

복합 파랑장에 따른 개야수로 퇴적물이동 분석

장창환[†]

특허청 건설기술심사과

Analysis of Sediment Transport in the Gaeya Open Channel by Complex Wave Field

Changhwan Jang[†]

Construction Technology Examination Division, Korean Intellectual Property Office
(Received : 12 March 2021, Revised : 29 March 2021, Accepted : 29 March 2021)

요약

서해 개야수로 인근의 파랑전파, 해수유동, 퇴적물이동을 분석하기 위해서 각종 인공구조물 설치 전(CASE1W)과 후(CASE2W)로 분류하고, CASE1W와 CASE2W에 대한 계산결과를 비교하였다. 파랑전파에 대해서는 SWAN 수치모형을 이용하여 입사파와 반사파의 결과를 도출하였고, 해수유동에 대해서는 FLOW2DH 수치모형을 이용하여 해수유동에 따른 유속 결과를 도출하였다. SWAN 수치모형과 FLOW2DH 수치모형의 결과는 퇴적물이동을 예측하는 SEDTRAN 수치모형의 입력조건이 되어 개야수로 인근의 최대 저면전단응력과 부유사 농도분포를 계산하였다. SWAN 수치모형 계산결과, CASE2W의 경우 약 7 km 길이의 북측 도류제에 의해서 입사파가 회절 및 중첩되고, 반사파가 생성되어 개야수로 인근의 파고를 CASE1W에 비해 40~50 % 증가시켰다. FLOW2DH 수치모형 계산결과, 북방파제, 북측 도류제 및 금란도에 의해서 개야수로의 유속이 CASE1W와 대비하여 CASE2W가 10~30 % 빠르게 계산되었다. SEDTRAN 수치모형의 계산결과, 복합 파랑장(입사파, 반사파, 조석)에 따른 해양환경과 각종 인공구조물의 설치에 의해서 개야수로의 최대 저면전단응력이 1.0 N/m² 이상인 구간과 부유사농도가 80 mg/L 이상인 구간이 넓게 분포되었다는 것은 개야수로에 퇴적현상이 발생한 것이라고 판단된다.

핵심어 : 입사파, 반사파, 해수유동, 부유사농도, 퇴적물이동

Abstract

In order to analyze wave propagation, tidal current, and sediment transport in the vicinity of the Gaeya open channel, it was classified into before(CASE1W) and after(CASE2W) installation of various artificial structures, and the calculation results for CASE1W and CASE2W were compared. For wave propagation, the results of incident and reflected waves were derived using the SWAN numerical model, and the tidal current velocity results were derived using the FLOW2DH numerical model for tidal current. The results of the SWAN numerical model and the FLOW2DH numerical model became the input conditions for the SEDTRAN numerical model that predicts sediment transport, and the maximum bed shear stress and suspended sediment concentration distribution near the Gaeya open channel were calculated through the SEDTRAN numerical model. As a result of the calculation of the SWAN numerical model, the wave height of CASE2W was increased by 40~50 % compared to CASE1W because the incident wave was diffracted and superimposed and the reflected wave was generated by about 7 km long northern jetty. As a result of the calculation of the FLOW2DH numerical model, According to the northern breakwater, the northern jetty and Geumrando, CASE2W was calculated 10~30 % faster than CASE1W in the tidal current of the Gaeya open channel. As a result of the calculation of the SEDTRAN numerical model, the section where the maximum bed shear stress is 1.0 N/m² or more and the suspended concentration is 80mg/L or more was widely distributed in the Gaeya open channel from the marine environment by the complex wave field(incident wave, reflected wave and tidal wave) and the installation of various artificial structures. it is believed that a sedimentation phenomenon occurred in the Gaeya open channel.

Key words : Incident wave, Reflected wave, Tidal current, Suspended concentration, Sediment transport

[†]To whom correspondence should be addressed.
Construction Technology Examination Division, Korean Intellectual Property Office
E-mail: cjang@korea.kr

1. 서 론

금강 하구는 하굿둑 건설(1982년~1990년), 북측 도류제 건설(1990년~1997년), 남측 도류제 건설(1992~1998년), 서측 호안 체절(2000년), 준설토 투기장 3공구 체절(2000년), 북방 파제 건설(1988년~2004년) 및 군산항 건설 등 대규모 개발 사업에 의한 인공구조물들이 건설되었다. 이에 따라 하구의 동수역학과 퇴적양상이 변화되었다(Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries, 2002, 2004).

Fig. 1과 같이 금강 하구에는 2개 수로가 있다. 그 중 하나는 북측 도류제와 남측 도류제 사이를 지나 군산외항과 장항항으로 이어지는 남수로로 주수로이고, 나머지 하나는 개야도에서 장항항으로 연결되는 북수로인 개야수로이다. 주수로와 개야수로는 장항항 서쪽에서 합쳐져서 장항항과 군산내항을 거쳐 금강 하굿둑에 이른다. 하구에는 2개의 큰 사주가 있다. 규모가 가장 큰 것이 대죽도를 중심으로 주수로와 개야수로 사이에 위치하는 대죽사주로서 길이는 동서방향 약 9 km, 남북방향 약 5 km이다. 대죽사주의 서측에는 대죽도가 위치하는데 북측 도류제의 동측단과 연결되고, 대죽사주의 동측에는 유부도가 위치하며, 대죽도와 유부도를 연결하는 대죽사주의 중앙지역이 사주의 정상이다. 장항항 남쪽에 해망동사주가 있는데, 해망동사주의 서측에 준설토 투기장 3공구 호안을 조성하였고, 현재의 금란도가 되었다.

본 연구에서는 각종 대규모 개발 사업에 따라 하구의 동수역학적 변화와 개야수로의 해저면 변화의 상관관계를 수치모형 시스템을 이용하여 모의하였다. 수치모형시스템은 파랑전파 수치모형, 해수유동 수치모형, 퇴적물이동 수치모형으로 이루어져 있다. 파랑전파모형은 Delft Hydraulics Laboratory에서 개발한 SWAN 수치모형을 사용하고, 해수유동 수치모형은 자

체 개발한 FLOW2DH 수치모형을 사용하며, 퇴적물이동 수치모형도 자체 개발한 SEDTRAN 수치모형을 사용하였다. SWAN 수치모형의 파랑전파 결과와 FLOW2DH 수치모형의 해수유동 결과는 SEDTRAN 수치모형의 입력조건으로 연동되도록 개발하여 하나의 수치모형시스템을 완성하였다.

Kim (2002)은 금강하구의 해수유동 및 퇴적과정에 대해 해수유동 수치모형과 퇴적물이동 수치모형을 통해 연구한 바 있으나, 파랑전파에 대해서는 고려하지 않았다. Yoo et al. (2019)과 Cho et al. (2017)도 금강하구 인근 해역의 해수유동에 대한 연구를 위해서 네덜란드 수자원관리연구소 델타레스(Deltares)에서 개발한 Delft3D-FLOW를 사용하였다. Delft3D는 하천, 하구, 연안을 대상으로 3차원 수치모의를 수행할 수 있으며, 해수유동, 퇴적물이동, 지형변화, 수질 등 다양한 모듈로 구성되어 있다. 그러나 Delft3D는 상용 수치모형 시스템으로 소스코드를 변경하기 어려워 다양한 해양환경 조건들을 제어하기 어렵고, 여기에서도 파랑전파에 대해서는 고려하지 않았다. Jang (2009)과 Jang et al. (2012)은 SWAN 수치모형, 해수유동 수치모형으로는 Virginia Institute of Marine Science에서 개발한 3차원 수리동역학모델인 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 수치모형, SEDTRAN 수치모형을 연동하여 수치모형시스템을 개발하고, 속초항 인근의 비점착성 퇴적환경변화를 예측한 바 있다. 그러나 EFDC 수치모형은 공개 소스코드를 제공하고 있지만, 유체의 이동, 염분 및 온도 변화 모듈 외에도 부유물질의 이동, 부영양화 기작, 독성 오염물질의 이동 및 반응 등의 모듈들이 연계되어 있다(Park et al., 2012). 따라서 EFDC는 소스코드 변경 시 모듈들의 연계 부분에서 오류 발생이 빈번하다.

따라서 본 연구에서는 개발된 수치모형시스템을 이용하여 각종 대규모 개발 사업에 의한 하구의 동수역학적 변화가 개



Fig. 1. Study area and measurement points.

야수로의 해지면 변화에 어떤 영향을 미쳤는지 Fig. 1에서 지정된 9개의 정점(P1~P9)을 기준으로 분석한다. 특히, SWAN 수치모형에서 파랑전파 결과는 입사파 변형뿐만 아니라 반사파 생성도 고려하였으며, FLOW2DH 수치모형은 소스코드를 원하는 해양환경 조건(조간대 설정, 입사파 및 반사파 고려, 각종 파라미터 변경 등)에 따라 수정할 수 있어 입력조건으로 입사파, 반사파 및 조석상수를 모두 고려하였다는 점에서 개발된 수치모형시스템의 사용효과가 있는 것으로 나타났다.

2. 수치모형 시스템

2.1 SWAN(파랑전파) 수치모형

심해에서 천이역을 거쳐 천해로 입사하는 파랑은 쇄파대 내에서 비선형 작용이 강하게 나타나지만 SWAN 수치모형에서의 파랑현상은 2차원 스펙트럼에 의해 표현된다. 비선형이 강한 조건에서 스펙트럼을 사용할 수 있는 이유는, 스펙트럼 조건에 파랑자료의 통계적 분석이 충분히 표현 될 수는 없지만 스펙트럼 분포를 이용하면 파랑관측 기록으로부터 파랑예측이 가능하기 때문이다. 해안에서 파랑에 의한 해수면 변동의 모든 정보는 파랑의 진행방향 θ 와 각주파수 σ 에 대하여 파랑에너지가 분포하는 에너지 밀도 $E(\sigma, \theta)$ 또는 파랑 변동 스펙트럼이 포함된다. 일반적인 파랑 수치모형들은 시공간에서 작용 밀도 $N(\sigma, \theta)$ 의 발달을 계산한다. SWAN 수치모형에서도 사용하는 방법은 파랑에너지 스펙트럼 $E(\sigma, \theta)$ 인데 수치모형 내에서는 파랑 작용 스펙트럼(wave action spectrum) $N(\sigma, \theta)$ 으로 변형되어 사용된다. 흐름이 존재할 때는 파랑 작용 스펙트럼은 보존되지만 파랑에너지 스펙트럼은 보존되지 않기 때문이다(Whitham, 1974). 파랑 작용 스펙트럼은 파랑에너지 스펙트럼을 각속도로 나누기 때문에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1)$$

여기서 각주파수 σ 는 절대 각주파수 ω 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (2)$$

여기서 \vec{k} 와 \vec{u} 는 각각 파수와 유속의 벡터이다.

천해역 또는 소규모 영역에 대하여 수치모형을 적용할 때, Cartesian 좌표계에서 스펙트럼 작용 평행방정식으로 표현된다. 아래 식에서 좌변 1항은 시간에 따른 작용밀도의 시간 변화량, 제2항과 제3항은 각각 x 방향과 y 방향에서의 전파, 제4항은 각속도에 대한 해지면과 흐름의 변화에 따른 상대주파수의 천이, 제5항은 해지면과 흐름에 따라 변화하는 파랑의 굴절을 나타낸다. 파랑의 전파속도는 선형파 이론으로부터 도출된다(Whitham, 1974; Dingemans, 1997).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = S \quad (3)$$

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_x}{k^2} + u_x \quad (4)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_y}{k^2} + u_y \quad (5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla d \right) - c_y \vec{k} \cdot \frac{\vec{\partial u}}{\partial s} \quad (6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -k \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\vec{\partial u}}{\partial m} \right) \quad (7)$$

여기서 c_x, c_y 는 각각 x, y 방향의 전파속도(군속도)를, c_σ 와 c_θ 는 각각 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. s, m 은 각각 파향선과 파향선에 수직한 좌표이고, d 는 수심이다.

파랑 작용 평행방정식인 Equation (3)의 오른쪽 항인 S 는 파랑의 생성, 비선형적 파랑간의 상호작용이며, 소산의 물리적 과정을 표현하는 원천항이다. SWAN 수치모형 내에서 파랑의 발달 과정, 소산, 그리고 비선형 파랑간의 상호작용의 일반적인 물리적 개념들이 적용되었고, 다음과 같이 천해에서는 여섯 개 과정들이 원천항 $S = S_{tot}$ 에 기여한다(Fig. 2 참조).

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (8)$$

여기서 S_{in} 는 바람에 대한 파랑의 성장, S_{nl3}, S_{nl4} 은 각각 3파와 4파로 파랑들의 상호작용에 의한 파랑에너지의 비선형 전파, $S_{ds,w}$ 는 백파에 의한 파랑의 감쇠, $S_{ds,b}$ 는 해지면 마찰, $S_{ds,br}$ 는 수심에 의한 쇄파이다(Jang et al., 2012)

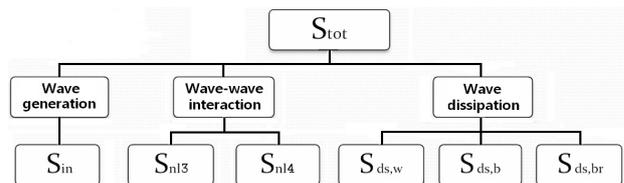


Fig. 2. Six processes contribute to S_{tot} .

2.2 FLOW2DH(해수유동) 수치모형

해수유동을 예측하는 FLOW2DH 수치모형의 기본방정식은 3차원 연속방정식과 운동방정식에서 유도된다. 질량보존 법칙으로부터 유도되는 3차원 비압축성 유체의 연속방정식과 난류 유체의 운동량보존 방정식인 3차원 레이놀즈(Reynolds) 방정식 중 수심방향으로 적분하면 수위와 수평방향 유속에 관한 다음의 식들이 된다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2\omega(\sin\phi) V + \frac{fU\sqrt{U^2 + V^2}}{8H} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + 2\omega(\sin\phi) U + \frac{fV\sqrt{U^2 + V^2}}{8H} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$$

여기서 t 는 시간, x 는 Cartesian 좌표계의 한 수평축, y 는 Cartesian 좌표계의 x 축과 직교되는 다른 한 축, ξ 는 평균해면을 기준으로 한 해수위 상승높이, U, V 는 각각 x, y 방향의 연직평균수평유속 성분, H 는 총수심($h + \xi$), h 는 평균수심, $f = (8\tau_b) / (\rho |\vec{V}|^2)$ 는 Darcy-Weisbach의 마찰손실계수, τ_b 는 해저면에서의 전단응력, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, D_x, D_y 는 x, y 방향의 난류 확산/분산계수, ω 는 지구자전 각속도, ϕ 는 계산점 위도(군산기준, 37.0°)이다(Kim, 1993).

개발된 FLOW2DH 수치모형은 금강하구 인근 해역의 해수유동 양상을 분석하는 데 적합한 조건대 처리기법이 적용되었다. 조위의 상승 및 하강에 따라 노출되기도 하고 해수로 덮이기도 하는 조건대 해역의 처리는 Flather and Heaps(1975)에 의해 개발된 처리기법을 사용한다. 이 기법은 격자 노출 여부와 유속 계산 여부를 다음의 조건중 하나가 만족하는지 여부로 판단할 수 있다.

- ① $H_i(t + \Delta t) > 0, H_{i+1}(t + \Delta t) > 0$ 이 동시에 만족
- ② $H_i(t + \Delta t) > 0, H_{i+1}(t + \Delta t) \leq 0$ 이 동시에 만족
 및 $\xi_i(t + \Delta t) - \xi_{i+1}(t + \Delta t) > \epsilon$ (특정치) 이 만족
- ③ $H_i(t + \Delta t) \leq 0, H_{i+1}(t + \Delta t) > 0$ 이 동시에 만족
 및 $\xi_i(t + \Delta t) - \xi_{i+1}(t + \Delta t) < \epsilon$ (특정치) 이 만족 (12)

위 Equation (12)의 ①, ②, ③중 하나를 만족시키면 i 번째 및 $i+1$ 번째 격자소 모두 해수가 차있는 것(wet)로 보아 $U_i(t + \Delta t)$ 를 계산하게 되며, 어느 조건에도 해당되지 않는 경우에는 i 번째 또는 $i+1$ 번째에 위치한 격자소가 노출되어 있는 것(dry)으로 가정하여 $U_i(t + \Delta t)$ 를 영(0)으로 지정한다.

2.3 SEDTRAN(퇴적물 이동) 수치모형

퇴적물 이동을 예측하는 SEDTRAN 수치모형은 수심 평균화된 2차원 모형(x, y 방향)으로 기본 방정식은 부유사의 질량보존 개념을 나타내는 이송확산방정식으로 Equation (13)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (dC) + \frac{\partial}{\partial x} (dUC) + \frac{\partial}{\partial y} (dVC) = \frac{\partial}{\partial x} \left[d \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[d \left(D_{xy} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + SS \quad (13)$$

여기서, C 는 수심평균 퇴적물 농도(kg/m^3), U, V 는 수심평균 유속성분(x, y 방향), a 는 총수심($h + \xi$), h 는 평균수심, ξ 는 평균해면을 기준으로 한 해수위 상승하강 높이, D_{xx}, D_{xy}, D_{yy} 는 난류확산/분산계수, SS 은 Source/Sink 항이다.

흐름 내 물질은 이류(advection), 난류확산(turbulent diffusion), 분산(dispersion), 분자확산 등 다양하고 복잡하게 이동한다. 그러나 이러한 각각의 현상을 현장관측을 통하여 정확히 산정하는 것은 어려우며 한 가지 현상에 대한 분류도 대상 해역의 크기, 모형의 격자 크기에 따라 변하므로 각각의 현상을 수치모형 상에 효과적으로 고려하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 난류확산과 전단확산(shear diffusion)을 고려하기로 한다. 전단확산은 Elder(1959)의 식을 이용하여 구한다.

$$D_{xx} = \nu_T + D_S \cdot U^2 / q^2 \quad (14)$$

$$D_{yy} = \nu_T + D_S \cdot V^2 / q^2 \quad (15)$$

$$D_{xy} = D_S \cdot U \cdot V / q^2 \quad (16)$$

$$q^2 = U^2 + V^2 \quad (17)$$

여기서, ν_T 는 수평방향 난류 확산계수($\nu_T = 0.07du_*$), D_S 는 유체의 전단흐름으로 수심평균 부유사 이동식에서 발생하는 흐름방향의 분산계수($D_S \approx 5.86du_*$)이다. u_* 는 전단속도(shear velocity)로서 다음의 식과 같으며, τ_b 는 흐름에 의해 해저면에 가해지는 전단응력이다.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (18)$$

$$\tau_b = \frac{1}{8} \rho f_c g^2 \quad (19)$$

$$f_c = 0.24 \left\{ \log \left(\frac{12d}{k_s} \right) \right\}^{-2} \quad (20)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, f_c 는 흐름에 의한 해저면 마찰계수이고, k_s 는 해저면 조도계수이다. 조류 뿐 아니라 파랑의 영향을 동시에 고려하고자 할 때 파랑에 대한 파랑주기평균 해저면 전단응력을 다음 식으로 구한다.

$$\tau_{b,w} = \frac{1}{4} \rho f_w \hat{U}_\delta^2 \quad (21)$$

여기서 $f_w = \min(0.000684 \exp(7.80(\frac{\hat{A}}{z_0})^{-0.106}), 0.3)$, $\hat{A} = \frac{H}{2 \sinh(kd)}$, $\hat{U}_\delta = \omega \hat{A}$, ω 는 각속도, $z_0 = k_s/30$, H 는 파고, k 는 파수이다(Swart, 1976; Kim, 1993).

3. 수치모형시스템의 실험조건 및 실험결과

3.1 실험조건

3.1.1 지형자료

대규모 개발 사업으로 인한 인공구조물들의 건설 전후에 따른 금강하구 인근, 특히 개야수로의 해수유동과 해저면 변화를 분석하기 위하여 다음과 같이 설정했다. 즉, 금강하구둑만 완공되고, 각종 인공구조물들의 설치 전 지형자료인 1990년 지형자료를 선정하고, CASE1W로 실험조건을 명명하였는데, 여기서 W는 파랑변형 결과가 포함되어 있음을 의미한다. 각종 인공구조물들이 시기적으로 중복되어 건설되었기 때문에 1990년 지형자료에 2010년까지 각종 인공구조물들이 설치된 상태를 가상적으로 겹쳐서(overlap) CASE2W의 지형자료를 제작하였다. CASE1W와 CASE2W의 결과 비교를 통해 각종 인공구조물의 완공이 개야수로의 해수유동과 해저면 변화에 미친 영향을 파악할 수 있을 것이다.

3.1.2 SWAN 수치모형 입력자료

SWAN 수치모형의 입력조건으로 대상 해역에 입사하는 다양한 파랑 특성(파고, 파향, 주기)에 대한 파랑 조건을 모두 적용하는 것이 이상적이거나, 수치모형의 한계상 불가능하다. 따라서 파랑 관측자료상 가장 빈도가 높고, 금강하구역의 해수유동에 영향을 줄 수 있는 파랑(파고: 0.5 m, 파주기: 4.8 sec, 입사파의 파향: 330° (NW), -x축 기준 반시계방향)을 대표적으로 선정하였다. 특히, CASE2W의 경우 NW방향에서 입사된 파랑은 길이 약 7 km인 북측 도류제로 인하여 개야수로 북측까지 반사파가 진행된다. 그러므로 본 연구에서는 반사파의 영향도 고려하였다. 북측 도류제는 경사식으로 이루어져 있고, 경사식 도류제나 방파제의 전면에서의 반사율은 0.3~0.6으로 알려져 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2005). 본 연구에서는 반사율은 중앙값을 선택하여 0.45로 선정하여 실험하였다. 또한, 해수면의 변동을 고려하여 만조 시와 간조 시에 대한 각각의 파랑전파 실험을 수행하였다.

3.1.3 FLOW2DH 수치모형 입력자료

해수유동 수치모형의 입력조건 중 개방 경계조건인 조석상

수는 Kang and Park (2010)의 연구에서와 같이 4대분조인 M2, S2, K1, O1과 N2, M4까지 입력조건으로 적용한 사례가 있다. 그러나 서해안은 조위조건 중 4대분조와 N2 분조가 우세하기 때문에 FLOW2DH 수치모형은 M2, S2, K1, O1, N2 분조를 입력조건으로 하였다. 또한, 퇴적물이동과 해저면 변화를 대표할 수 있는 대표 조석은 유속, 해저질, 전단응력과 퇴적물 이동량 간의 비선형적 관계를 고려하면 평균 조석보다는 평균 대조기에 가까운 조석을 대표로 삼을 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 평균 대조기를 입력조건으로 하였다.

3.1.4 SEDTRAN 수치모형 입력자료

본 연구의 대상지역인 개야수로 인근은 금강하구둑과 각종 인공구조물 공사들이 시기적으로 중복하여 건설되었고, 동일 시기에 상당한 영역에서 장기간에 걸쳐 준설이 이루어졌다. 준설 손실로 인하여 개야수로의 지형변화에 직접적인 영향을 주었을 것으로 판단하나, 준설위치, 준설기법, 준설 시 조류의 방향, 속도, 준설 손실률에 대한 자료가 미비하여 SEDTRAN 수치모형에서는 준설에 대해 고려하지 않았다.

앞서 서론에서 언급한 바와 같이, SEDTRAN 수치모형의 입력자료는 SWAN 수치모형의 입사파 파랑전파 결과, 반사파의 결과, FLOW2DH 수치모형의 해수유동 결과가 입력자료로 사용되었다. 특히, SWAN 수치모형의 만조 시 입사파 파랑전파와 반사파 결과는 FLOW2DH 수치모형의 해수유동 결과의 창조 시에 입력되도록 하였다. SWAN 수치모형의 간조 시 입사파 파랑전파와 반사파 결과는 FLOW2DH 수치모형의 해수유동 결과의 낙조 시에 입력되도록 하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 SWAN 수치모형 결과

Table 1과 같이, 만조 시 CASE1W는 북방파제와 북측 도류제가 건설 전이므로 파랑이 군산외항(P2)까지 약 0.2 m의 파랑이 입사되었고, 개야수로(P5~P9)에는 평균 0.16 m의 파랑이 전파되는 것으로 계산되었다. 만조 시 CASE2W는 각종 인공구조물이 완성된 후이기 때문에 군산 외항(P2)은 파랑에 의한 영향은 미약하여 항내 안정을 가져왔다. 하지만 개야수로(P5~P9)에서는 입사파와 반사파(팔호의 값) 합산 평균 약 0.24 m의 파랑이 전파되는 것으로 계산되었다. CASE2W의

Table 1. Wave propagation result at high tide considering incident and reflected waves

Unit : m	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
CASE1W	0.27	0.18	0.11	0.03	0.13	0.16	0.16	0.16	0.21
CASE2W (+ref. wave)	0.10 (0.0)	0.05 (0.0)	0.13 (0.03)	0.04 (0.01)	0.16 (0.04)	0.22 (0.04)	0.24 (0.06)	0.24 (0.06)	0.35 (0.10)

Table 2. Wave propagation result at low tide considering incident and reflected waves

Unit : m	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
CASE1W	0.20	0.09	0.08	0.02	0.10	0.12	0.11	0.13	0.18
CASE2W (+ref. wave)	0.10 (0.0)	0.03 (0.0)	0.10 (0.0)	0.02 (0.0)	0.11 (0.01)	0.14 (0.00)	0.15 (0.03)	0.18 (0.03)	0.25 (0.06)

개야수로는 길이 약 7 km인 북측 도류제의 북측 사면에서 발생하는 반사파의 영향에 의해서 CASE1W와 대비하여 파랑전파가 약 50 % 증가하였다.

Table 2와 같이 간조 시 CASE1W는 파랑이 군산외항(P2)까지 약 0.1m의 파랑이 입사되었고, 개야수로(P5~P9)에는 평균 0.13 m의 파랑이 전파되는 것으로 계산되었다. 간조 시 CASE2W는 개야수로(P5~P9)에서는 평균 약 0.17 m의 파랑이 전파되는 것이 계산되었다. 만조 시의 경우와 유사하게 CASE2W의 개야수로는 북측 도류제의 반사파의 영향을 받는 지역으로 CASE1W와 대비하여 파랑전파가 약 40 % 증가하였다.

반사파를 제외하더라도 만조 시와 간조 시 모두 개야수로(P5~P9)의 파랑전파는 CASE2W가 CASE1W에 대비 약 20 % 증가하였다. 이는 북방파제와 북측 도류제에 의한 입사파의 회절 및 증첩에 의한 것으로 판단된다.

3.2.2 FLOW2DH 수치모형 결과

Table 3과 같이, CASE1W에서는 군산외항 주수로(P1)의 최대 유속이 1.04 m/s로 나타났으며, 군산외항(P2)의 최대 유속은 0.03 m/s, 장항항 수로(P3)의 유속은 최대 1.00 m/s, 군산내항(P4)의 유속은 최대 0.65 m/s, 개야수로 남서측(P5)의 유속은 최대 0.71 m/s, 개야수로 남동측(P6)의 최대 유속은 0.95 m/s, 개야수로 북서측(P7)의 최대 유속은 1.14 m/s, 개야수로 북동측(P8)은 1.17 m/s, 개야수로 북측 입구(P9)는 1.16 m/s로 계산되었다. CASE2W에서는 군산외항 주수로(P1)의 최대 유속이 0.98 m/s로 나타났으며, 군산외항(P2)의 유속은 0.01 m/s, 장항항 수로(P3)의 유속은 최대 0.94 m/s, 군산내항(P4)의 유속은 최대 0.60 m/s, 개야수로 남서측(P5)의 유속은 최

대 0.95 m/s, 개야수로 남동측(P6)의 최대 유속은 1.25 m/s, 개야수로 북서측(P7)의 최대 유속은 1.32 m/s, 개야수로 북동측(P8)은 1.45 m/s, 개야수로 북측 입구(P9)은 1.29 m/s로, 금란도의 건설로 인하여 CASE2W의 개야수로 구간(P5~P9)은 CASE1W의 비해 유속이 10~30 % 빠르게 계산되었다.

3.2.3 SEDTRAN 수치모형 결과

해저면에 작용하는 저면전단응력은 조석 주기 내에서 매 시 각 변화하나, 각 점에서의 전단응력 중 최댓값인 최대 저면전단응력이 지형변화에 미치는 영향이 큰 편이다. 특정 정점에서 저면전단응력이 침식한계 저면전단응력보다 큰 시간 동안 침식이 발생하게 되고 침식된 퇴적물 입자들은 부유 형태로 여러 지역으로 분산된다. 부유한 입자들은 각 입자들의 무게, 유속의 흐름에 대한 진행 방향 및 수심의 변화 등에 의해서 계속적으로 부유해 있거나 침강하여 지형변화를 유발한다.

개야수로 인근의 부유사 이동과 해저면 변화를 분석하기 위하여 필요한 저면전단응력의 분포를 계산하였다. 각종 인공구조물 건설이 완공되기 전과 후인 CASE1W와 CASE2W를 비교하기 위하여 평균 대조기의 조석 1주기에 대한 최대 저면전단응력을 Fig. 3에, 창조 태음 3시의 부유사농도 분포에 대하여 Fig. 4에, 낙조 태음 9시의 부유사농도 분포에 대하여 Fig. 5에 각각 도시하였다.

Fig. 3과 같이 파랑과 조석이 공존하는 복합 파랑장에서 CASE1W와 CASE2W의 최대 저면전단응력은 외해에서는 상당히 유사하게 계산되었으나, CASE1W의 경우에는 주수로 대부분의 최대 저면전단응력이 1.0 N/m² 이상의 구간으로 계산되었다. CASE2W의 경우에는 북측도류제의 반사파 영향으로 개야수로의 대부분이 최대 저면전단응력이 1.0 N/m² 이상의

Table 3. Tidal current result of maximum floods and maximum ebbs

Unit : m/s		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
CASE1W	Max. flood	1.04	0.03	1.00	0.65	0.71	0.95	1.14	1.17	1.16
	Max. ebb	0.94	0.02	0.68	0.34	0.46	0.63	0.84	0.87	0.89
CASE2W	Max. flood	0.98	0.01	0.94	0.60	0.95	1.25	1.32	1.45	1.29
	Max. ebb	0.86	0.01	0.54	0.32	0.61	0.82	0.99	1.01	1.03

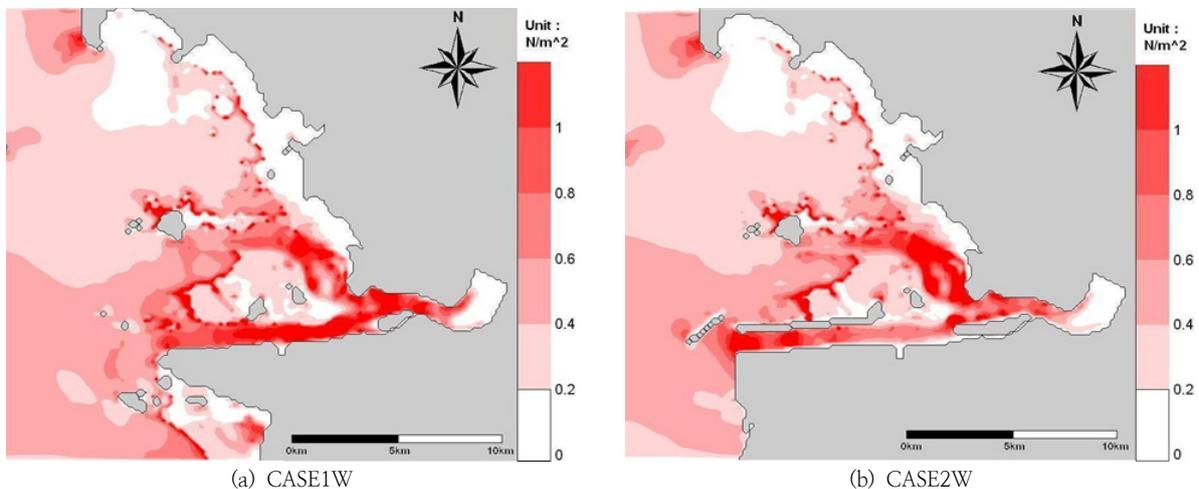


Fig. 3. Drawing of maximum bottom shear stress distribution.

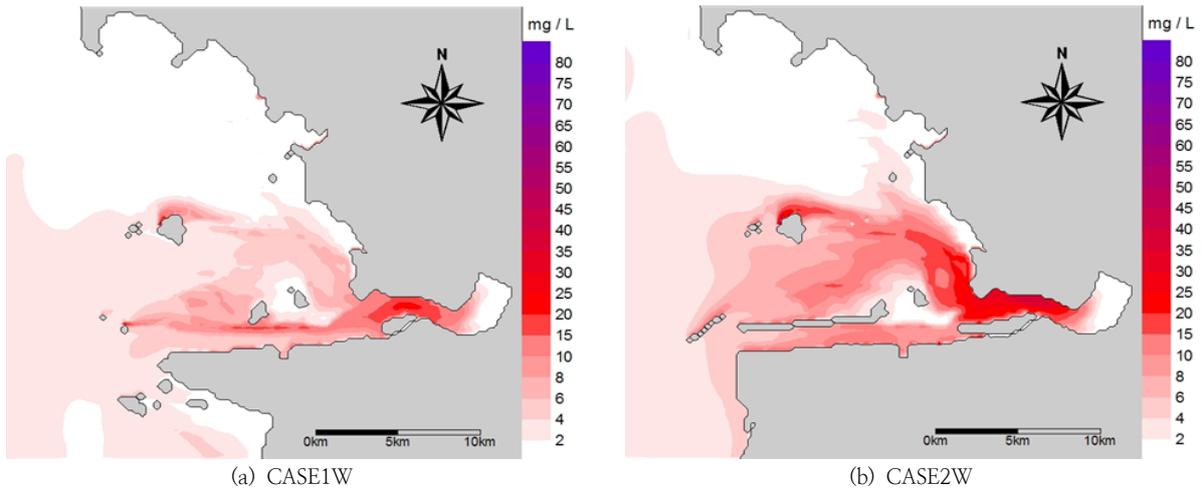


Fig. 4. Drawing of suspended sediment concentration distribution at flood(3hour)

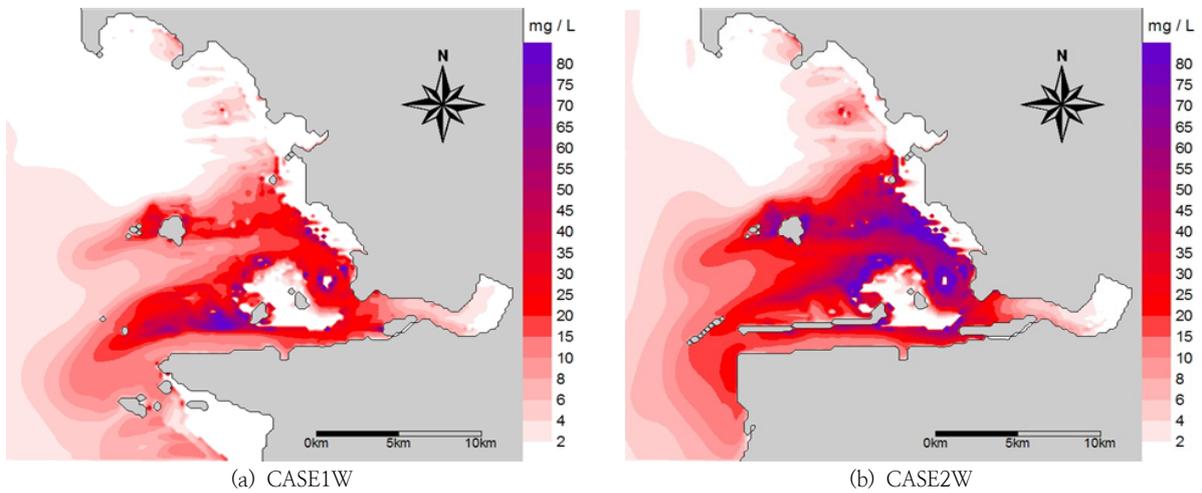


Fig. 5. Drawing of suspended sediment concentration distribution at ebb(9hour)

구간으로 계산되었다. 특히, 군산외항 주수로(P1), 장항항 수로(P3), 군산내항(P4)은 CASE1W가 CASE2W에 비해서 최대 저면전단응력이 크게 계산되었으나, 개야수로(P5~P9)에서는 전반적으로 CASE2W가 CASE1W에 비해서 최대 저면전단응력이 크게 계산되었다. 이는 각종 인공조물들 중 북측 도류제에 의한 반사파가 생성되면서 개야수로의 북측(P7~P9)까지 파랑전파의 범위가 증가되었다. 이와 더불어 금란도의 완공에 의해 군산외항 주수로(P1) 방향으로 해수유동이 일부 차단됨에 따라 해수유동이 개야수로(P5~P9) 방향으로 이동하면서 개야수로의 최대 저면전단응력을 향상시키는데 기여한 것으로 판단된다.

Fig. 4, 5와 같이 부유사농도 분포는 Fig. 3의 최대 저면전단응력 분포도를 통해 예측할 수 있다. 창조 시 CASE1W의 부유사농도는 군산외항 주수로(P1)를 거쳐 장항항 수로(P3)를 지나 군산내항(P4)에 이르는 구간이 개야수로에 비해 높게 분포되어 있다(Fig. 4(a) 참조). 그러나 창조 시 CASE2W의 부유사농도 분포가 개야수로(P5~P9)에서 장항항 수로(P3)를 지나 군산내항(P4)에 이르는 구간으로 변경되었음을 보여주고 있다(Fig. 4(b) 참조). 이는 북방파제, 북측 도류제, 금란도의

완공으로 인하여 개야수로의 파랑전파와 해수유동 변화가 발생하였다. 이에 따라 개야수로 인근으로 부유사농도가 높게 분포된 것으로 판단된다. 낙조 시는 CASE2W의 부유사농도가 80 mg/L 이상인 구간이 개야수로(P5~P9)의 인근에서 상당히 넓게 분포된 것이 계산되었고(Fig. 5(b) 참조), CASE1W는 군산외항 주수로(P1)의 북측 인근에서 부유사농도 80 mg/L 이상인 구간이 넓게 분포된 것이 계산되었다(Fig. 5(a) 참조). 결과적으로 개야수로(P5~P9) 인근의 부유사농도가 높고 넓게 분포되었다는 것은 전반적으로 개야수로 인근으로 퇴적물이 이동하여 개야수로에 퇴적현상이 발생한 것이라고 판단된다.

4. 결 론

입사파와 반사파를 고려한 SWAN 수치모형의 파랑전파 결과와 조석을 고려한 FLOW2DH의 해수유동 결과를 SEDTRAN 수치모형의 입력자료로 사용하여 개야수로 인근의 부유사농도 분포를 각종 인공구조물 설치 전(CASE1W)과 후(CASE2W)로 구분하여 비교하였다.

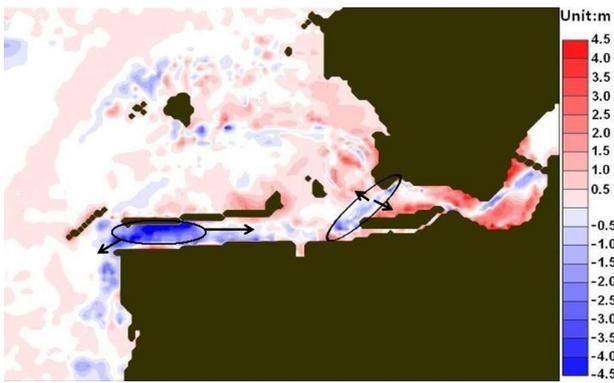


Fig. 6. Drawing of sedimentary height distribution in 1990 and 2010 (Sedimentation appears positive and Erosion appears negative)

비교 결과, 개야수로 인근 P5~P9 지점에서 파랑전파에 의한 파고와 해수유동에 의한 유속이 증가하였고, 이 증가된 파고와 유속은 개야수로 인근의 부유사농도를 높고 넓게 분포시켰다. 이는 북방파제에 의한 파랑의 회절과 중첩, 북측 도류제에 의한 파랑의 반사와 중첩, 북방파제, 북측 도류제, 금란도에 의한 해수유동의 양상 변화가 원인으로 판단된다.

한 가지 문제점은 금강하굿둑의 배수갑문 운영으로 인한 하천방류수가 군산내항(P4)을 거쳐 장항항 수로(P3)를 지나서 개야수로(P5~P9) 방향으로 대부분 이동할 것인지, 군산외항 주수로(P1) 방향으로 대부분 이동할 것인지에 대한 수치모형 예측은 누락되었다. 이유는 금강하굿둑의 배수갑문 운영은 나 조 시 운영하는 것이 자명하지만, 개방 시기(땡수기, 홍수기 등), 운영 시간, 방류량 등이 일정하지 않아 본 연구에서는 고려하지 않았다. 그러나 금강하굿둑의 배수갑문 운영이 개야수로의 퇴적물 이동에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

참고로 Fig. 6은 1990년과 2010년까지의 수치해도를 비교하여 그 기간 동안의 퇴적고 분포를 구하여 제시하였다. 왼쪽 검정색 타원은 북방파제, 북측 도류제 및 군장산업기지 건설로 인한 유속 강도가 증가하여 해저면 침식이 유발되었고, 왼쪽 검정색 타원은 항로 준설이 수행된 곳이다. 이처럼 유속에 의한 침식과 손실된 준설부유사가 창조 시 군산외항 주수로(P1)를 지나 개야수로(P5~P9), 금란도 북측 및 군산내항(P4)으로 이동하였을 것으로 추정된다. 또한 오른쪽 검정색 타원은 금란도 완공으로 장항항 수로(P3)가 침식되었고, 침식된 퇴적물은 개야수로(P5~P9), 금란도 북측 및 군산내항(P4)으로 이동하였을 것으로 추정된다.

Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)의 CASE2W와 Fig. 6을 비교해보면, 북측 도류제 동측단 인근, 개야수로 인근, 금란도 북측, 군산내항 인근의 퇴적 구간이 일치하고 있다.

일반적으로 퇴적물 이동 수치모형실험은 관련 변수의 불확실성이 높아 실험결과를 정량적으로 해석하기에 어려움이 많은 것으로 알려져 있으나, 본 연구와 같이 주어진 환경을 동일하게 적용하고 일부의 지형자료만 변경하는 경우, 각종 인공구조물 건설 전후의 실험결과를 상호 비교하는 경우에는 정성적 차이를 파악하는 데 의미 있게 활용할 수 있다.

References

- Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries. (2002). A Survey Report of Hydrodynamic Characteristic Changes at Keum River Estuary. [Korean Literature]
- Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries. (2004). A Survey Report of Hydrodynamic Characteristic Changes at Keum River Estuary. [Korean Literature]
- The SWAN team. (2008). SWAN user manual. Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, Version 40.72, available from <http://www.fluidmechanics.tudelft.nl/swan/index.htm>
- KIM, TI (2002). Hydrodynamics and Sedimentation Processes in the Keum River Estuary, West Coast of Korea, Ph.D. dissertation, Sungkyunkwan University, Korea. [Korean Literature]
- Yoo, HJ, Cho, JG, Kim, TI, Park, SJ, Lee, SY, Bang, GY, and Jung, JM (2019). Analysis of Sediment Transport Characteristics in Geum Estuary Using Delft3D Numerical Model, *Proceedings of the 7th Annual Conference, Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, Korean Society of Coastal Disaster Prevention, Jeju, Korea, p.109. [Korean Literature]
- Cho, JG, Song, YS, Kim, TI, and Jeong, ES (2017). A Integrated Numerical Model Development of Geum River Estuary with Watershed-River-Estuary, *Proceedings of Cooperation Spring Conference, Journal of Korean Society on Water Environment*, Gwangju, Korea, March 2017, pp.106-107. [Korean Literature]
- Deltares systems. (2021). Delft3D-FLOW, User Manual, Version: 3.15, Deltres, Netherlands, pp.7-10.
- Jang, CH (2009). Development of noncohesive sedimentary environment prediction system, Ph.D. dissertation, Kookmin University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Jang, CH, Kim, HS, Ihm, NJ (2012). A Development of Coupled Wave-Induced Current Modeling System and Its application to the Idealized Shoreline with Detached Breakwater, *Journal of wetlands research*, Korean Wetlands Society, 14(4), pp.439-455. [Korean Literature]
- Park, GJ, Jung, MJ, Kim, HS, Kim, Y, and Yoo, JY (2012). The Review of Models for Effect of Sediment in Weir Section, *Proceedings of the KAIS Spring Conference, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Korea, May 2012, pp.348-351.
- Whitham, GB (1974). Linear and nonlinear waves, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Dingemans, MW (1994). Water wave propagation over uneven bottom, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Netherlands.
- Kim, HS (1993). Three Dimensional Sediment Transport Model, Ph.D. dissertation, University of Liverpool, United

- Kingdom.
- Flather, RA and Heaps, NS (1975). Tidal computations for Morecambe Bay. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42(2), pp.489–517. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb05874.x>
- Swart, DH (1976). Predictive equations regarding coastal transports, *Proceedings 15th Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.1113–1132.
- Ministry of Oceans and Fisheries. (2005) Port and fishing port design standards. [Korean Literature]
- Kang, SJ and Park, YK (2010). Comparative Analysis for Numerical Modeling of Tidal Current on Geum River Estuary, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 11(9), pp.3583–3589. [Korean Literature] DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.9.3583>