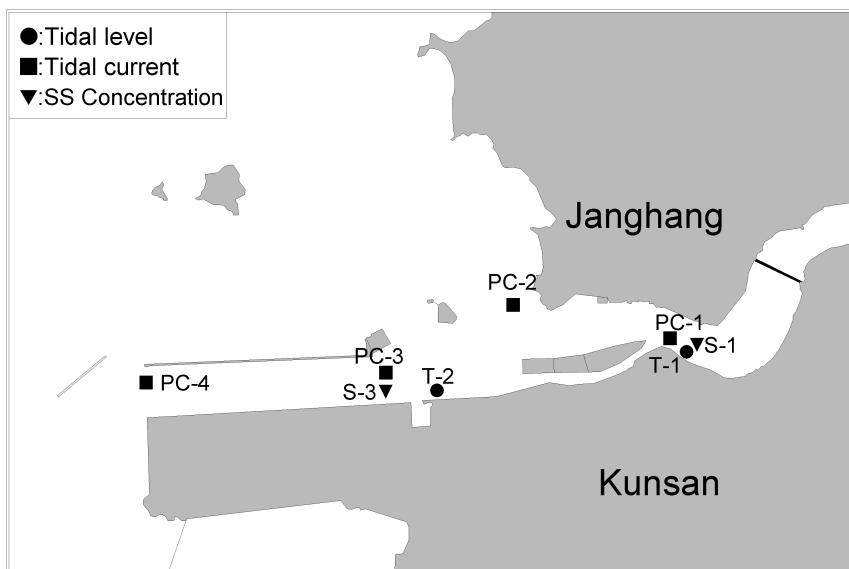


Fig. 4. Comparision Location of Measured and Calculated Values for Tidal Level, Tidal Velocity and SS Concentration in Gunsan Port

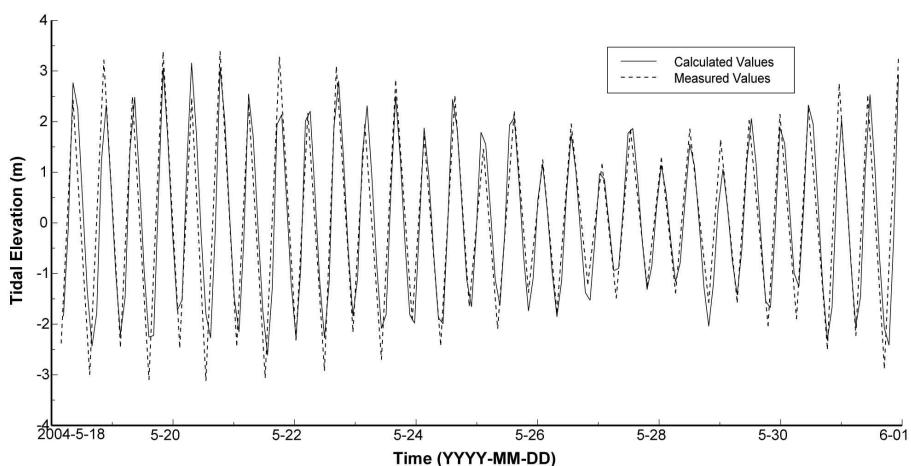


Fig. 5. Comparision of Measured and Calculated Tidal Level at Inner Port (T-1)

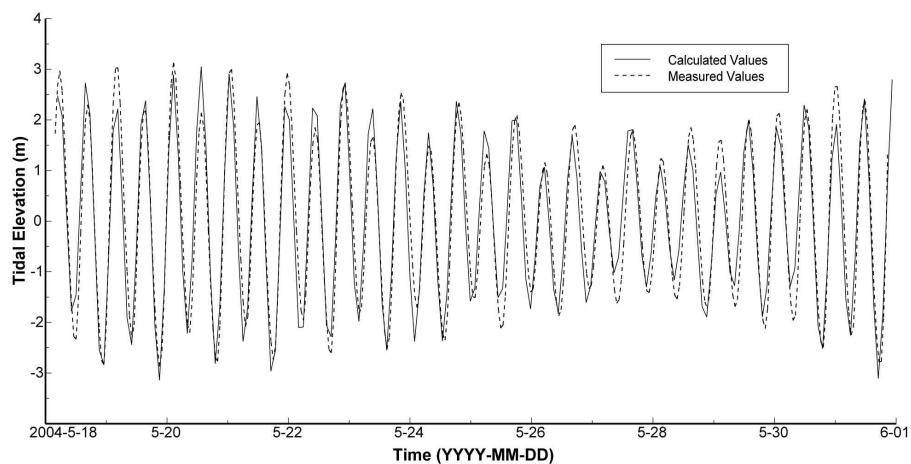


Fig. 6. Comparision of Measured and Calculated Tidal Level at Outer Port (T-2)

7 and 8과 같다. 그리고 그들의 NSE계수 및 RMSE는 PC-1, PC-3에서 각각 0.68, 0.82 그리고 22 cm/sec, 18 cm/sec 가 나왔다. 유속계산에 대한 모형의 적합도를 나타내는 NSE계수는 모두 0.5 이상으로 만족스러운 것으로 평가되었다.

4.3 퇴적고 모의 검증

군산항에 대한 구성된 퇴적모형의 퇴적고 계산 적합성을 검증하기 위해 2004.5.16~7.29 (71일)동안 모형으로부터 퇴적고 및 부유사 농도의 계산치와 현장 관측치를 이용했다. 모형으로부터 71일 동안 군산항의 퇴적고 분포를 계산한 결과를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 9와 같다. 그림으로부터 하구둑 수문 부근은 약 22~30 cm의 퇴적이 발생했고, 하구둑에서 내향으로 이어지는 수로 양쪽의 간사지는 5 cm 이하 퇴적을 보이고 장항 소치곶 부근과 군산도선장 부근에서 약 25 cm의 세굴이 발생한 것으로 나타났다. 그리고 장항 해양사무소 및 신항 부근은 약 10 cm 세굴이 발생하고, 외항 수로에는 10 cm 내외로 불규칙하게 세굴과 퇴적이 번갈아 발생했다. 그리고 그 외 지역에

서 1~3 cm 퇴적 현상이 전 지역에 걸쳐 나타났다. 모형에 의한 퇴적고 계산 결과와 현장 관측치(금강하구수리현상 변화조사 보고서)를 정량적으로 비교분석하기 위해 Fig. 10에 표시된 D1에서 D13까지 13개 조사 정점을 설정하고 그들 조사정점에서 관측치와 계산치의 비교표를 작성한 것이 Table 4와 같고, 퇴적고의 계산치와 관측치의 비교를 막대그래프로 표시한 것이 Fig. 11과 같다. 도표에서 보면 퇴적고 관측치와 계산치의 차이가 지점에 따라 과부족이 다르나, 계산치가 관측치보다 평균 13% 정도 크게 계산되었다. 특히 D2, D3, D10이 과대 계산되었는데 D2 와 D3는 하구둑에서 내향으로 이어지는 북수로 양편에 위치한 토사이송이 큰 간사지로 퇴적이 크게 나타날 가능성이 있다. D10은 장항에서 외항으로 이어지는 남수로 북쪽 대죽사주 남단에 위치한 지점으로 북측도류제 및 매립지 호안 공사 등으로 인하여 퇴적변동이 큰 곳이다. 그리고 모형에 의한 부유사농도 계산 결과를 현장 관측치(금강하구수리현상변화조사 보고서)와 정량적으로 비교분석하기 위해 Fig. 4에 표시된 내항(S-1)과 외항(S-3) 2곳에 조사 정점을 설정하고 그들 정점에서 관측치와 계산치의

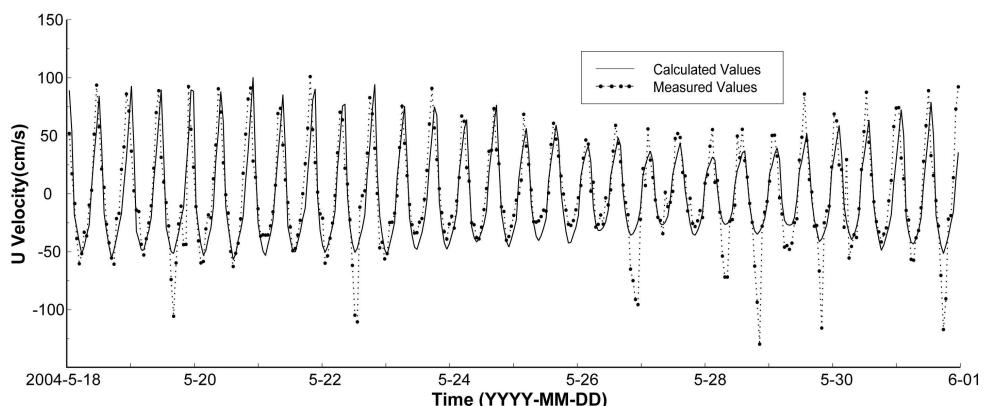


Fig. 7. Comparision of Measured and Calculated U Velocity at Inner Port (PC-1)

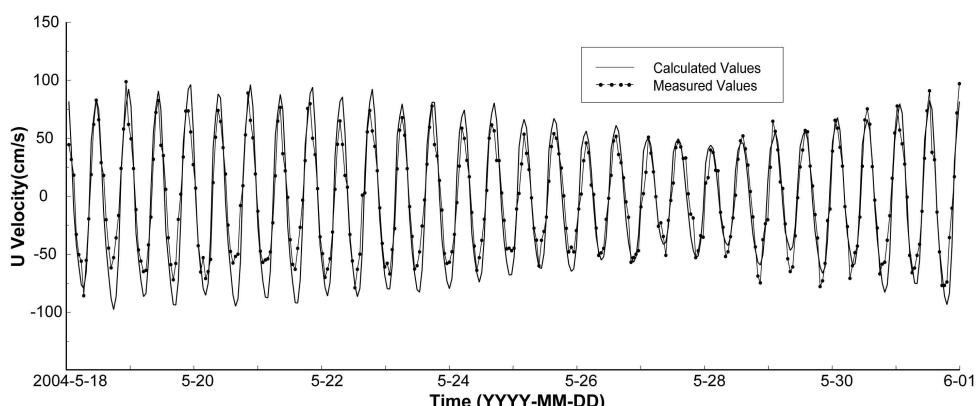


Fig. 8. Comparision of Measured and Calculated U Velocity at Outer Port (PC-3)

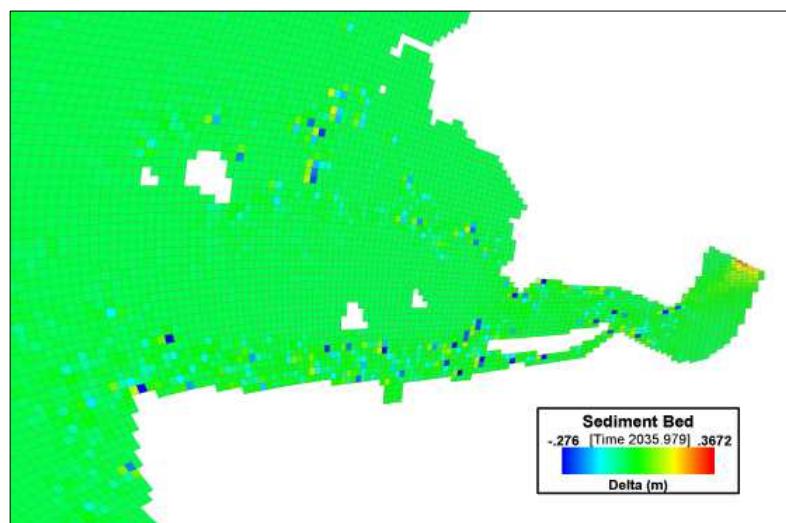


Fig. 9. Sediment Deposition Height Distribution from Model Computation

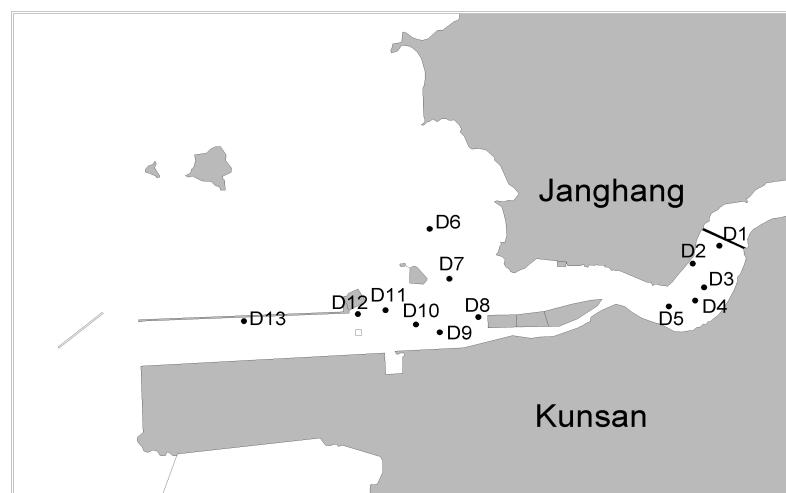


Fig. 10. Comparison Location for Sediment Deposition Height

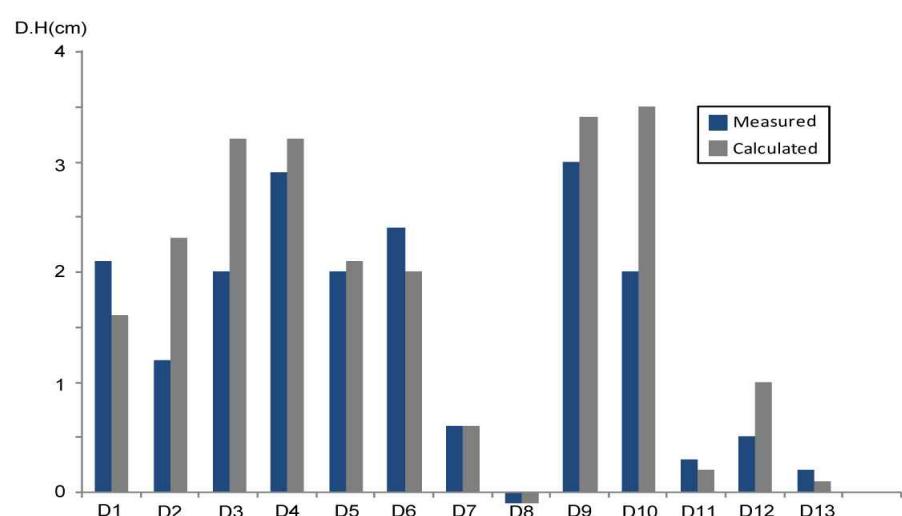


Fig. 11. Comparison of Calculated and Measured Deposition Height at Gunsan Port

부유사 농도를 비교한 그림은 Figs. 12 and 13과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 관측치와 계산치의 농도를 시각별로 비교하면 차이가 크게 나왔다. 그 이유는 개방경계에

서 시간에 따라 다른 농도가 아닌 일정한 값(평균)을 설정했기 때문이다. 그래서 부유사농도의 비교는 시계열 비교는 피하고 15일 시간평균 비교를 수행했다. 부유사농도의

Table 4. Comparision of Calculated and Measured Deposition Height at 13 Stations in Gunsan Port

Investigation Station (I, J)	Measured Deposition Height (cm)	Calculated Deposition Height (cm)	Difference (cm)
D1 (140,50)	2.1	1.6	-0.5
D2 (136,38)	1.2	2.3	+1.1
D3 (140,32)	2.0	3.2	+1.2
D4 (138,31)	2.9	3.2	+0.3
D5 (135,28)	2.0	2.1	+0.1
D6 (88,43)	2.4	2.0	-0.4
D7 (95,35)	0.6	0.6	0.0
D8 (93,30)	-0.1	-0.1	0.0
D9 (88,26)	3.0	3.4	+0.4
D10 (84,27)	2.0	3.5	+1.5
D11 (80,30)	0.3	0.2	-0.1
D12 (72,30)	0.5	1.0	+0.5
D13 (59,31)	0.2	0.1	-0.1
NSE coefficient		0.86	

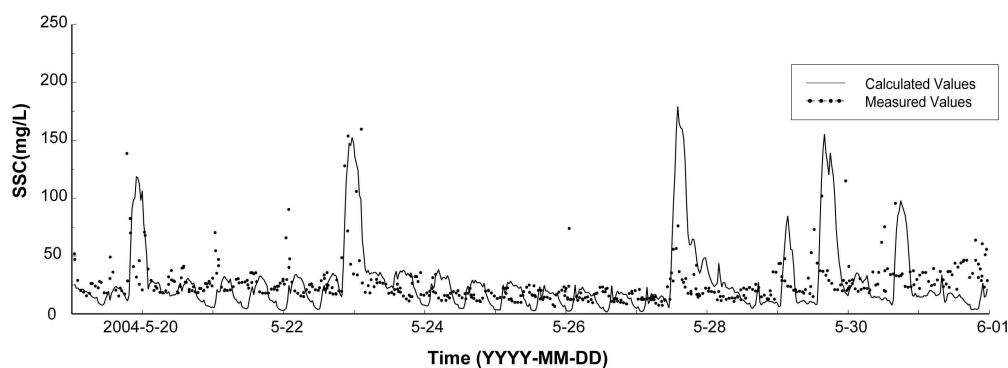


Fig. 12. Comparision of Measured and Calculated SSC Time Series at S-1

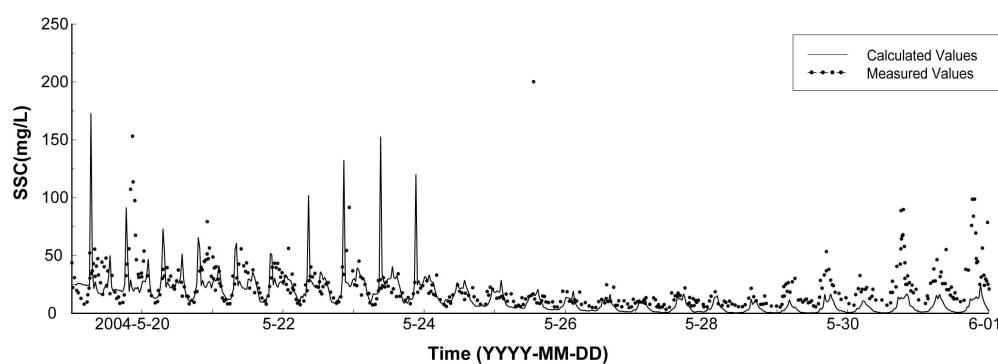


Fig. 13. Comparision of Measured and Calculated SSC Time Series at S-3

검증 결과 내항의 경우는 오차가 2% 정도 발생했으나, 외항에서 오차 44% 정도가 발생했다. 외항의 오차가 큰 이유는 외해경계 농도가 시계열이 아닌 일정한 값의 설정과 파랑류 계산에서 시계열 풍자료가 아닌 일정한 값(연평균)을 사용한 점 등으로 생각되나 그 원인은 확실하게 규명하지 못했다.

퇴적고의 관측치와 계산치를 가지고 Eqs. (28) and (29)에 의해 13개 정점에서 퇴적고의 계산에 관한 모형의 적합도와 정확도를 알아보기 위해 NSE계수 및 RMSE를 구해본 결과 0.86, 0.67 cm가 나왔다. 내항(S-1)과 외항(S-3) 정점에서 15일 동안의 시간평균 부유사농도의 관측치와 계산치가 각각 28.66 mg/L, 28.04 mg/L과 25.39 mg/L, 14.16 mg/L이고, 2곳의 상대오차(RE) 평균을 구하면 23%가 된다. 이 지표들은 토사모형의 적용성 평가기준 NSE 계수 ≥ 0.50 , RE $\leq 55\%$ 에 합당하므로 “만족(satisfactory)”한 모형으로 판단되었다.

5. 결 론

군산항의 유사 퇴적현상을 정량적으로 파악하고 그에 합리적인 대책을 마련하는데 활용하기 위해, 기 개발된 EFDC 3차원 퇴적모듈을 기초로 군산항에 맞는 EFDC KUNSAN_SEDTRAN MODEL (2012) 퇴적모형을 구성했다. 이 모형의 점착성 토사의 침강 속도, 퇴적한계전단력, 기준침식률, 침식한계전단력은 문헌조사와 검정을 통해 각각 2.20E-04 m/s, 0.40 N/m², 0.003 g/s·m², 0.20 N/m²로 확인되었다. 그리고 이 모형의 유동검증은 내항과 외항 2곳에서 2004년 5월 16일~5월 30일(15일)의 조위와 유속의 모형 계산치와 현장 관측치를 이용하여 NSE계수와 RMSE로 표시했다. 그 결과 조위에 관한 내항의 NSE계수, RMSE는 각각 0.94, 0.091 m 그리고 외항의 NSE계수, RMSE는 각각 0.89, 0.088 m이고, 유속에 관한 내항의 NSE계수, RMSE는 각각 0.68, 22 cm/sec, 그리고 외항의 NSE계수, RMSE는 각각 0.82, 18 cm/sec로 나타났다. 모형의 퇴적고계산에 대한 적합도와 정확도를 검토하기 위해 2004년 5월 16~7월 7월 29일까지 71일 동안 군산항의 13개 정점의 퇴적고(71일) 및 내항과 외항 2개 정점의 부유사농도(15일)의 모형 계산치와 현장 관측치를 비교 검토했다. 그 결과 퇴적고 계산을 위한 모형의 적합도 NSE계수가 0.86, 정확도 RMSE는 0.67 cm로 나오고, 내항과 외항 2곳의 부유사농도 평균 상대오차(RE)는 23%로 토사모형의 적합성 평가기준 NSE ≥ 0.50 , RE $\leq 55\%$ 에 합당하므로 “만족(satisfactory)”한 모형으로 평가 되었다.

위의 결과는 외해로부터 유입하는 개방경계 토사농도의 현장 관측자료가 없어 시산법으로 추정하였고, 또 퇴적고 및 부유사농도의 공간분포 자료가 없어 이용 가능한 제한된 소수(13개)의 정점 자료만으로 그리고 단기간(71일) 추·동기가 포함되지 않은 검정 및 검증한 것이라서 미흡한 점이 있다. 또 파랑류 계산을 위해 시계열(황천시) 평균 바람자료 또는 파랑자료(파랑모형)를 이용하여야 하나 평균 바람 자료만을 사용한 것은 앞으로 개선할 일이다. 또 점성토의 주요 4개 매개변수를 상수로 설정했으나, 실은 주위 수리 및 물리화학적 환경에 따라 변수가 될 수 있다. 이를 보완에 대한 연구는 지금 보다 정확하고 풍부한 현장 관측자료를 얻은 후 가능할 것이다.

본 연구 결과는 군산항의 지역적인 토사 퇴적계산 모형에 해당하나, 다른 지역의 유사퇴적모형을 수립하는데 참고가 될 것으로 기대한다. 그때 그 지역의 특성에 맞게 검정 및 검증을 통해 주요 매개변수의 설정이 중요하다고 판단된다.

REFERENCES

- Bijker, E.W. (1986). Some Considerations about Scales for Coastal Models with movable Bed, Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Blumberg, A.F., and Meller, G.L. (1987). "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model." Three-dimensional coastal ocean models, Editor: N.S. Heaps, American Geophysical Union, pp. 1-16.
- Galperin, B., Kantha, H., Hassid, S., and Rosati, A. (1988). "A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows." *J. Atmos. Sci.*, Vol. 45, pp. 55-62.
- Garcia, M.H. (1999). "Sedimentation and erosion hydraulics." *Hydraulic Design Handbook*, Ch. 6, pp. 1-112.
- L.W. Mays, ed. McGraw-Hill, New York
- Gessler, J. (1967). "The beginning of bedload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels." *Translation T-5, California Institute of Technology*, Pasadena CA.
- Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office (2004). A Report of Hydrological Variation on Kuem River Estuary, p. 145.
- Gunsan Regional Maritime Affairs and Port Office (2010). A Report of Hydrological Variation on Kuem River Estuary, p. 607.

- Hamrick, J.M. (1992a). A three dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Hamrick, J.M. (1992b). Preliminary analysis of mixing and dilution of discharges into the York River. a Report to the Amoco Oil Co. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, p. 40.
- Hamrick, J.M. (1995). Calibration and verification of the VIMS EFDC model of the James River, Virginia. The college of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report, in preparation.
- Hwang, K-N., and Mehta, A.J. (1989). Fine sediment erodibility in Lake Okeechobee. Coastal and Oceanographic Engineering Dept., University of Florida, Report UFL/COEL89/019, Gainesville, FL.
- Hwang, K.N., Ryu, H.R., and Chun, M.C. (2006). "A Study on Settling Properties of Fine-Cohesive Sediments in Kuem Estuary." *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, KS COE, Vol. 18, No. 3, pp. 251-261.
- Hwang, K.N., Yim, S.H., and Ryu, H.R. (2008). "Analyses on Local-Seasonal Variations of Erosional Properties of Cohesive Sediments in Kuem Estuary." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 18, pp. 125-135.
- Jung, T.S., and Choi, J.H. (2012). "A Two-dimensional Numerical Simulation of Cohesive Sediment Transport in the Mokpo Coastal Zone." *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, KS COE, Vol. 24, No. 4, pp. 287-294.
- Kim, T.I. (2002). Hydrodynamics and Sedimentation Processes in the Kuem River Estuary, West Coast of Korea, Ph.D. Thesis, Sungkyunkwan University, p. 204.
- Krone, R.B. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling process. DA-04-203 CIVENG-59-2. US Army corps of Engineers, Washington DC.
- Lee, C.H. (1998). "Considerations on Wave Transform Model", *CIVIL ENGINEERING*, KSCE, Vol. 46, No. 4, pp. 59-70.
- Mehta, A.J. (1986). "Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in esuaries." Estuarine Cohesive Sediment Dynamics A. *J. Mehta ed., Springer-Verlag*, Berin, pp. 290-325.
- Meller, G.L. and Yamada, T. (1982). "Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems." *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 20, pp. 851-875.
- Moriasi, D.N., and M.W. Van Liew, et al. (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations." ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Paul, M, Craig, P.E., and Dynamic Solutions, LLC (2010). User's Manual for EFDC_Explorer: A Pre/Post Processor for the Environmental Fluid Dynamics Code.
- Shrestha, P.A., and Orlob, G.T. (1996). Multiphase distribution of cohesive sediments and heavy metals in estuarine systems." *J Environ. Engrg.*, Vol. 122, pp. 730-740.
- Suh, S.W. (2004). "Hind-casting Simulation of Sedimentation Changes and Passage Hindrance in Kuem River Estuary." *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, KS COE, Vol. 16, No. 4, pp. 224-232.
- Tetra Tech, Inc (2007a). "The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation." Vol. 1: Hydrodynamics And Mass Transport.
- Tetra Tech, Inc (2007b). "The Environmental Fluid Dynamics Code Theory and Computation." Vol. 2: Sediment and Contaminant Transport and Fate.
- van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment Transport, Part I: Bed load transport." *Hyd. Engrg.*, Vol. 110, pp. 1431-1455.
- van Rijn, L.C. (1984b). "Sediment Transport, Part II: Bed load transport." *Hyd. Engrg.*, Vol. 110, pp. 1613-1641.
- 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 Dept., University of Florida, Report UFL/COEL-86/007, Gainesville, FL.
- Ziegler, C.K., and Nesbitt, B. (1995). "Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir." *J. Hyd. Engrg.*, Vol. 121, p. 773-781.

논문번호: 12-114	접수: 2012.10.21
수정일자: 2013.01.02/01.28/02.27	심사완료: 2013.02.27