

# 파랑-흐름의 상호작용 하에서 지형변동에 관한 3차원 연성 수치모델의 개발

이우동\* · 허동수\*\*

Lee, Woo-Dong\*, Hur, Dong-Soo\*\*

## Development of a 3-D Coupled Hydro-Morphodynamic Model between Numerical Wave Tank and Morphodynamic Model under Wave-Current Interaction

### ABSTRACT

In order to understand hydrodynamic and morphodynamic characteristics under wave-current interactions in an estuary, a coupled model for two-way analysis between existing 3-d numerical wave tank and newly-developed 3-d morphodynamic model has been suggested. Comparing to existing experimental results it is revealed that computed results of the newly-suggested model are in good agreement with each laboratory test result for wave height distribution, vertical flow profile and topographical change around ocean floor pipeline in wave-current coexisting field. Also the numerical result for suspended sediment concentration is verified in comparison with experimental result in solitary wave field. Finally, it is shown that the 3-D coupled Hydro-Morphodynamic model suggested in this study is applicable to morphological change under wave-current interaction in an estuary.

**Key words :** Wave-current interaction, Morphological change, 3-D coupled Hydro-Morphodynamic model, Suspended sediment concentration

### 초 록

본 연구에서는 파랑과 흐름이 공존하는 하구 주변의 수리특성 및 지형변동특성을 이해하기 위하여 새롭게 3차원 지형변동 모델을 개발함과 더불어 3차원 파동장 모델과 양방향 연성 수치모델을 제안하였다. 그리고 파랑-흐름 공존장에서의 파고분포, 연직유속분포, 해저파이프라인 저면의 지형변동 및 고립파 내습 시에 해빈 저면 부유사 농도의 시간분포에 관한 수치모형실험결과들과 비교·분석하여 개발한 연성 수치모델을 검증하였다. 이로써 본 연구에서 개발한 연성 수치모델의 타당성 및 유효성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 이 연성 수치모델이 파랑과 흐름이 공존하는 하구지역의 지형변동 예측에 적용이 가능한 것을 확인하였다.

**검색어 :** 파랑-흐름의 상호작용, 지형변동, 3차원 연성수치모델, 부유사 농도

\* 정회원 · 국립경상대학교 해양산업연구소 특별연구원 (Gyeongsang National University · leewoodong@gnu.ac.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 국립경상대학교 해양토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · dshur@gnu.ac.kr)

Received March 5, 2014/ revised April 28, 2014/ accepted July 23, 2014

## 1. 서론

하구는 담수와 해수가 만나고, 파랑과 흐름이 공존하는 지역일 뿐만 아니라 육지에서 해양으로 이어지는 물질수송의 중요한 경로로서 물리적으로 상당히 역동적이고 복잡한 지역이다. 이에 많은 연구자들이 과거부터 하구지역의 동수학적 및 지형학적 특성을 이해하기 위하여 현장조사를 비롯하여 수리 및 수치실험들이 수행되었다. 하지만 대부분의 수리모형실험에서는 거의 대부분 담수와 해수의 밀도차가 없을 경우 발생하는 homopycnal flow 조건에서 논의하고 있는 실정이다. 그리고 수치모형실험에서는 지극히 3차원적인 밀도류를 평면적으로 해석하는 연직적분모델을 이용하거나, 담수와 해수의 밀도차를 고려하지 않는 3차원 수치모델을 이용하는 연구들이 대부분이다. 또한 제한적인 현장조사로부터 얻어진 분석 결과로부터 하구지역의 전체적인 수리현상을 이해하기에는 부족함이 있는 것이 현실이다.

관측 장비가 발달함에 따라 최근에 현장조사들이 많이 이루어지고 있다. 대표적으로 Herbers and Jansen (2010)은 하구 주변에서 측정된 자료를 바탕으로 파의 변형특성에 대해 고찰하였고, Tanaka et al. (2000)과 Nguyen et al. (2007)은 하구에서의 wave setup에 관하여 현장조사를 실시하였고, Donnell (1997)은 현장에서 유속, 염분, 온도를 측정하여 분포특성을 분석하였다. 현장조사를 통하여 얻어진 결과는 어떠한 자료보다 신빙성을 가지고 있으나, 측정 장비의 발달에도 불구하고 넓은 현장지역에서 제한적인 자료를 확보할 수밖에 없는 것이 현실이다. 따라서 이를 극복하고 대처하기 위해 수리모형실험과 수치시뮬레이션이 이루어지고 있다.

수리모형실험에서 Smith et al. (1998)은 3차원적인 하구모형에서 파랑과 흐름의 상호작용에 의한 파랑변형특성에 대해 조사하였다. Lee and Mizutani (2007)는 하천으로 유입되는 파랑과 흐름의 상호작용에 의한 파고분포, 연직유속분포의 특성에 대해 고찰하였다. Ibrahim et al. (2008)는 실험실조건에서의 해수와 담수의 상호작용에 의한 염분을 측정하여 연직분포특성에 대해 논의하였다.

수치시뮬레이션은 주로 실제지형을 적용한 평면 2차원 모델(Shi et al., 2001; de Broye et al., 2010) 또는  $\sigma$ 좌표계를 채택한 모델(Sutherland et al., 2004; Lesser et al., 2004)을 이용하는 연구들이 많으며, 이 연구들은 파랑의 효과를 고려하기 위하여 SWAN이나 WAM 같은 파랑모델로부터 산정된 wave radiation stress를 가져 오기도 한다(Lesser et al., 2004; Zhang et al., 2010; Liang et al., 2012). 하지만 이상의 연구들은 유동장의 3차원적인 특성을 지형변동과 연관시켜 해석하기에는 부족함이 있을 뿐만 아니라, 거의 대부분 하구에서 담수와 해수의 밀도차가 없을 경우에 발생하는 homopycnal flow 조건 하에서 이루어지고 있다. 또한 담수-해수, 파랑-흐름의 상호작용 하에서 지형변동특성을 고찰하기에는

부족한 점이 많다.

따라서 실제 하구역과 같이 상대적으로 밀도가 작은 담수가 바다로 유입될 때 밀도차에 의해 발생하는 hypopycnal flow 조건 하에서 파랑-흐름의 상호작용에 관한 3차원 동수학적 및 지형학적 특성을 파악하기 위하여 새로운 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 개발하였다. 먼저 3차원 지형변동 모델은 van Rijn (1984a, 1984b)이 제안한 소류사 및 부유사 산정식을 적용하며, 부유사의 이류-확산을 추정하기 위하여 3차원 이류-확산 방정식을 도입하였다. 또한 두 모델간의 양방향 연성해석을 위하여 온도, 염분, 부유사 농도에 따른 상태방정식 그리고 지반고에 따른 공극률 산정식을 개발하여 도입하였다. 그리고 최종적으로 개발하는 연성 수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 기존의 수리모형실험결과와 비교·분석하여 타당성과 유효성을 확보하였다.

## 2. 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)의 개발

본 연구에서는 파랑-흐름의 공존장에서 유체-지반의 비선형 상호작용에 의한 지형변동에 관한 수치모델을 개발하기 위하여 먼저 3차원 지형변동을 계산할 수 있는 방정식을 코드화함과 동시에 기존의 3차원 파동장 모델(LES-WASS-3D ver. 2.0; Lee and Hur, 2014)과의 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 개발하였다. 기존의 3차원 파동장 모델은 Hur et al. (2012)에 의해 개발된 3차원 N-S Solver의 LES-WASS-3D ver. 1.0을 토대로 밀도류 해석을 위하여 개량된 LES-WASS-3D ver. 2.0이다. 여기서 ver. 1.0은 PBM (Porous Body Model)을 기반으로 파랑/흐름-해저지반-구조물의 비선형 상호작용을 직접해석 할 수 있다. 그리고 ver. 2.0은 염분과 온도에 따른 밀도류 해석을 위하여 물의 밀도 및 동점성계수에 관한 상태방정식(Gill, 1982; Riley and Skirrow, 1965)과 염분과 온도에 관한 3차원 이류-확산 방정식을 도입하였다. 게다가 난류제현을 위해 LES기법의 와동점성모델(Smagorinsky, 1963)을 개량한 Germano et al. (1991)과 Lilly (1992)의 동적 와동점성모델 그리고 자유수면의 표면장력을 수치적으로 고려하기 위하여 CSF (Continuum Surface Force) 모델(Brackbill et al., 1992)이 적용되었다.

### 2.1 3차원 파동장 모델

#### 2.1.1 기초방정식

기초방정식은 3차원 비압축성·점성유체에서 무반사로 파랑과 흐름을 발생시킬 수 있는 소스항이 포함된 연속방정식 Eq. (1)과 투과성 구조물 내부의 유체저항을 고려한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 Eq. (2)로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = \\ - \frac{\gamma_v}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - D_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $v_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속,  $q^*$ 는 소스의 유량밀도,  $\gamma_v$ 는 체적 공극률,  $\gamma_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 면적 공극률,  $t$ 는 시간,  $\rho_m$ 는 온도 염분, 부유사 농도를 고려한 물의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\nu_T$ 는 온도, 염분, 부유사 농도를 고려한 물의 동점성계수( $\nu_m$ )와 와동점성계수( $\nu_i$ )의 합을 의미한다.  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ 는 변형률속도텐서,  $S_i$ 는 CSF모델(Brackbill et al., 1992)을 기반으로 한 표면장력항,  $Q_i$ 는 파랑 또는 흐름의 소스항,  $R_i$ 는 투과성 매체에 의한 유체저항 항,  $g_i$ 는 중력가속도항,  $D_i$ 는 에너지 감쇠항을 나타낸다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i v_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = F q^* \quad (3)$$

VOF합수  $F$ 는 각 격자에서 유체가 차지하고 있는 체적비율로써 연속방정식 Eq. (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM (porous body model)에 기초한 VOF합수를 적용하여 유체의 보존형식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

나머지 투과성 매체의 유체저항, 난류모델, 표면장력 그리고 염분과 온도에 관한 3차원 이류-확산 방정식 등과 같은 파동장 모델(LES-WASS-2D ver. 2.0)의 상세한 사항은 Lee and Hur (2014)를 참조하기 바란다.

## 2.2 3차원 지형변동 모델

본 연구에서 개발하는 3차원 지형변동 모델은 소류사영역과 부유사영역으로 구분하여 전체적인 지형변동량을 산정하는 시스템이다. 여기서 소류사는 파동장 모델에서 얻어진 지반 상의 유속을 적용하여 소류사 산정식에 대입하여 이동량을 추정한다. 그리고 부유사 역시 파동장 모델에서 얻어진 유속을 지반에 작용시켜, 퇴적물의 부유량을 산정함과 동시에 3차원 이류-방정식에 의한 부유사의 이류-확산 그리고 침강을 추정하게 된다.

### 2.2.1 소류사의 산정

소류사의 산정은 van Rijn (1984a)이 제안한 산정식을 적용하여 각 격자에서의 소류사 이동량을 추정한다. 또한 파동장 모델에서 얻어진 유속을 대수법칙에 적용하여 지반의 전단유속을 계산함과

동시에 전단유속을 이용하여 Shields수를 계산한다. 최종적으로 이상의 값들을 산정식에 대입하여 소류사 이동량을 추정할 수 있다.

van Rijn (1984a)이 제안한 소류사의 이동량 산정식 Eq. (4)는 Shields수와와의 관계식으로써 지반의 전단유속에 의해 계산된 Shields수가 한계 Shields수를 초과할 경우에만 소류사의 이동량이 발생하게 된다.

$$S_b = \begin{cases} A_b \frac{\{(s-1)gd_p^3\}^{1/2}}{D_*^{0.3}} \left( \frac{\theta}{\theta_{cr}} - 1 \right)^{0.21} & : \theta > \theta_{cr} \\ 0 & : \theta \leq \theta_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $A_b$ 는 경험상수( $A_b = 0.053$ ),  $s$ 는 소류사의 비중( $s = \rho_s/\rho_f$ ;  $\rho_s$ 는 소류사의 밀도,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도),  $\theta$ 는 Shields수,  $\theta_{cr}$ 은 한계 Shields수,  $d_p$ 는 평균입경 그리고  $D_*$ 는 무차원 입경 매개변수으로써 Eq. (5)와 같으며,  $g$ 는 중력가속도 그리고  $V_f$ 는 전단유속이다.

$$D_* = \left\{ \frac{g(s-1)}{V_f^2} \right\}^{1/3} d_p \quad (5)$$

소류사의 이동량 산정식 Eq. (4)에 대입되는 Shields수( $\theta$ )는 Eq. (6)에 의해 구해진다. 또한 한계 Shields수( $\theta_{cr}$ )는 지반경사의 영향을 고려할 수 있는 Roulund et al. (2005)이 채택하고 있는 Eq. (7)을 적용한다.

$$\theta = \frac{V_f^2}{(s-1)gd_p} \quad (6)$$

$$\theta_{cr} = \theta_{cr0} \left\{ \cos\beta_b \left( 1 - \frac{\sin^2\alpha' \tan^2\beta_b}{\mu_s^2} \right)^{1/2} - \frac{\cos\alpha' \sin\beta_b}{\mu_s} \right\} \quad (7)$$

여기서  $\theta_{cr0}$ 는 수평지반에서의 한계 Shields수으로써 Soulsby and Whitehouse (1997)이 제안한 Eq. (8)에 근거하여 산정된다. 그리고  $\alpha'$ 는 경사면에서 전단유속과 중력이 작용하는 각,  $\beta_b$ 는 지반의

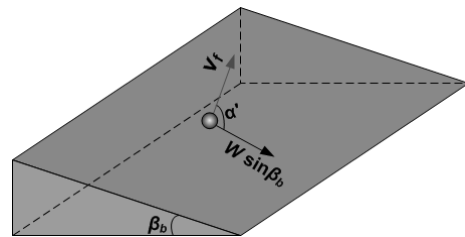


Fig. 1. Force Balance on a Single Moving Particle on a Sloping Bed

경사각을 의미한다(Fig. 1 참조).  $\mu_s$ 는 소류사 입자간의 동적마찰계수( $\mu_s = \tan \alpha_s$ ),  $\alpha_s$ 는 소류사 입자간의 동적마찰각으로서 Lambe and Whitman (1964)이 제안한 0.63을 적용한다.

$$\theta_{cr0} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055\{1 - \exp(-0.02D_*)\} \quad (8)$$

Shields수를 산정하기 위해서는 Eq. (6)에 대입되는 전단유속 ( $V_f$ )은 표사이동에 직접영향을 미치는 유속으로서 파동장 모델에서 계산된 지반 상의 유속( $V_b$ )을 대수법칙 관계식 Eq. (8)에 대입하여 산정한다.

$$\frac{V_b}{V_f} = \frac{1}{\kappa'} \ln \frac{z_h}{k_s} + B \quad (8)$$

여기서  $V_b$ 는 파동장 모델에서 계산된 유속으로써 지반의 표면격자에 가장 인접한 수평유속의 합력,  $z_h$ 는  $v_b$ 와  $v_f$ 의 최단거리이며, 지반고에 따라 Fig. 2와 같이 정의한다. 그리고  $k_s$ 는 상대조도높이( $k_s = 2.5d_p$ ),  $\kappa'$ 는 부유사 농도에 따른 수정된 Kármán 상수로서 Xiong (2010)이 채택하고 있는 Eq. (9)를 적용한다. 또한  $B$ 는 지반 조도의 영향을 고려할 수 있는 부가적인 항으로서 Cheng and Chiew (1998) 그리고 Cheng (2008)이 제안한 Eq. (10)을 이용한다.

$$\kappa' = \kappa_0 - 1.68(0.365 - C) \sqrt{C} \quad (9)$$

$$B = 8.5 + (2.5 \ln k_s^+ - 3) \exp\{-0.11(\ln k_s^+)^{1/4}\} \quad (10)$$

Eq. (9)에서  $\kappa_0$ 는 von Kármán 상수( $\kappa_0 = 0.4$ ),  $C$ 는 점착성 부유사의 농도,  $k_s^+$ 는 조도의 레이놀즈수로써 Eq. (11)과 같이 계산

할 수 있다. 또한 Eq. (10)의 조도에 관한 부가적인 상수( $B$ )는  $5.5 \leq B \leq 8.5$ 의 값을 가지며, 5.5에 가까울수록 매끄러운 표면의 지반, 8.5에 근접할수록 표면이 거친 지반을 의미한다.

$$k_s^+ = \frac{V_f k_s}{\nu_f} \quad (11)$$

### 2.2.2 부유사 산정

본 연구에서는 3차원적인 거동을 나타내는 부유사를 수치적으로 해석하기 위하여 van Rijn (1984b)의 개념을 도입하여 퇴적물의 부유 및 침강에 관한 소스싱크항을 도입함과 동시에 3차원 이류-확산 방정식을 이용하여 부유사의 3차원적인 이동경로를 추정할 수 있다.

지반의 표면에서는 퇴적물의 부유(pickup) 및 부유사의 침전(deposition)에 의해 지반 표면격자의 부유사 농도가 결정되며, 부유사의 근원으로써 부유사 해석의 시발점이 된다. 따라서 본 연구에서는 Lesser et al. (2004)이 제안한 부유사의 소스 및 싱크의 개념을 도입하여 지반표면의 부유사 농도를 Eq. (12)와 같이 추정한다. 그리고 추정된 지반표면의 부유사의 농도( $Q_{ss}$ )는 3차원 이류-확산방정식 Eq. (20)에 대입됨으로써 지반표면 격자의 부유사 원천으로 작용된다. 그리고 Eq. (12)의  $P_s$ 는 퇴적물의 부유량으로 Eq. (13),  $D_s$ 는 부유사의 침전량으로 Eq. (14)와 같다. 그리하여 퇴적물의 부유 및 부유사의 침강에 따른 지반고의 변화( $\Delta z_s$ )는 Eq. (15)와 같이 표현될 수 있다.

$$Q_{ss} = \begin{cases} (P_s - D_s) / \Delta z_k & : z = z_b \\ 0 & : z \neq z_b \end{cases} \quad (12)$$

$$P_s = C_u \frac{\epsilon_v}{(\Delta z_k - h_a)} \quad (13)$$

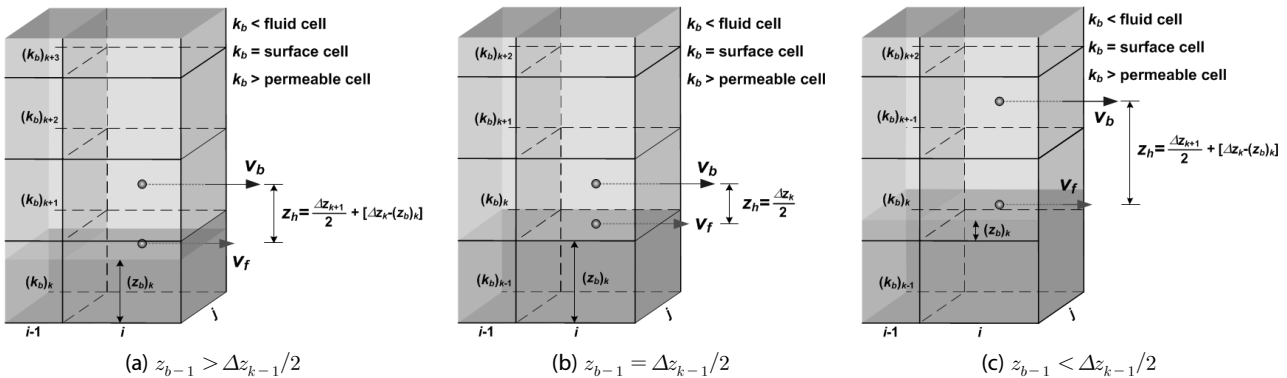


Fig. 2. Explanation Sketch of the Logarithmic Law for Estimation of Shear Velocity

$$D_s = C_b \left( \frac{\epsilon_v}{(\Delta z_k - h_a)} + w_s \right) \quad (14)$$

$$\Delta z_s = D_s - P_s \quad (15)$$

여기서  $\epsilon_v$ 는 부유사의 연직혼합계수,  $h_a$ 는 지반표면에서 부유사의 기준높이,  $C_a$ 는  $h_a$ 에서의 부유사 농도,  $C_b$ 는 지반표면격자의 부유사 농도를 나타낸다.

지반표면에서의 부유사 농도( $C_a$ )는 van Rijn (1984b)이 제안한 Eq. (16)을 적용하고, 부유사의 기준높이( $h_a$ )는 지반의 조도에 관련한 Eq. (17)를 이용한다(van Rijn, 2003).

$$C_a = \begin{cases} A_s \frac{d_p}{h_a} \frac{T_a^{3/2}}{D_*^{0.3}} & : T_a > 0 \\ 0 & : T_a \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$h_a = \max(0.5\Delta_s, 0.01h) \quad (17)$$

여기서  $A_s$ 는 경험상수( $A_s = 0.015$ ),  $T_a$ 는 지반표면에 작용하는 무차원 전단응력으로써 Eq. (18)과 같이 계산된다. 그리고 Eq. (18)에서  $\tau_b$ 와  $\tau_{cr}$ 은 지반표면에 작용하는 전단응력과 한계전단응력을 나타내며, Shields수와 한계 Shields수로부터 얻어질 수 있다.  $\Delta_s$ 는 사파(sandwaves)높이이며, van Rijn (1984b)이 제안한 Eq. (19)에 의해 산정된다. 또한  $\Delta_s$ 는  $\tau_{cr} < \tau_b < 26\tau_{cr}$ 의 범위 내에서 적용한다.

$$T_a = \frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (18)$$

$$\Delta_s = 0.11h \left( \frac{d_p}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T_a})(25 - T_a) \quad (19)$$

본 연구에서는 부유사의 이류-확산을 추정하기 위하여 Eq. (12)에서 산정된 부유사의 원천( $Q_{ss}$ )을 포함한 3차원 이류-확산 방정식 Eq. (20)을 새롭게 도입한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) = Q_{ss} \quad (20)$$

여기서  $u, v, w$ 는 3차원 파동장 모델에서 얻어지는  $x, y, z$ 의 유속,  $w_s$ 는 부유사의 침강속도,  $\epsilon_h$ 와  $\epsilon_v$ 는 수평과 연직방향의 부유사

혼합계수이며, Eqs. (21) and (22)로부터 산정된다.

3차원 이류-확산 방정식 Eq. (20)에 대입되는 수평방향 부유사 혼합계수는 Eq. (21)과 같이 난류모델에서 산정된 와동점성계수( $\nu_t$ )를 사용하고, 연직방향의 부유사 혼합계수( $\epsilon_v$ )는 경험적 인자가 포함된 Eq. (22)와 같이 얻어진다.

$$\epsilon_h = \nu_t \quad (21)$$

$$\epsilon_v = \sigma_v \beta_v \nu_t \quad (22)$$

여기서  $\sigma_v$ 는 Einstein and Chien (1955)에 의해 제안된 경험인자로 Eq. (23)과 같이 계산될 수 있다.  $\beta_v$ 는 van Rijn의 퇴적인자로 Eq. (24)와 같으며,  $\beta_v$ 는  $1 < \beta_v < 1.5$ 의 값을 가진다.

$$\sigma_v = 1 + \left( \frac{C}{C_0} \right)^{0.8} - 2 \left( \frac{C}{C_0} \right)^{0.4} \quad (23)$$

$$\beta_v = 1 + 2 \left( \frac{w_s}{V_f} \right)^2 \quad (24)$$

여기서  $C_0$ 는 지반표면의 최대부유사 농도으로써  $C_0 = 0.65$ 의 경험값을 가진다.

부유사의 침강속도는 유체 점성의 영향을 받을 뿐만 아니라, 부유사 농도의 영향도 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 부유사 농도를 고려할 수 있는 Soulsby (1997)가 제안한 Eq. (25)를 이용하여 각 격자에서의 침강속도를 계산한다. 그리고 Eq. (25)에서 염분과 온도의 영향을 고려한 동점성계수( $\nu_f$ )를 적용한다.

$$w_s = \frac{\nu_f}{d_s} \left[ \left\{ 10.36^2 + 1.049(1 - C)^{4.7} D_* \right\}^{1/2} - 10.36 \right] \quad (25)$$

여기서,  $d_s$ 는 부유사의 입경으로써 균일 입자의 지반일 경우 평균입경( $d_p$ )이 적용된다. 하지만 균질하지 않은 입자로 구성된 지반에서는 van Rijn and Walstra (2003)가 적용하고 있는 Eq. (26)에 의해 추정된다.

$$d_s = \begin{cases} \min \left[ 0.5d_{50}, \left\{ 1 + 0.0008 \left( \frac{d_{50}}{d_{10}} \right) (\Psi - 250) \right\} d_{50} \right] & : \Psi < 250 \\ d_{50} & : \Psi \geq 250 \end{cases} \quad (26)$$

여기서  $\Psi$ 는 이동성 파라미터이며, Eq. (27)과 같이 구할 수 있다.

$$\Psi = \frac{V_b^2}{(s-1)gd_p} \quad (27)$$

### 2.3 양방향 연성수치해석 방법

파랑-흐름의 공존장에서의 지형변동은 기존의 3차원 파동장 모델과 개발한 3차원 지형변동 모델간의 양방향 연성해석에 의해 이루어진다. 양방향 연성수치해석 방법은 먼저, 파동장 모델에서 산정된 유속을 소류사/부유사 산정식에 대입하여 퇴적물의 이동량을 산정한다. 그리고 퇴적물 이동에 의한 지반고 변화 및 부유사에 의한 유체의 물성치 변화를 파동장 모델에 적용한다. 이 과정을 반복 수행함으로써 유체-지반의 비선형 상호작용에 관한 양방향 연성수치해석이 가능해진다.

#### 2.3.1 지반고 산정식

3차원 지형변동 모델로부터 추정된 소류사 이동량 그리고 퇴적물의 부유 및 부유사의 침강에 따른 지반고의 변화량을 지반고 산정식 Eq. (28)에 대입하여 매시간 변화하는 지반고를 산정한다.

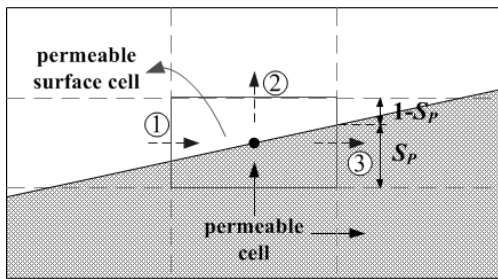
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\gamma_v} \left( \frac{\partial S_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{by}}{\partial y} + \Delta z_s \right) = 0 \quad (28)$$

여기서  $z_b$ 는 지반고,  $\gamma_v$ 는 지반의 공극률,  $S_{bx}$ ,  $S_{by}$ 는 x와 y방향의 소류사의 이동량으로서 Eqs. (29) and (30)에 의해 계산된다.

$$S_{bx} = \frac{u_b}{|u_b|} S_b \sin \phi \quad (29)$$

$$S_{by} = \frac{v_b}{|v_b|} S_b \cos \phi \quad (30)$$

여기서  $u_b$ ,  $v_b$ 는 지반의 지반표면 격자의 수평유속 성분,  $S_b$ 는 수평유속의 합력에 의한 소류사의 이동량,  $\phi$ 는 수평유속의 합력 벡터가 x축과 이루는 각도이다.



(a) Side View(x-z section)

#### 2.3.2 공극률 산정

이상에서 매시간 마다 산정되는 지반고를 파동장 모델에 그대로 적용하기 위해서는 각 격자의 공극률( $\gamma_v$ )을 산정한다. 따라서 본 연구에서는 각 격자의 공극률 산정식 Eq. (31)를 새롭게 제안한다. 여기서 Fig. 2에 나타난 것과 같이  $k=0$ 는 지반과 인접한 지반표면격자,  $k>0$ 은 유체격자,  $k<0$ 은 투과성 지반격자를 의미한다. 따라서 Eq. (31)에 의해 각 격자의 공극률이 산정될 경우 유체격자는 투과성 지반이 존재하지 않기 때문에 1이 주어지고, 투과성 지반격자는 초기 공극률 ( $\gamma_0$ )이 그대로 유지된다. 하지만 지반표면격자는 차지하고 있는 지반고의 비율만큼 공극률이 산정된다.

$$(\gamma_v)_k = \begin{cases} 1 & : (z_b)_k = 0 \\ 1 - \frac{(z_b)_k}{\Delta z_k} (1 - \gamma_0) & : 0 < (z_b)_k < \Delta z_k \\ \gamma_0 & : (z_b)_k = \Delta z_k \end{cases} \quad (31)$$

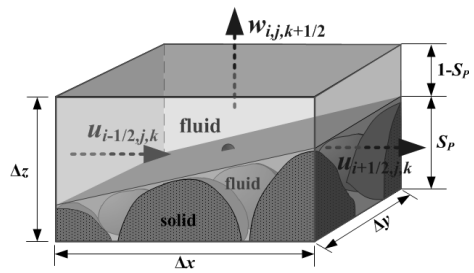
여기서  $\Delta z_k$ 는 각 격자의 z방향의 격자크기,  $(z_b)_k$ 는 각 격자에서 차지하고 있는 지반높이,  $\gamma_0$ 는 지반의 초기공극률이다.

이상에서 계산된 공극률은 Fig. 3과 같이 기존의 계산식 처리방법이 아닌 Hur et al. (2008)이 제안한 경사면 처리기법을 적용하여 계산시간마다 파동장 모델에 적용된다.

#### 2.3.3 상태방정식

본 연구에서 적용하는 기존의 파동장 모델 LES-WASS-3D ver. 2.0 (Lee and Hur, 2014)에서는 온도와 염분에 따른 물의 밀도와 동점성계수를 정밀하게 추정하기 위하여 상태방정식을 도입하였다. 또한 퇴적물의 부유는 계산격자 내의 밀도를 증가시키게 되고, 이것으로 인하여 밀도류가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 부유사 농도에 따른 물의 밀도 및 동점성계수를 산정하기 위하여 새로운 상태방정식을 추가적으로 도입한다.

온도와 염분에 따른 물의 밀도( $\rho_f$ )를 정밀하게 추정하기 위하여 Gill (1982)이 제안한 밀도산정식 Eq. (32)를 도입하였다. 여기서



(b) 3-D View(surface cell)

Fig. 3. Estimation of Surface Permeability in Case of the Mesh with Inclined Permeable Seabed

$\rho_0$ 는 4°C 물의 밀도이다.  $\Delta\rho_T$ 는 수온변화에 따른 밀도의 증가분을 나타내고 Eq. (33)과 같다.  $\Delta\rho_S$ 는 염분변화에 따른 밀도의 증분이며 Eq. (34)와 같다. 밀도산정에 이용되는 경험상수들은 Table 1에 나타낸다.

$$\rho_f = \rho_0 + \Delta\rho_T + \Delta\rho_S \quad (32)$$

$$\Delta\rho_T = a_1 T - a_2 T^2 + a_3 T^3 - a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (33)$$

$$\Delta\rho_S = (a_6 - a_7 T + a_8 T^2 - a_9 T^3 + a_{10} T^4) S + (-a_{11} + a_{12} T - a_{13} T^2) S^{3/2} + a_{14} S^2 \quad (34)$$

여기서  $T$ 와  $S$ 는 온도와 염분에 관한 3차원 이류-확산 방정식에서 산정된 온도와 염분이며, 온도의 단위는 [°C]이고, 염분의 단위는 [psu]이다.

또한 퇴적물의 부유에 따른 계산격자 내의 밀도 증가분을 산정하기 위하여 부유사에 관한 3차원 이류-확산 방정식 Eq. (20)에서 산정된 농도( $C$ )를 Ford and Johnson (1986)에 의해 제안된 Eq. (35)에 대입한다. 그리고 각각의 계산격자에서 부유사 농도에 따른 밀도의 증가분을 고려한 수정된 물의 밀도( $\rho_m$ )를 파동장 모델에 적용한다.

$$\rho_m = \rho_f + C\rho_f \left\{ 1 - \frac{1}{(\rho_s/\rho_f)} \right\} \quad (35)$$

여기서  $\rho_s$ 는 소류사의 밀도이다.

물의 동점성계수( $\nu_f$ )는 Eq. (36)과 같으며, Eq. (32)에서 산정한 밀도( $\rho_f$ )를 대입하여 산정한다. 여기서 물의 점성계수( $\mu$ )는 Riley and Skirrow (1965)이 제안한 염분과 온도를 고려할 수 있는 Eq. (37)을 이용한다.

$$\nu_f = \frac{\mu}{\rho} \quad (36)$$

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu_T + \Delta\mu_S \quad (37)$$

$$\Delta\mu_T = -b_1 T + b_2 T^2 - a_3 T^3 \quad (38)$$

$$\Delta\mu_S = b_4 S + b_5 S^2 \quad (39)$$

여기서  $\mu_0$ 는 4°C 물의 점성계수이다.  $\Delta\mu_T$ 는 수온변화에 따른 점성계수의 증가분으로써 Eq. (38)과 같고,  $\Delta\mu_S$ 는 염분변화에

Table 1. Coefficients for Density Estimation about Water

$\rho_0 = 0.999842594\text{g/cm}^3$	$a_5 = 6.536332 \times 10^{-12}$	$a_{10} = 5.38750 \times 10^{-12}$
$a_1 = 6.793952 \times 10^{-5}$	$a_6 = 0.824493 \times 10^{-3}$	$a_{11} = 5.72466 \times 10^{-6}$
$a_2 = 9.095290 \times 10^{-6}$	$a_7 = 4.089900 \times 10^{-6}$	$a_{12} = 1.02270 \times 10^{-7}$
$a_3 = 1.001685 \times 10^{-7}$	$a_8 = 7.643800 \times 10^{-8}$	$a_{13} = 1.65460 \times 10^{-9}$
$a_4 = 1.120083 \times 10^{-9}$	$a_9 = 8.246700 \times 10^{-10}$	$a_{14} = 4.83140 \times 10^{-7}$

Table 2. Coefficients for Viscosity Estimation about Water

$\mu_0 = 1.802863 \times 10^{-2}\text{g/cm}\cdot\text{s}$	$b_2 = 1.31419 \times 10^{-5}$	$b_4 = 2.15123 \times 10^{-5}$
$b_1 = 6.108600 \times 10^{-4}$	$b_3 = 1.35576 \times 10^{-7}$	$b_5 = 3.59406 \times 10^{-10}$

따른 점성계수의 증분으로써 Eq. (39)와 같다. 그리고 물의 점성계수에 이용되는 경험상수들은 Table 2에 나타낸다.

van Rijn (1984b)에 의하면 부유사가 포함된 흐름장에서는 부유사의 영향을 고려한 동점성계수를 적용할 필요가 있다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Bagnold (1954)의 실험결과로부터 주어진 Eqs. (40) and (41)을 통하여 수정된 동점성계수( $\nu_m$ )를 산정하여 파동장 모델에 적용한다.

$$\nu_m = \nu_f(1 - \lambda_c)(1 - 0.5\lambda_c) \quad (40)$$

$$\lambda_c = \left\{ \left( \frac{0.75}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-1} \quad (41)$$

여기서  $\lambda_c$ 는 무차원 농도 매개변수으로써 부유사 농도가 0.13~0.62의 범위 안에서 적용되고, 0.13이하일 경우 그 효과를 고려하지 않는다.

### 2.3.4 양방향 수치해석의 흐름

이상에서 제안한 소류사 및 부유사에 관한 3차원 지형변동 모델과 기존의 3차원 파동장 모델 LES-WASS-3D ver. 2.0과의 양방향 연성 수치모델의 계산흐름은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 붉은색 화살표는 파동장 모델의 계산경로, 검정색 화살표는 지형변동 모델의 계산경로를 각각 나타낸다. 그리고 양방향 연성 수치모델 (HYMO-WASS-3D)의 계산순서를 간략히 설명하면 아래와 같다.

- ① 파동장 모델에서 3-D N-S solver로부터 파동장 및 유동장을 계산한다.
- ② 계산된 유동장에서 대수법을 이용하여 소류사 및 퇴적물의 부유에 직접 영향을 미치는 전단유속을 산정한다.
- ③ 산정된 전단유속을 이용하여 소류사의 이동량과 퇴적물의 부유량 및 부유사의 침전량을 추정한다.

- ④ 소류사의 이동량과 퇴적물의 부유량 및 부유사의 침전량에 따른 지반고를 산정한다.
- ⑤ 변화된 지반고를 고려하여 파동장 모델의 각 격자에서 공극률을 재설정한다.
- ⑥ 온도, 염분, 부유사 농도에 따른 물의 밀도 및 동점성계수를 각 셀에서 추정한다.
- ⑦ 각 계산시간에서 ①~⑥의 일련의 과정을 반복적으로 수행한다.

이상의 양방향 연성해석방법을 통하여 유체-지반의 비선형 상호작용에 의한 동적거동을 수치적으로 구현할 수 있다.

### 3. 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)의 검증

하구와 같은 파랑-흐름의 공존장에서 지형변동을 예측하기 위해 개발한 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 검증하였다. 본 검증은 파랑-흐름의 상호작용 하에서 파랑변형, 연직유속분포, 해저과이프라인의 지형변동 특성 그리고 고립과 내습 시의 해빈 저면의 부유사 농도에 관한 수리모형실험결과와 비교·분석을 통하여 개발한 연성 수치모델의 타당성 및 유효성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

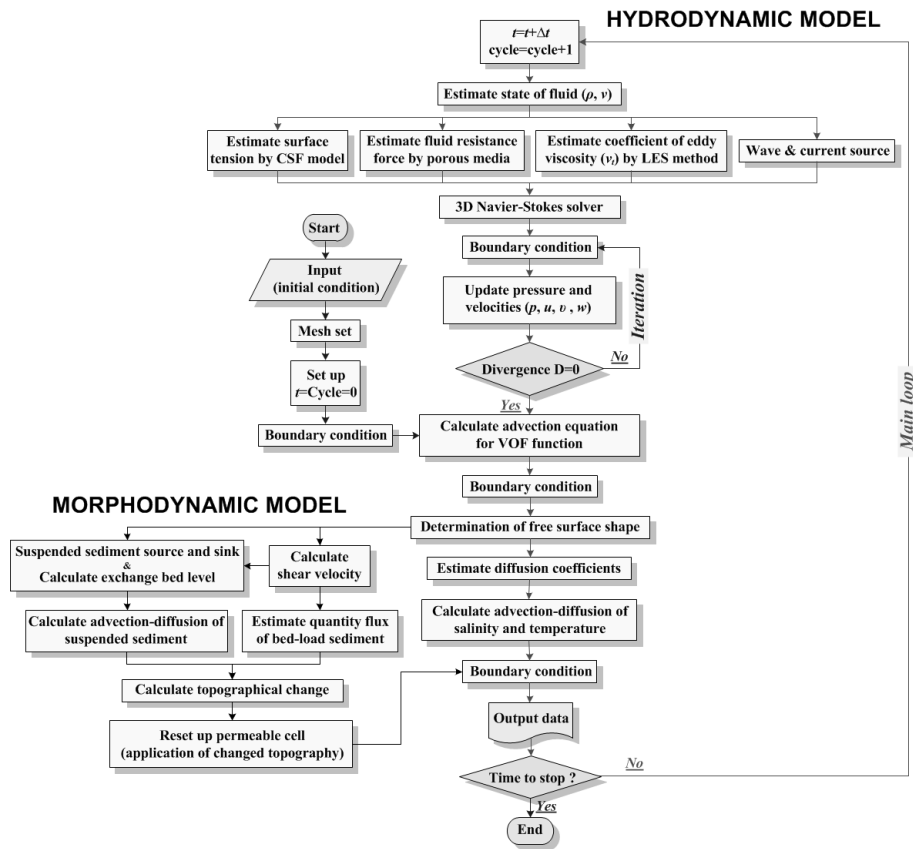


Fig. 4. Flowchart of a Newly-Developed 3-D Hydro-Morphodynamic Model (HYMO-WASS-3D)

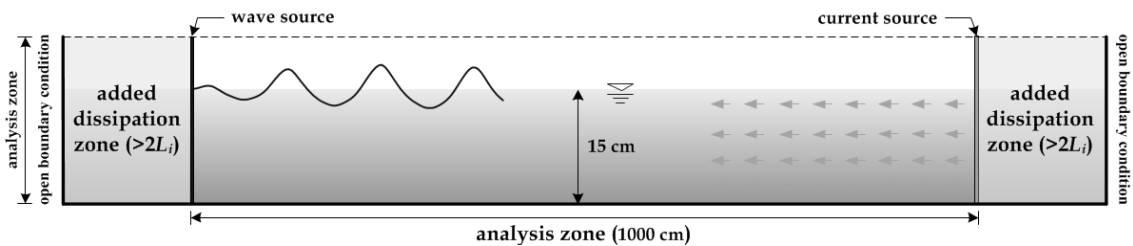


Fig. 5. Definition Sketch of a Numerical Water Basin Based on Iwasaki and Sato(1970)'s Experiments for Verification of Numerical Wave Heights in Wave-Current Field



Table 3. Incident Wave and Current Conditions for Verification of the Numerical Model in Wave-Current Field

Total	Wave		Current
	height	period	velocity
	$H_i$ [cm]	$T_i$ [s]	$V_c$ [cm/s]
4	3	1.02	6.3
		1.25	19.0

### 3.1 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파동장

파랑-흐름의 상호작용 하에서 파랑변형특성을 검증하기 위하여 길이 20m, 폭 0.8m, 높이 0.5m에서 수행한 Iwasaki and Sato (1970)의 수리모형실험조건을 Fig. 5와 같이 수치적으로 구현하였다. 실험에서는 파동장 및 유동장을 충분히 안정시킨 이후에 조파기로부터 4m 떨어진 지점부터 10m지점까지 0.5m간격으로 21개의 지점에서 수면변위를 측정하였다. 하지만 수치수조에서는 양쪽 경계에 방사조건을 적용할 뿐만 아니라, 무반사로 파랑과 흐름의 발생시킬 수 있는 소스 및 부가적인 감쇠영역을 설치함으로써 계산영역을 축소하는 편의를 도모하였다. 또한 수치수조의 구성은 x방향의 격자사이즈 1cm, z방향의 격자사이즈 0.5cm로 구성하고  $1 \times 10^{-3}$ s의 시간간격으로 하였다. 여기서 파동장 검증에 이용되는 입사파랑 및 흐름 조건은 Table 3에 상세히 나타낸다.

Fig. 6은 파랑-흐름의 공존장에서 파고( $H_i$ ) 3cm의 파랑이 10m를 전파하는 동안의 공간과고분포로써 (a)는 흐름의 유속이  $V_c=$

6.3cm/s, (b)는 흐름의 유속이  $V_c=19$ cm/s의 경우이다. 여기서 동그라미(●)와 삼각형(▲)은 Iwasaki and Sato (1971)의 실험결과 그리고 실선(—)과 점선(⋯)은 계산결과를 의미한다. 또한 동그라미(●)와 실선(—)은 입사주기( $T_i$ )가 1.05s의 결과, 삼각형(▲)과 점선(⋯)은 입사주기( $T_i$ )가 1.25s의 결과이다.

Fig. 6으로부터 실험결과 및 계산결과에서 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고감소가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 모든 그래프에서 계산에 의한 파고분포의 기울기가 실험결과의 기울기와 매우 유사하게 나타낸다. 이것은 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파고감소율이 유사함을 알 의미한다. 그리고 계산결과가 실험결과를 잘 재현하고 있지만, Fig. 6(b)의 흐름이 강한 경우( $V_c=19$ cm/s)에서는 파랑이 진행할수록 차이가 조금 증가하는 경향을 보인다. 이것은 Iwasaki and Sato (1970; 1971)에서 제공되는 정확한 실험조건 및 방법에 대한 자료부족 그리고 수리모형실험에서 발생할 수 있는 경계조건의 영향 등을 확인할 수 없어 발생하는 차이로 판단된다. 이상의 결과를 근거로 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형에 있어서 파동장 모델의 타당성 및 유효성을 확인할 수 있다.

### 3.2 파랑-흐름의 상호작용에 의한 유동장

파랑과 흐름의 공존장의 유동특성을 검증하기 위하여 Umeyama (2005)의 수리모형실험을 이용하여 수치계산을 실시하였다. Fig. 7은 Umeyama (2005)의 실험조건을 적용하여 구성하였으며, 안정

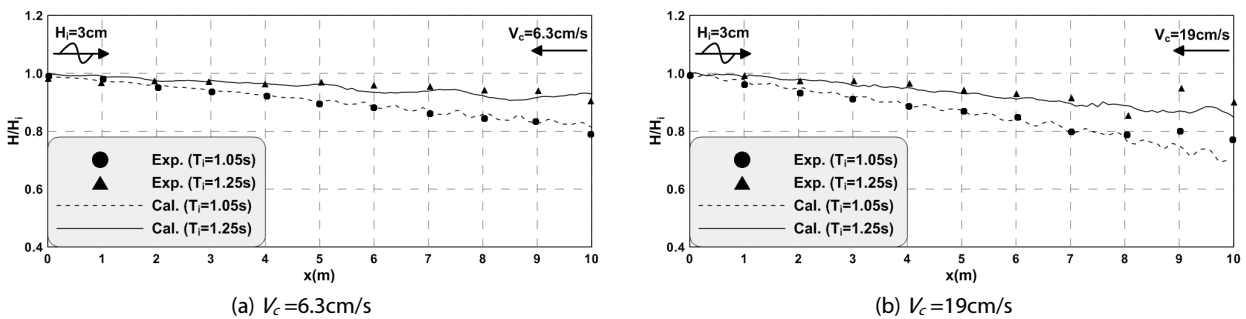


Fig. 6. Comparison between Measured(Iwasaki and Sato, 1971) and Calculated Wave Heights under Wave-Current Interaction

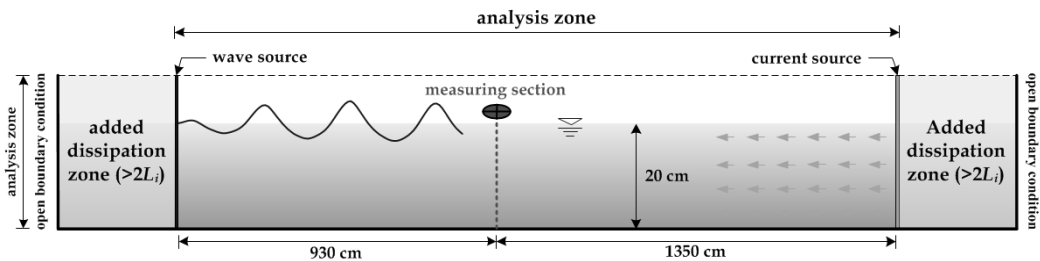


Fig. 7. Definition Sketch of a Numerical Basin Based on Umeyama(2005)'s Experiments for Verification of Numerical Time-Averaged Velocities in Wave-Current Field

**Table 4. Incident Wave and Current Conditions for Verification of Water Particle Velocities in Wave-Current Field**

CASE	Wave		Relation	Current
	height	period		velocity
	$H_i$ [cm]	$T_i$ [s]		$V_c$ [cm/s]
1	1.75	0.9	following	12
2	2.31	1.0		
3	2.47	1.2		
4	2.50	1.4		
5	1.80	0.9	opposing	
6	2.15	1.0		
7	2.22	1.2		
8	2.70	1.4		

적인 파랑과 흐름을 생성시키기 위하여 파랑 및 흐름소스를 해석영역의 양쪽 끝에 배치하고, 그 배후에 부가감쇠영역을 설치하였다. 본 검증은 x방향의 격자사이 2cm, z방향의 격자사이 0.5cm로 구성하고,  $1 \times 10^{-3}$ s의 시간간격으로 수치계산을 수행하였다. 또한 계산의 입사조건은 Table 4와 같으며, 파랑과 흐름의 진행방향이 같은 경우와 반대인 경우로 구분된다.

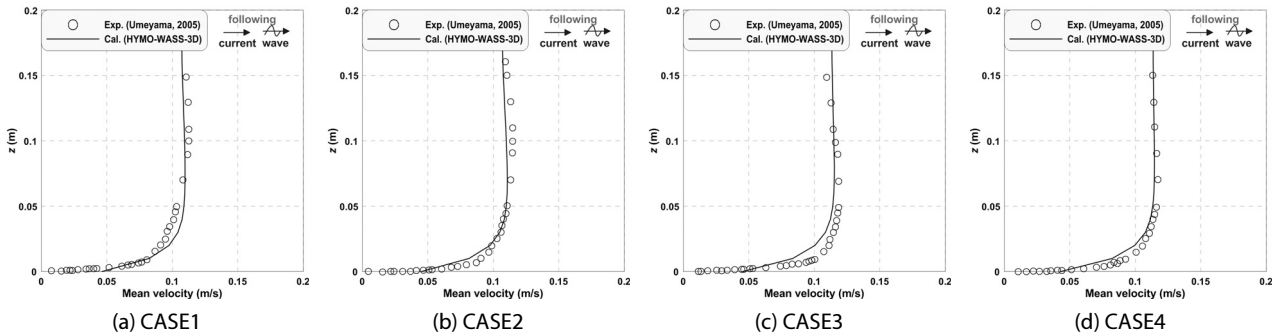
Fig. 8은 파랑과 흐름의 진행방향이 같은 경우(순방향)에서 상호작용에 의한 연직 평균유속분포를 나타낸 것으로 (a)는 CASE1, (b)는 CASE2, (c)는 CASE3, (d)는 CASE4의 경우의 결과이다. 여기서 계산결과의 평균유속은 3주기 동안 평균한 값으로써 유속측정은 실험과 동일한 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 조파소로부터 930cm 떨어진 지점이다. 그리고 동그라미(○)는 실험결과를 실선(—)은 계산결과를 나타낸다.

Fig. 8로부터 같은 방향(순방향)의 파랑-흐름의 상호작용에 의한 연직 평균유속분포에 있어서 본 연구의 계산결과가 Umeyama (2005)의 실험결과를 매우 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

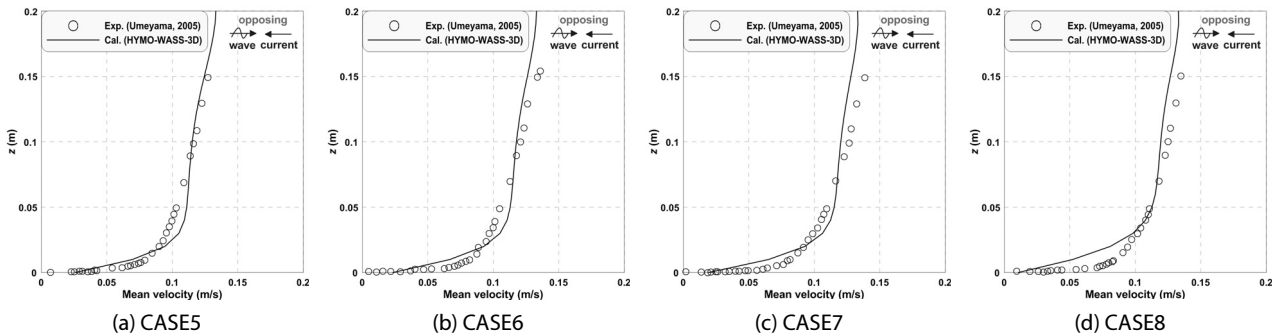
Fig. 9는 파랑과 흐름의 반대방향(역방향)으로 진행할 때, 상호작용에 의한 연직 평균유속분포이다. 여기서 (a)는 CASE5, (b)는 CASE6, (c)는 CASE7, (d)는 CASE8의 경우로써 동그라미(○)는 실험결과를 실선(—)은 계산결과를 나타낸다.

Fig. 9로부터 파랑과 흐름의 진행방향이 반대로 진행할 경우(역방향)에서도 상호작용에 의한 연직 평균유속분포를 본 연구의 계산결과가 Umeyama (2005)의 실험결과를 잘 재현하고 있다.

이상의 결과로부터 일부 영역에 대한 한정적인 비교·분석결과이지만, 본 연구의 계산결과가 파랑-흐름의 상호작용에 의한 유동현상을 잘 재현하고 있을 뿐만 아니라, 파랑과 흐름의 유입방향에



**Fig. 8. Comparison between Measured(Umeyama, 2005) and Calculated Vertical Distributions of Time-Averaged Velocities for Wave Following Current**



**Fig. 9. Comparison between Measured(Umeyama, 2005) and Calculated Vertical Distributions of Time-Averaged Velocities for Wave Opposing Current**

따른 상호작용특성을 잘 나타내고 있다. 이상의 검증에서 파랑-흐름의 상호작용에 의한 파동장 및 유동장에 관하여 본 연구의 파동장 모델의 타당성 및 유효성을 충분히 확보할 수 있다.

### 3.3 고립파 내습에 의한 해빈의 부유사 농도

본 연구에서 유체운동과 퇴적물의 부유 및 부유사의 침강에 관한 비선형 상호간섭을 직접 해석할 수 있게 개발한 3차원 양방향 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 검증하기 위하여 Young and Xiao (2008)이 수행한 수리모형실험을 이용하였다. 이 부유사의 검증에서 적용하는 수치파동수조의 개요는 Fig. 10과 같으며, 수심 100cm의 외해 측에는 파동장 교란을 방지하기 위하여 고립파의 조파소스 및 부가감쇠영역을 구성하였다. 그리고 해석영역에는 평균입경( $d_p$ ) 0.21mm의 모래를 1:15의 경사로 설치하였다. 본 검증에서는 60cm의 고립파가 입사파랑조건이며, 계산격자는 x방향 2cm, z방향 1cm로 구성하고,  $2 \times 10^3$ s의 시간간격으로 양방향 연성해석을 수행하였다. 여기서 고립파의 조파는 Lee et al.(2014)이 제안한 방법을 적용하였다.

Fig. 11은 고립파 내습 시에 해빈 단부로부터 11m 떨어진 지점의 부유사 농도를 나타낸 것으로 (a)는 저면으로부터 5cm, (b)는 15cm 지점에서 40초 동안 측정된 결과이다(Fig. 10 참조). 여기서 동그라미(○)는 Young and Xiao(2008)에 의한 수리모형실험결과, 실선(—)은 본 연구에서 개발한 수치모델의 계산결과를 의미한다.

Fig. 11로부터 본연구의 계산결과가 고립파 내습 시에 발생하는 부유사 농도를 조금 과대평가하고 있지만, 부유사 농도의 시간분포에서 전반적인 부유사 농도의 분포뿐만 아니라, 최대값이 발생하는 시간이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 또한 고립파의 입사에 의한 퇴적물의 부유, 입사 후의 침강, 반사파로 인한 재부유 그리고 침강과 같은 일련의 단계를 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

이상의 결과에 의거하여 유체력에 의한 퇴적물의 부유, 부유사의 이유-확산 그리고 침강에 관한 일련의 메커니즘을 본 연구에서 개발한 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)이 잘 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이로써 본 연구에서 제안한 3차원 지형변동 모델의 부유사 산정방법의 타당성 및 유효성이 확인되었다고 할 수 있다.

### 3.4 파랑-흐름의 공존장에서의 지형변동

본 연구에서 파랑-흐름 상호작용 하에서 소류사 및 부유사에 의한 지형변화를 직접 해석할 수 있게 개발한 3차원 양방향 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 검증하기 위하여 Kim et al. (2008)이 수행한 수리모형실험을 이용하였다. Fig. 12와 같이 수심 60cm 수치수조의 양쪽에는 파동장 교란을 방지하기 위하여 파랑 및 흐름소스와 부가감쇠영역을 구성하였다. 해석영역에는 입경( $d_p$ ) 0.71mm의 모래를 두께 20cm, 길이 900cm로 설치하였다. 그리고 모래지반 위에는 고정된 직경 9cm의 파이프라인을 설치하였다.

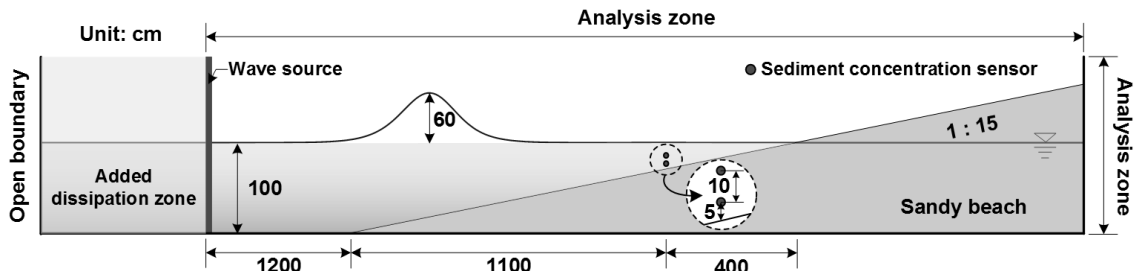


Fig. 10. Definition Sketch of a Numerical Wave Basin Based on Young and Xiao(2008)'s Experiment for Verification of Numerical Result for Suspended Sediment Concentration in Solitary Wave Field

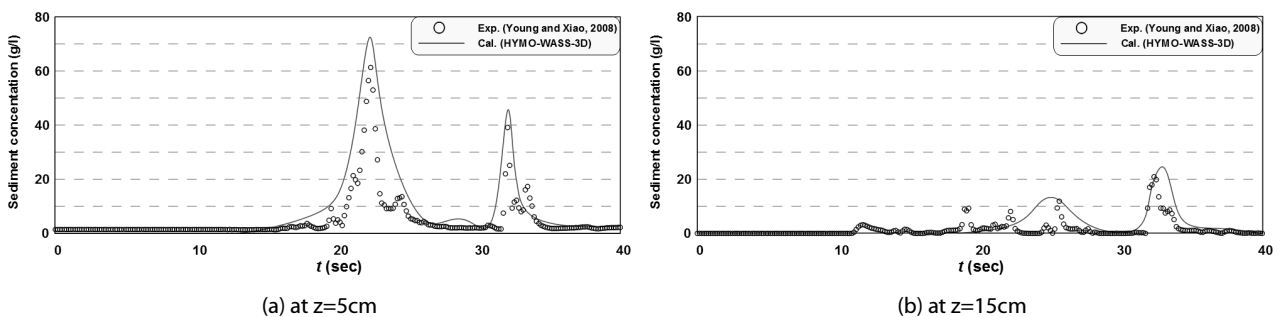


Fig. 11. Comparison between Measured(Young and Xiao, 2008) and Calculated Time Series of Suspended Sediment Concentrations at  $x=23$ m

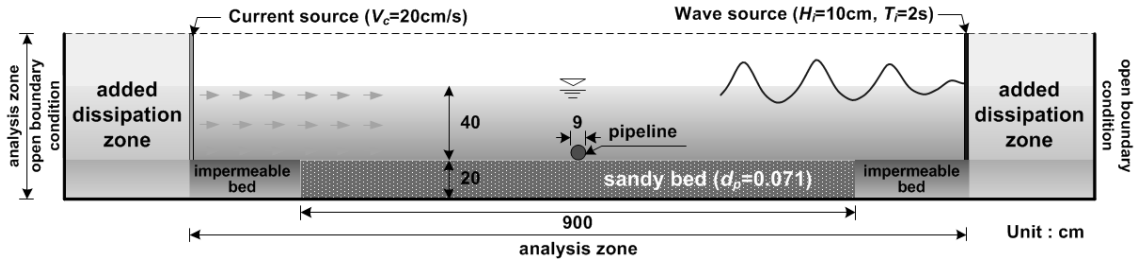


Fig. 12. Definition Sketch of a Numerical Water Tank Based on Kim et al. (2008)'s Hydraulic Model Test for Verification of Topographical Change around Pipeline in Wave-Current Field

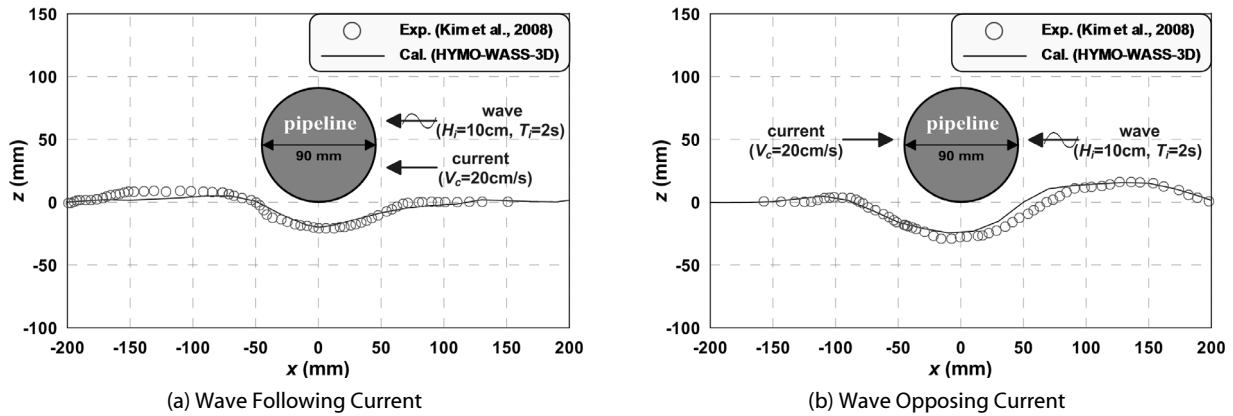


Fig. 13. Comparison between Measured and Calculated Vertical Profile of Seabed Level under Wave-Current Interaction

또한 파랑과 흐름의 안정적인 생성을 도모하기 위하여 모래지반의 양쪽에는 불투과성 지반을 배치하였다. 여기서 검증에 위한 수치계산조건은 파랑과 흐름의 순방향과 역방향으로 구분되며, 입사조건은 파고 10cm, 주기 2.0s 그리고 흐름의 유속은 20cm/s이다. 그리고 계산격자는 x방향 1cm, y방향 2cm, z방향 1cm로 구성하고,  $2 \times 10^{-3}$ s의 시간간격으로 양방향 연성해석을 수행하였다.

Fig. 13은 시간경과에 대하여 파이프라인 아래의 지형변화가 거의 나타나지 않은 평형상태를 나타내며, (a)는 파랑과 흐름이 같은 방향(순방향), (b)는 파랑과 흐름이 반대방향(역방향)의 경우이다. Petersen et al. (2012)에 따르면 파랑-흐름의 상호작용 하에서 파일 주변의 평형 세굴심에 도달하는 시간은 약 2000초이고, 약 1000초에서는 평형 세굴심에 89.5%의 세굴심을 나타낸다. 따라서 Kim et al. (2008)의 수리모형실험에서는 1000과 이상을 초과하였지만, 본 검증에서는 500과 이상에서 지형변화가 거의 나타나지 않아 더 이상 계산을 수행하지 않았다. 여기서 동그라미(○)는 수리모형실험에서 2000초 이상의 파랑과 흐름이 작용하여 발생한 지형이고, 실선(—)은 양방향 연성 수치모델에서 파랑-흐름 공존장의 안정상태에서 1000초간 계산을 수행하여 얻은 지형이다.

Fig. 13으로부터 파랑작용 하에서 흐름의 효과가 더해짐으로써

파이프라인 아래에서 세굴된 모래가 흐름방향으로 이동하여 건너편의 파이프라인 전면에 쌓이는 현상을 잘 보여주고 있다. 이것은 양방향 연성 수치모델에 의한 결과가 Kim et al. (2008)의 실험결과를 높은 정확도로 재현하고 있다는 의미이다.

이상의 결과를 근거하여 파랑-흐름의 상호작용 하에서 소류사와 부유사가 복합적으로 발생하여 형성되는 지형변동특성을 잘 재현함으로써 본 연구에서 제안한 3차원 지형변동 모델을 포함한 연성 수치모델의 타당성 및 유효성이 입증되었다고 판단된다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존의 파동장 모델(LES-WASS-3D ver. 2.0; Lee and Hur, 2014)과 개발한 3차원 지형변동 모델간의 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)을 제안함과 동시에 검증을 통한 적용성을 검토하였다. 이 연성 수치모델은 이미 파동장 해석에서 수많은 검증과 실험역의 적용성 검토를 거쳐 우수성이 확인된 파동장 모델로써 온도와 염분에 따른 밀도류를 해석할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 개발한 3차원 지형변동 모델은 소류사의 이동량, 퇴적물의 부유, 부유사의 3차원적인 이류-확산 그리고 침강에 따른 지형변동을 예측할 수 있다. 또한 부유사 농도를 고려한 상태방

정식 및 지반고에 따른 투과성 지반의 공극률 산정식을 적용한 양방향 연성해석방법을 제안하여 적용함으로써 유체-지반의 비선형 상호간섭에 의한 동적거동을 직접 해석 할 수 있었다. 게다가 개발한 연성 수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 기존의 수리모형 실험결과와 비교·분석하였다. 새롭게 개발한 연성 수치모델의 개요 및 적용성 검토에 대한 주요내용을 기술하면 아래와 같다.

- (1) 소류사 및 부유사를 해석할 수 있는 3차원 지형변동 모델을 제안하였다.
- (2) 부유사 농도에 의한 상태방정식의 도입 그리고 투과성 지반의 공극률 산정식을 개발하여 유체-지반의 비선형 상호간섭에 의한 동적거동을 해석할 수 있는 연성 수치모델을 개발하였다.
- (3) 기존의 파동장 모델을 검증하기 위하여 파랑-흐름의 공존장에서 파고분포, 연직 평균유속분포에 관한 수리모형실험결과와 비교·분석한 결과, 높은 일치도를 나타내었다.
- (4) 개발한 연성 수치모델이 고립파 내습 시에 해변 저면에서 발생하는 부유사 농도를 잘 재현할 뿐만 아니라, 퇴적물의 부유, 부유사의 이유·확산, 침강과 같은 일련의 메커니즘을 잘 나타내었다.
- (5) 개발한 연성 수치모델의 계산결과가 파랑-흐름의 상호작용 하에서 해저파이프라인 저면의 지형변화를 잘 나타내고 있을 뿐만 아니라, 소류사와 부유사가 복합적으로 발생하여 형성되는 지형변동특성을 잘 재현하였다.

이상의 결과를 근거로 본 연구에서 개발한 연성 수치모델의 타당성 및 유효성이 충분히 검토되었다고 판단된다. 향후 해안·해양공학 분야에서 지형변화에 관한 수치적인 해석을 수행하기 위해서는 본 연구에서 제안한 3차원 연성 수치모델(HYMO-WASS-3D)과 같은 양방향 연성해석방법의 도입이 바람직할 것으로 판단되며, 개발한 연성수치모델을 이용한 더욱 많은 검증과 보완을 통하여 현장 적용면에서도 활용도가 높은 모델로 구축해 나갈 생각이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2012년도 지역기술혁신사업(12 지역기술혁신 B01)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

Bagnold, R. A. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear." *Proc. R.*

*Soc. Lond.*, Vol. 225, pp. 49-63.

Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992). "A continuum model for modeling surface tension." *J. Comp. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354.

Cheng, N. S. (2008). "Formulas for friction factor in transitional regimes." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 134, pp. 1357-1362.

Cheng, N. S. and Chiew, Y. M. (1998). "Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 124, pp. 1235-1241.

Cummins, S. J., Francois, M. M. and Kothe, D. B. (2005). "Estimating curvature from volume fractions." *Comput. Struct.*, Vol. 83, pp. 425-434.

de Brye, B., de Brauwere, A., Gourgue, O., Kärnä, T., Lambrechts, J., Comblen R. and Deleersnijder, E. (2010). "A finite-element, multi-scale model of the Scheldt tributaries, River, Estuary and ROFI." *Coastal Eng.*, Vol. 57, pp. 850-863.

Donnell, J. O. (1997). "Observations of near-surface currents and hydrography in the connecticut river plume with the surface current and density array." *J. Geophys. Res.*, Vol. 102, No. C11, pp. 25021-25033.

Einstein, H. A. and Chien, N. (1955). "Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution." U.S. Army Engineer Division, Missouri River, M.R.D. Sediment Series, No. 8, p. 78.

Ergun, S. (1952). "Fluid flow through packed columns." *Chemical Eng.*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94.

Farhanieh, B., Firoozabadi, B. and Rad, M. (2001). "The propagation of turbulent density currents on sloping beds." *Scientia Iranica*, Vol. 8, pp. 130-137.

Ford, D. E. and Johnson L. S. (1986). *An assessment of reservoir mixing process*, Technical Re. E-86-7, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, p. 147.

Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model." *Physics of Fluids*, Vol. 3, pp. 1760-1765.

Gill, A. E. (1982). "Atmosphere-ocean dynamics." *Academic Press*, New York.

Herbers, T. H. and Jansen, T. T. (2010). *Wave-current interaction in coastal inlets and river mouths*, Annual Rept. Naval Postgraduate School, Monterey, CA. Dept. of Oceanography.

Hur, D. S., Lee, W. D. and Bae, K. S. (2008). "On reasonable boundary condition for inclined seabed/structure in case of the numerical model with quadrilateral mesh system." *Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, pp. 591-594 (in Korean).

Hur, D. S., Lee, W. D. and Cho, W. C. (2012). "Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet." *Ocean Eng.*, Vol. 44, pp. 100-116.

Ibrahim, Z. and Latiff, A. A. A., Aziz and Halim, A. H. A., Bakar, N. A. and Subramaniam, S. (2008). "Experimental studies on mixing salt wedge estuary." *Malaysian J. Civil Eng.*, Vol. 20, No. 2, pp. 188-199.

Iwasaki, T. and Sato, M. (1970). "Energy damping of wave propagating against currents." *Proc. Coastal Eng. Conf.*, JSCE, Vol. 17, pp.

- 41-46 (in Japanese).
- Iwasaki, T. and Sato, M. (1971). "Energy damping of wave propagating against currents (II)." *Proc. Coastal Eng. Conf.*, JSCE, Vol. 18, pp. 55-60 (in Japanese).
- Kim, K. H., Lee, H. J. and Kim, W. S. (2008). "The local scour around submarine pipelines in the interaction region combined with waves and currents." *Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 20, No. 5, pp. 510-521 (in Korean).
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 553.
- Lee, K. H. and Mizutani, N. (2007). "Wave-current interaction for waves propagating against currents." *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol. 17, No. 4, pp. 259-265.
- Lee, W. D. and Hur, D. S. (2014). "Development of 3-D hydrodynamical model for understanding numerical analysis of density current due to salinity and temperature and its verification." *J. Korean Society of Civil Eng.*, Vol. 34, No. 3, pp. 859-871 (in Korean).
- Lee, W. D., Hur, D. S. and Goo, N. H. (2014). "A numerical study on tsunami run-up heights on impermeable/permeable slope." *J. Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-9 (in Korean).
- Lee, W. D., Mizutani, N. and Hur, D. S. (2011). "Effect of crossing angle on interaction between wave and current in the river mouth." *J. Japan Society of Civil Eng., Ser. B3 (Ocean Eng.)*, Vol. 67, pp. 256-261 (in Japanese).
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M. and Stelling, G. S. (2004). "Development and validation of a three-dimensional morphological model." *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 883-915.
- Liang, B., Zhao, H., Li, H. and Wu, G. (2012). "Numerical study of three-dimensional wave-induced longshore current's effects on sediment spreading of the Huanghe River mouth." *Acta Oceanologica Sinica*, Vol. 31, No. 2, pp. 129-138.
- Lilly, D. K. (1991). "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method." *Phy. Fluids*, Vol. 4, pp. 633-635.
- Liu, S. and Masliyah, J. H. (1999). "Non-linear flows porous media." *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 86, pp. 229-252.
- Nguyen, X. T., Tanaka, H. and Nagabayashi, H. (2007). "Wave setup at river and inlet entrances due to an extreme event." *Proc. Int. Conf. on Violent Flows*.
- Petersen, T. U., Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (2012). "Time scale of scour around a pile in combined waves and current." *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Scour and Erosion*.
- Riley, J. P. and Skirrow, G. (1965). "Chemical oceanography." *Academic Press*, Vol. 3.
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J. and Michelsen, J. (2005). "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile." *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater." *Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, Venice, pp. 1517-1530.
- Shi, F., Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., Chen, Q. and Kennedy, A. (2001). "A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates." *Coastal Eng.*, Vol. 42, pp. 337-358.
- Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the primitive equation." *Mon. Weath. Rev.*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- Smith, J. M., Seabergh, W. C., Harkins, G. S. and Briggs, M. J. (1998). *Wave breaking on a current at an idealized inlet*, Rept. CHL-98-31, US Army Corps of Engineers.
- Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of marine sands*, Thomas Relford Publications, p. 249.
- Soulsby, R. L. and Whitehouse, R. J. S. W. (1997). "Threshold of sediment motion in coastal environments." *Proc. Pacific Coasts and Ports '97 Conf.*, Vol. 1, pp. 149-154.
- Sutherland, J., Walstrab, D. J. R., Cheshera, T. J., van Rijn, L. C. and Southgate, H. N. (2004). "Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth." *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 119-142.
- Tanaka, H., Nagabayashi, H. and Yamauchi, K. (2000). "Observation of wave set-up height in a river mouth." *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Eng., ICCE*, pp. 3458-3471.
- Umeyama, M. (2005). "Reynolds stresses and velocity distributions in a wave-current coexisting environment." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 131, pp. 203-212.
- van Rijn, L. C. (1984a). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 110, pp. 1431-1456.
- van Rijn, L. C. (1984b). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 110, pp. 1613-1641.
- van Rijn, L. C. and Walstra, D. J. R. (2003). "Modelling of sand transport in DELFT3D." *WL|Delft Hydr. Re. Vol. Z3624*, Delft Hydr., The Netherlands.
- Xiong, Y. (2010). *Coupling sediment transport and water quality models*, Ph.D. Thesis, Mississippi State Univ., USA, p. 275.
- Young, Y. L. and Xiao, H. (2008). "Enhanced sediment transport due to wave-soil interactions." *Proc. NSF Eng. Res. and Innovation Conf.*, Knoxville, Tennessee.
- Zhang, Q. H., Tan, F., Han, T., Wang, X. Y., Hou, Z. Q. and Yang, H. (2010). "Simulation of sorting sedimentation in the channel of Huanghua harbor by using 3d multi-sized sediment transport model of EFDC." *Proc. Int. 32<sup>nd</sup> Conf. on Coastal Eng., ICCE*, No. 32.