

## 수치모의를 이용한 준설하천의 웅덩이 적응에 관한 연구

### Numerical Modelling of the Adjustment Processes of Minning Pit in the Dredged Channels

장 창 래\*

Jang, Chang-Lae

#### Abstract

In this study, the adjustment processes of the disturbed channels by sand or gravel mining were investigated by a two dimensional numerical model in the generalized coordinate system. As a numerical scheme, the CIP (cubic interpolated pseudoparticle method) method was used to calculate the advection term in the flow field and central difference method was used to the diffusion term in it. The pit of the channel was partially filled with sediment at the toe of the pit upstream. As time increased, the headcut erosion upstream in the pit was decreased due to the sediment inflow. The almost inflow sediment upstream was trapped into the pit and the sediment deposit wedge migrated downstream in the pit with the steep submerged angle of repose. The numerical model was reproduced well the evolution processes of the channel. The mining pit migrated with speed as the channel was steep, and the numerical results were in overall agreement with the experimental results.

**Keywords** : numerical modelling, sediment mining pit, bed change, adjustment processes of the channels

#### 요 지

본 연구는 하천의 골재채취 혹은 하천준설로 인하여 교란된 하천의 적응과정을 하도의 평면변화에 적합하도록 일반좌표계 상에서 흐름 및 하상변동을 모의할 수 있는 2차원 수치모형을 이용하여 파악하였다. 수치해석 기법으로는 흐름의 운동량 방정식에서 이류항은 CIP (Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항은 중앙차분법을 적용하였다. 하천준설 혹은 골재채취에 의해 형성된 웅덩이는 초기에 웅덩이 상류 지점에서 급격한 두부침식이 발생하였다. 시간이 증가하면서 웅덩이는 상류에서 공급되는 유사에 의하여 되메워지고, 일정한 안식각을 유지하면서 거의 균일한 속도로 이동하였다. 웅덩이 하류에서는 하상저하가 지속되고 있다. 수치모의 결과는 이러한 과정을 잘 모의하였다. 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이의 변화에 대하여 되메워지는 시간이 짧고, 웅덩이의 이동속도가 빠른 것을 보여주고 있으며, 수치모의 결과는 실내실험 결과에 잘 일치하였다.

**핵심용어** : 수치모의, 웅덩이, 하상변동, 하도의 적응과정

#### 1. 서 론

하천의 골재는 다양한 산업의 재료로 이용되고 있으며,

산업 및 도시가 성장하는데 중요하게 이용되어 왔다. 그러나 이러한 골재채취는 하천에서 유사의 이송에 영향을 주게 되며, 웅덩이에서 유사를 포착하여 유사의 결핍과

\* 충주대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: cljang@cju.ac.kr)

Assistant Prof. Department of Civil Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

하상저하, 하폭 및 하상도에 변화를 야기하고, 두부침식(headcut)을 일으킨다. 또한 하안침식과 하천의 측방 불안정을 일으키고, 교각 세굴 및 수리구조물 안정성에 문제를 야기하며, 지하수위를 낮추고 생태계의 서식처에 영향을 준다(Kondolf, et al., 2002; Rinaldi, et al., 2005). 그러나 하천에서 홍수시에 흐름을 원활히 소통시키거나 증가시켜서 홍수재해를 저감 시킨다(Kondolf, 1994; Gob et al., 2005). 따라서 골재채취 및 하천준설로 인하여 교란된 하천의 적응과정을 체계적으로 조사하고 이해하는 것은 홍수에 안전하고 환경적으로 건전한 하천을 계획하거나 관리하기 위하여 매우 중요하다.

최근에 하천준설 및 골재채취로 인한 인위적인 충격이 가해진 하천에서 역학적 거동과 적응과정을 파악하기 위하여 실내실험과 수치모형을 이용한 연구가 진행되어 왔다. 골재채취에 의한 웅덩이의 역학적인 거동을 파악하는 선구적인 연구로, Lee et al. (1993)은 실내실험을 통하여 유사의 공급이 없는 비평형 상태에서 골재채취에 의한 웅덩이(pit)의 형상과 이동 특성을 예측할 수 있는 경험공식을 제시하였으나, 유사의 거동에 의하여 사구(dune)와 같은 소규모 하상파의 거동을 고려하지 않은 한계가 있다. 또한 웅덩이 상류에서 발생하는 두부침식은 상류에서 공급되는 유사량의 변화에 따라 하상의 후방 단차(backward-facing step)의 변형과 이동 특성이 변하게 되며, Lee and Hwang (1994)은 실내실험을 통하여 이를 예측할 수 있는 간단한 수학적 모형을 제시하였다. 최근에 장창래와 정관수(2010)는 유사의 이동에 의해 발생하는 사주(sand bars)의 영향을 고려하여 하천준설에 의한 웅덩이의 역학적 거동 특성을 실내실험을 통하여 파악하였다.

충적하천에서 골재채취 및 하천준설에 의한 다양한 영향을 평가하기 위해서는 흐름, 유사의 이송 및 지형변화의 복잡한 상호작용을 이해하는 것이 중요하며, 최근에 수치모형은 이를 수행하는데 중요한 위치를 차지하고 있다. Gill (1994)은 Lee et al. (1993)의 실험결과를 토대로 웅덩이의 적응과정을 파악하기 위하여 간단한 1차원 수치모형을 제시하였다. 더욱이 Wu and Wang (2008)은 골재채취로 인한 준설하천의 설계 및 관리를 위하여 1차원 수치모형을 이용하여 두부침식과 미부침식(尾部侵蝕, tailcut)의 최대 깊이와 최대 길이에 대한 경험적인 포락관계(envelope relations)를 제시하였으나, 모형의 적용성이 검토되지 않은 한계가 있다. van Rijn (1996)은 주운을 위하여 준설된 하구에서 조류의 영향에 의해 부유사의 농도 변화를 분석하고, 조류의 흐름 방향과 준설방향의 변화에 따른 퇴적과정을 2차원 하상변동 수치모형을 이용하여 파악하였다. Cao and Pender (2004)는 직교좌표계 상

에서 완전연계형 2차원 수치모형을 개발하여 상류에서 공급되는 유사량의 증가에 따라 하상고의 변화와 웅덩이의 반응을 해석하였으며, 골재채취로 인한 하상고의 변화는 웅덩이 상하류의 수위 변화에 영향을 미치는 것을 파악하였으나, 하도의 평면변화 특성을 보여주는 데는 한계가 있다.

앞에서 언급된 기준에 개발된 수치모형은 하천의 골재채취 및 준설에 의한 하도의 평면적 변화과정을 정량적으로 파악하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 하도의 평면변화에 적합하도록 일반좌표계 상에서 흐름 및 하상변동을 모의할 수 있는 2차원 수치모형을 이용하여, 하상경사와 준설 규모의 변화에 따른 하도의 응답 특성을 정량적으로 파악하였다.

## 2. 지배방정식

본 수치모형은 직교좌표계에서 일반좌표계에 변환된 2차원 천수 방정식과 유사의 연속방정식을 이용하여 하상변동이 계산된다.

일반좌표계에서 흐름의 연속 방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ -g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \right] \frac{\partial H}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (2)$$

$$- \frac{C_d u^\xi}{hJ} \sqrt{(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ -g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$- \frac{C_d u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta$$

여기서,  $\xi$  및  $\eta$ 는 일반 좌표계에서 공간 좌표 성분,  $H$ 는 수위(= $h+z_b$ )이고,  $h$ 는 수심이며,  $z_b$ 는 기준면에서 측정된 하상고이다.  $C_d$ 는 하상의 마찰계수이며(= $\frac{gn}{h^{1/3}}$ ),  $g$ 는 중력가속도이고,  $n$ 은 Manning의 조도계수이며, Kishi and Kuroki (1973)가 제안한 식(= $\frac{d^{1/6}}{8.9\sqrt{g}}$ )을 이용하였다.

$J$ 는 Jacobian이며,  $u^\xi$  및  $u^\eta$ 는  $\xi$  및  $\eta$  방향에서 유속의 성분이고,  $u^\xi = \xi_x u + \xi_y v$  및  $u^\eta = \eta_x u + \eta_y v$ 로 정의된다. 계수  $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \\ \alpha_2 &= 2 \left( \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \\ \alpha_3 &= \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}\end{aligned}\quad (4a)$$

$$\begin{aligned}\alpha_4 &= \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \\ \alpha_5 &= 2 \left( \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \\ \alpha_6 &= \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2}\end{aligned}\quad (4b)$$

Eqs. (2) and (3)에서 운동량방정식의 확산항  $D^\xi$ 와  $D^\eta$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D^\xi = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \nu_t \xi_x^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \nu_t \eta_y^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \quad (5a)$$

$$D^\eta = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \nu_t \xi_x^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \nu_t \eta_y^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \quad (5b)$$

전단력을 선형 분포로 가정하면, 수심 평균 와 (난류)점성 계수,  $\nu_t$ ,는 다음과 같다.

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (6)$$

여기서,  $\kappa$ 는 von Karman 상수 (=0.4),  $u_*$ 는 전단속도 (=  $n\sqrt{g(u^2 + v^2)}/h^{1/6}$ )이다.

일반 좌표계에서 2차원 유사의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_b^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_b^\eta}{J} \right) \right] = 0 \quad (7)$$

여기서,  $z_b$ 는 하상고,  $\lambda$ 는 하상재료의 공극률,  $q_b^\xi$  및  $q_b^\eta$ 는  $\xi$  및  $\eta$  방향에서 단위 폭당 소류수량이다. 하상에서 소류수량은 Meyer-Peter and Muller (1948)의 공식으로 계산하였다.

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (8)$$

여기서,  $q_b$ 는 소류수량,  $s$ 는 수중에서 하상토의 상대 밀도,

$g$ 는 중력가속도,  $d$ 는 하상토의 평균입경,  $\tau_*$ 는 무차원 소류력,  $\tau_{*c}$ 는 무차원 한계 소류력이다.

주 흐름 방향에 대한 횡단 방향의 소류사 이송률을 계산하기 위하여, 원심력에 의한 이차류 및 횡방향 경사를 고려하였다.

$\xi$  및  $\eta$  방향에서 유사량은 다음과 같이 계산된다.

$$q_b^\xi = q_b \left[ \frac{u_b^\xi}{V_b} - \gamma \left( \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \cos\theta \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \right] \quad (9)$$

$$q_b^\eta = q_b \left[ \frac{u_b^\eta}{V_b} - \gamma \left( \frac{\partial z_b}{\partial \eta} + \cos\theta \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \right) \right] \quad (10)$$

여기서,  $u_b^\xi$  및  $u_b^\eta$ 는  $\xi$  및  $\eta$  방향으로 하상부근에서 유속,  $V_b$ 는 하상부근에서 유속,  $\theta$ 는  $\xi$ 와  $\eta$ 의 교차 각,  $\gamma = \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}}$ ,  $\mu_s$ 는 Coulomb의 정적 마찰계수 (=1.0),  $\mu_k$ 는 Coulomb의 동적 마찰계수 (=0.45)이다.

유선 방향으로 하상부근에서 유속은 다음과 같이 가정한다.

$$u_b^s = \beta V \quad (11)$$

여기서,  $V$ 는 수심 평균 유속이다.

$\beta$ 는 Engelund (1974)의 가정에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta = 3(1-\sigma)(3-\sigma) \quad (12a)$$

$$\sigma = \frac{3}{\phi\kappa + 1} \quad (12b)$$

여기서,  $\phi$ 는 속도계수 (=  $V/u_*$ ),  $\kappa$ 는 von Karman 상수 (=0.4)이다.

유선이 굽어질 때, 원심력의 변화에 의해 이차류가 발생하며, 유선에 수직방향의 하상부근 유속은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_b^n = u_b^s N_* \frac{h}{r_s} \quad (13)$$

여기서  $r_s$ 는 유선의 곡률 반경,  $N_*$ 는 이차류 강도 계수이며, 본 연구에서는 Engelund (1974)가 제시한 7.0을 사용하였으며, 이는 만곡부에서 횡방향 경사가 완만한 상태에서 얻은 것으로서, 횡방향 경사가 급한 경우에 중력효과가 고려되어야 한다.

Eq. (13)에서 유선의 곡률은 다음과 같다 (Fig. 1).

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{V^3} \left[ u^2 \left( \xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) + uv \left( \xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) \right]$$

$$-uv\left(\xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta}\right) - v^2\left(\xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta}\right)] \quad (14)$$

여기서,  $V = \sqrt{(u^2 + v^2)}$ 이다.

수치해석 기법으로는 엇갈리 격자(staggered grid)에서 운동량 방정식의 이류항은 Yabe et al. (1991)가 제안한 고차 Godunov 기법으로 알려진 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항은 중앙차분법을 적용하였다(Jang and Shimizu, 2005). 흐름 방정식을 해석하기 위하여, 상류에서는 유량이 지정되었으며, 하류단에서는 수심을 부여하였다. 최상류단(i=1, 2)에서는 국부적인 세굴을 방지하기 위하여 고정상으로 가정하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 흐름이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름방향에 대하여 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

### 3. 수치모형의 적용

#### 3.1 수치모형 검증을 위한 수리실험

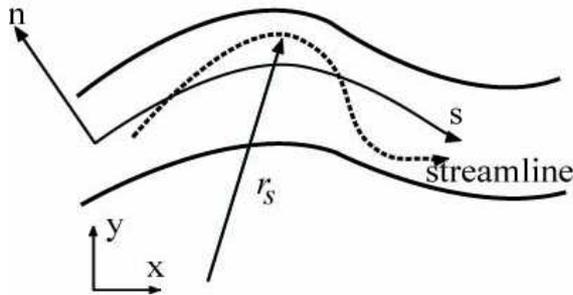


Fig. 1. Sketch Used to Define Streamline and Radius of Curvature  $r_s$

본 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여, 장창래 등(2008)에 의한 실내실험의 결과와 비교하였다. 실험수로의 크기는 길이 12 m, 폭 0.9 m, 높이 0.6 m이며, 지하 저수조에서 펌프를 이용하여 상류단 leveling 탱크로 물을 공급하는 순환형 물순환 시스템을 갖추고 있는 가변형 경사수로에서 실내실험을 수행하였다(Fig. 2). 수로의 하류단에 sluice gate가 설치되어 있으며, 하류단 수위를 조절할 수 있다. 수로의 측벽은 좌안이 아크릴판으로 구성되어 실험 중에 수로 내부를 볼 수 있으며, 우안은 철재로 구성되어 있다.

이동상 실험을 수행하기 위하여 자체적으로 제작한 모래 포설기를 이용하여 실험 수로의 바닥에 20 cm 두께의 유사를 균등하게 포설하였다. 그 후에 실험 수로의 하상은 상류로부터 4 m 혹은 5 m 지점에서 실험 조건에 맞추어 깊이 10 cm 정도로 굴착하여 웅덩이를 만들었다. 이동상 실내실험을 위하여 하상도를 선정할 때에 실험 중에 유사가 표면장력으로 인하여 흐름과 달리 독립적으로 이동하거나 위로 떠오르지 않아야 하며, 부유사가 발생하지 않고, 하상에서 사런(ripple)이 발생되지 않을 조건을 충분히 만족시키기 위하여,  $D_{50}=1.2$  mm,  $D_m=1.29$  mm,  $D_{35}=1.05$  mm, 표준편차는 1.37이고, 비중은 2.55~2.65인 주문진 여과사를 사용하였다.

실험이 진행되는 동안, 수로의 유입구에서 국부적인 세굴을 방지하고 하상이 동적 평형을 유지하도록 상류단에서 유사를 일정하게 공급하였다. 하상고는 지정된 시간 동안에 상류에서 공급되는 유량을 정지시키고, 수로에서 완전히 배수시킨 후에, 상류의 2 m 지점에서 하류 10 m 지점까지, 수로의 횡방향으로 5 cm, 종방향으로 20 cm 간격으로 전자식 point gauge를 이용하여 측정하였다. 실험은 굴착된 웅덩이(pit)가 완전히 메워질 때까지 지속되었

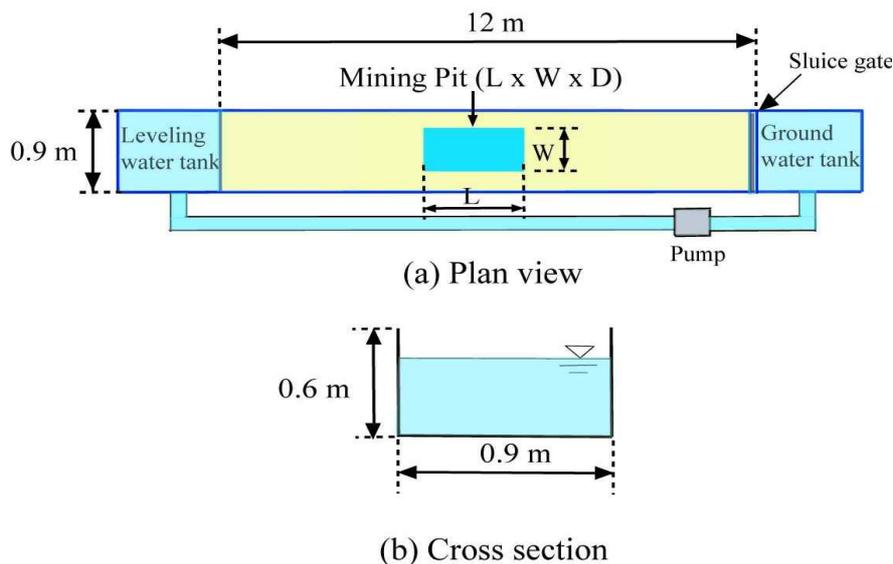


Fig. 2. Sketch of Experimental Setup a) Plan View and (b) Cross Section

Table 1. Hydraulic Conditions for Experiments and Numerical Simulations

CASE	Discharge ( $m^3/s$ )	Depth (cm)	Bed slope	Fr	Dia. of bed material (mm)	Sediment feeding rate (kg/s)	Dredging Pit Dimension		
							Length (m)	Width (m)	Depth (m)
Run-1	0.015	2.5	0.005	0.97	1.2	0.0168	1.0	0.5	0.1
Run-2	0.015	3.4	0.0025	0.73	1.2	0.0062	1.0	0.5	0.1
Run-3	0.015	3.3	0.0025	0.72	1.2	0.0051	2.0	0.5	0.1

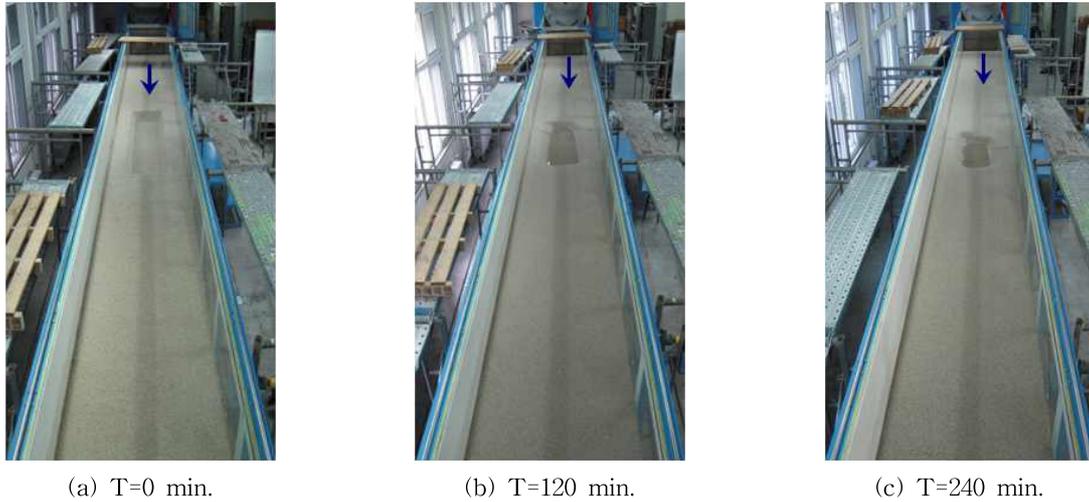


Fig. 3. Experimental Results for Run-3

다. 실험이 진행되는 동안, 유로의 변동을 정확하게 기록하기 위하여, 하상고를 측정하기 직전과 직후에 사진촬영을 하였으며, 수리학적 조건은 Table 1에 나타나 있다. 여기서, 하상경사의 변화에 따른 웅덩이의 적응과정을 파악하기 위한 실험은 Run-1과 Run-2 이며, 웅덩이 규모의 변화에 따른 적응과정을 파악하기 위한 실험은 Run-2와 Run-3이다.

Fig. 3은 Run-3에 대하여 시간이 진행됨에 따라 웅덩이가 되메워지는 것을 사진으로 보여주고 있다. 하상굴착 지점은 상류로부터 4m 지점에서 길이 2m, 넓이 0.5m, 깊이 0.1m의 규모로 웅덩이를 굴착하였다(Fig. 3(a)). 통수 개시 후, 초기에는 웅덩이 상류 지점에서 급격한 두부침식이 발생하여 상류로 전파되었고, 상류로 갈수록 그 규모는 작아졌다. 10분 후에는 상류에서 공급되는 유사에 의해 두부침식은 감소되었으며, 웅덩이가 되메워지기 시작하였다. 웅덩이는 상류에서 공급되는 유사에 의하여 채워지면서 일정한 속도를 유지하면서 하류로 이동하고 있으며, 웅덩이 하류에서는 하상저하가 지속되고 있다(Fig. 3(b)). 웅덩이는 그 형상이 일정하게 유지되면서 흐름 방향으로 되메워지고 있다(Fig. 3(c)).

### 3.2 수치모의 조건

본 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여, 하도의 평면 변화 및 종단변화, 웅덩이의 이동특성을 실내실험 결과와 비교하였다. Table 2는 수치모의를 수행하기 위하여 적용된 매개변수를 보여주고 있다. 각 매개변수의 값은 하도의 물리적 특성을 고려하여 결정하였으며, 이 중에서 von Karman 상수 ( $k=0.4$ )와 이차류 강도 계수 ( $N_* = 7.0$ )는 기존 연구자들이 제시한 값을 각각 사용하였다.

수치모의를 위한 계산 격자망은 하천의 종방향으로 60개, 횡방향으로 20개의 격자를 구성하였으며, 종방향으로 격자의 크기는 0.2m이고, 횡방향으로는 0.045m이다. 격자망의 종횡단 비율(aspect ratio)은 4.4로서, 수치모형이 수렴하는데 적합한 크기이다(Fig. 4).

### 3.3 수치모의 검증 결과

Fig. 5는 Run-2에 대한 골재채취 및 하천준설에 의한 웅덩이의 적응과정을 실내실험 및 수치모형의 결과를 주고 있다. 통수가 시작되었을 때, 웅덩이 상류에서 급격하게 두부침식이 발생하였다. 웅덩이의 두부침식이 상류로

Table 2. Parameter for Numerical Simulation

항 목	수 식	값	비 고
하상의 마찰계수 (Eqs. (2) and (3))	$C_d = \frac{gn}{h^{1/3}}$	0.381 (Run-1)	수심과 조도계수에 의하여 결정되며, 조도계수는 하상도의 입경에 의해 결정
		0.355 (Run-2)	
		0.355 (Run-3)	
Manning의 조도계수 (하상의 마찰계수 $C_d$ )	$n = \frac{d^{1/6}}{8.9\sqrt{g}}$	0.012	(Kish and Kuroki (1973)가 제안) 하상의 물리적 특성을 고려하여 하상도의 평균 입경에 의해 결정
수심평균 와 점성계수 (Eqs. (5a) and (5b))	$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h$	0.00007468 (Run-1)	운동량방정식의 확산항에 적용 마찰속도와 수심에 의하여 결정됨
		0.0000725 (Run-2)	
		0.0000725 (Run-3)	
von Karman 상수 (수심평균 와점성계수에 적용)	$\kappa$	0.4	맑은 물일 경우에 적용
무차원 한계 소류력 (Eq. 8)	$\tau_{*c} = \frac{hi}{sd}$	0.0343	수심, 하상경사, 하상도의 입경에 의하여 결정
이차류 강도계수 (Eq. 13)	$N_*$	7.0	Engelund (1974)가 제시한 값

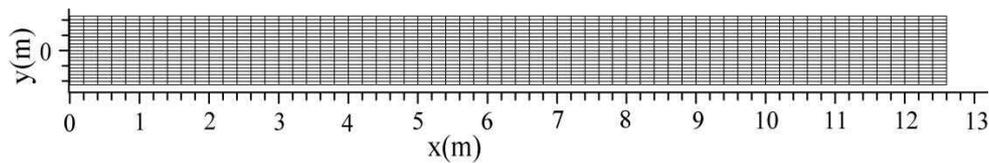


Fig. 4. Computational Grid for Numerical Simulation

전파되면서, 웅덩이 상류에서부터 일정한 형상을 유지하면서 퇴메우기가 진행되었다. 시간이 증가하면서, 상류에서 공급되는 유사에 의하여 두부침식은 감소되었다. 상류에서 공급되는 유사량은 웅덩이에 의해서 거의 포착되었으며, 웅덩이 하류로 이송되는 유사는 거의 없었다. 웅덩이에서 퇴적되는 유사는 일정한 수중 안식각을 유지하면서 하류로 이송되며, 웅덩이 하류에서는 미부침식이 발달하였다 (Fig. 5(a)). 통수 120분 후에는 웅덩이의 0.4m 정도 퇴메우기가 진행되어 하류로 이동하였다. 웅덩이 하류의 좌안과 우안에서는 흐름의 가속에 의해 하상 저하가 발생하였으며 (Fig. 5(b)), 흐름의 분리에 의하여 좌안과 우안에서 거의 대칭적으로 하상이 저하되었다 (Figs. 5(b) and (c)). 수치모형은 실내실험에 보여준 이러한 특징을 잘 모의하고 있다. 또한 실내실험 결과는 웅덩이 상류에서 발달한 복렬사주에 의하여 흐름이 하도 중앙에 집중되어, 웅덩이 형상이 좌안이나 우안에 편향되지 않고 일정

하게 유지되면서 흐름 방향으로 되메워지는 현상을 보여 주었다. 수치모의 결과에서도 3m 지점의 하도 중앙에서 흐름의 집중에 의하여 하상이 세굴되며, 실험결과와 특징을 잘 모의하고 있다.

Fig. 6은 하천준설로 인한 웅덩이의 적응과정을 보여주고 있다. 웅덩이는 상류로부터 4m 지점에서 길이 2m, 깊이 0.1m로 준설된 Run-3의 결과를 보여주고 있다. 통수가 시작되었을 때, 웅덩이의 퇴메우기가 일정한 속도를 유지하면서 진행되었다. 그러나 Run-2와는 다르게 웅덩이 중앙에서 하상이 저하되면서 미부침식이 발달하였고, 하상이 저하되었다 (Fig. 6(a)). 시간이 증가함에 따라, 웅덩이는 상류에서 공급되는 유사에 의하여 채워지면서 일정한 속도를 유지하면서 하류로 이동하였으며, 웅덩이 하류에서는 하상저하가 지속되었다 (Figs. 6(b) and (c)). 웅덩이 하류에서 미부침식은 실험결과에서 약간 우안으로 편향되어 발달하였으나, 수치모의 결과에서는 중앙에서

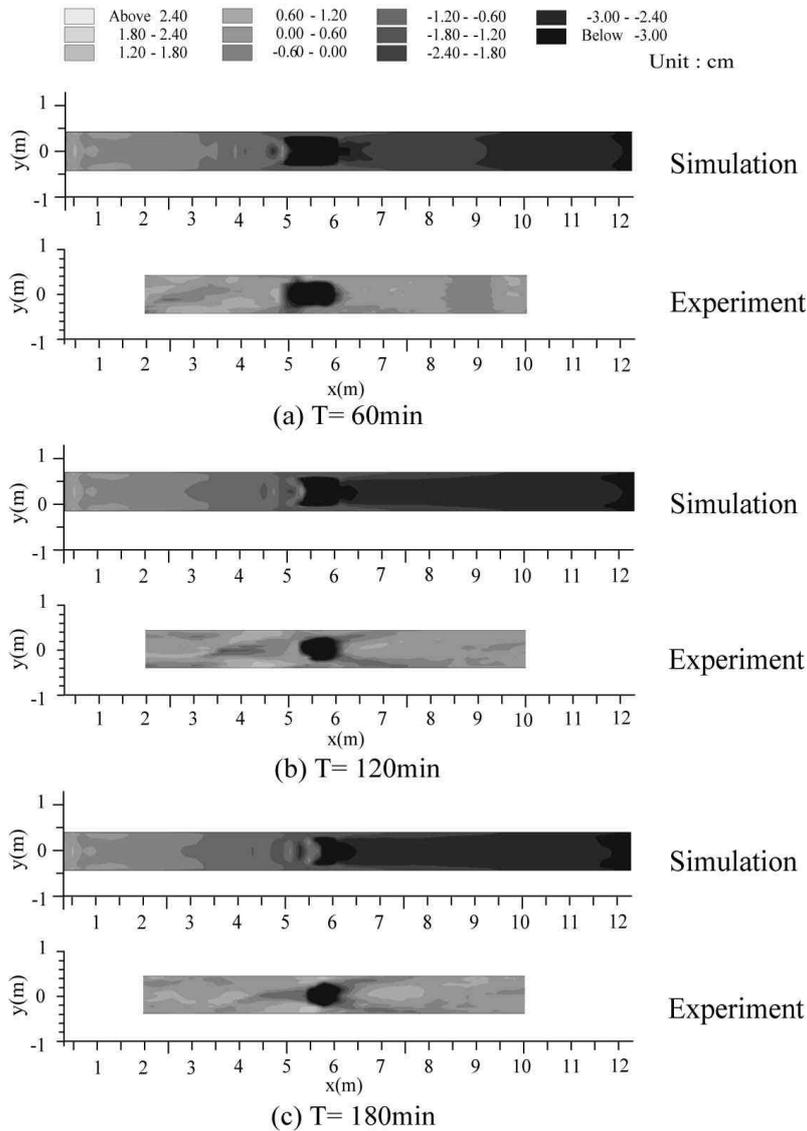


Fig. 5. Comparison of Adjustment Processes between Numerical and Experimental Results for Run-2 (Flow is from Left to Right)

발달하였다. 이러한 현상은 상류에서 발달한 사주의 이동에 의해 편향된 흐름에 의하여 영향을 받은 것으로서, 수치모형에서는 이러한 특성을 반영하는데 약간 한계가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Run-2에 대하여 시간이 증가함에 따른 중방향 하상고 변화를 보여주고 있다. 웅덩이에서 퇴적되는 선단부는 웅덩이가 되메워지는 동안에 일정한 수중 안식각을 유지하면서 거의 동일한 속도로 하류로 이동하고 있으며, 수치모의 결과는 이러한 특성을 잘 모의하고 있다. 또한 시간이 증가함에 따라 웅덩이가 되메워지면서 상류에서 하상고의 약간 진동현상을 보여주고 있다. 그러나 수치모의 결과는 웅덩이 하류에서 발달한 미부침식 현상을 실내실험 결과보다 약간 과대평가 하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 8은 Run-3에 대하여 시간이 증가함에 따른 중방향의 하상고 변화를 보여주고 있다. 수치모형은 Fig. 7에서 보여준 것처럼, 웅덩이가 되메워지는 동안에 일정한 수중 안식각을 유지하면서 거의 동일한 속도로 이동하고 있는 특성을 잘 모의하고 있다. 또한 웅덩이의 되메우기 과정이 완전히 끝난 후인 450분 후에, 웅덩이의 되메우기가 완료된 지점에서 발달하여 하류로 이동하고 있으며, 수치모형은 그 특성을 잘 모의하고 있으나, 웅덩이의 위치는 실험결과보다 약 1m 정도 하류에서 발생하고 있다. 수치모의 결과는 Run-2의 결과와 마찬가지로 웅덩이 하류에서 발달하는 미부침식을 특성을 실내실험의 결과보다 약간 과대평가 하고 있다. 이러한 결과의 차이는 아마도 수치모형이 웅덩이에서 흐름의 3차원적인 특성을 모의하는데 한계가 있기 때문으로 생각된다.

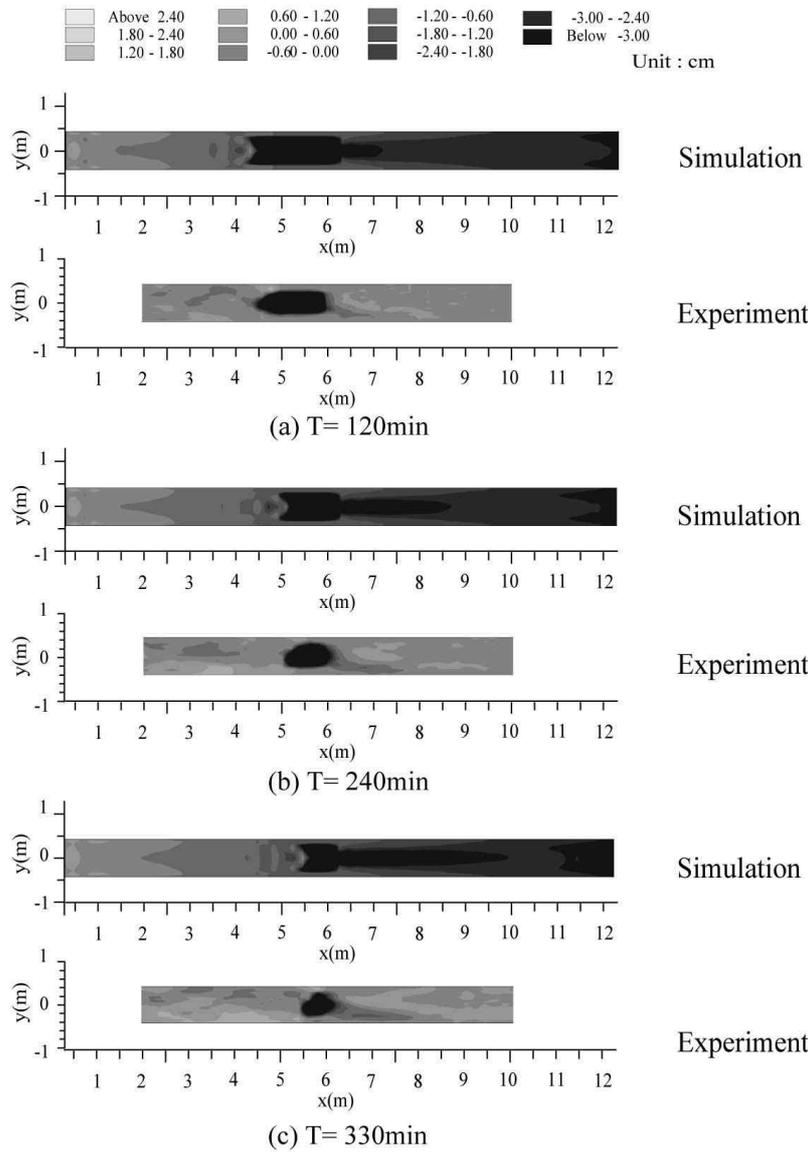


Fig. 6. Comparison of Adjustment Processes between Numerical and Experimental Results for Run-3 (Flow is from Left to Right)

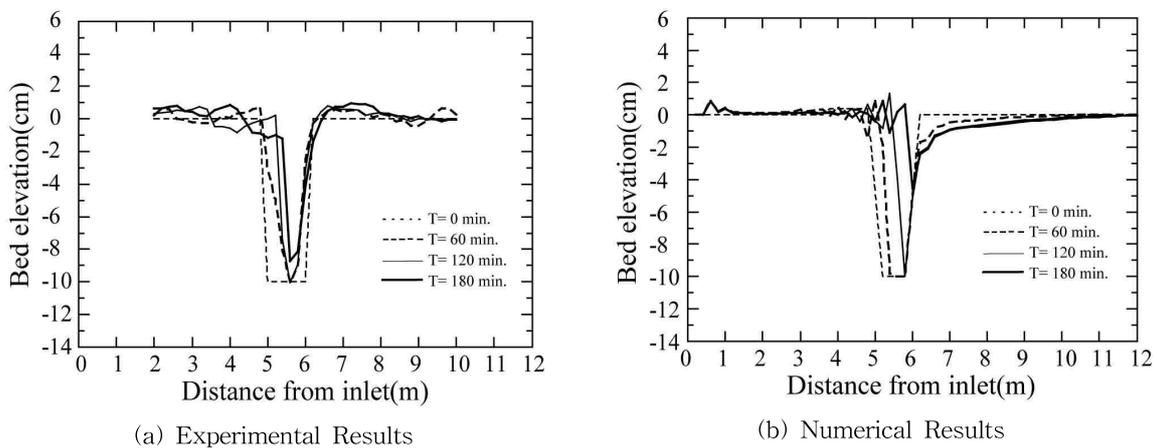


Fig. 7. Comparison of Longitudinal Profiles between Experimental and Numerical Results for Run-2

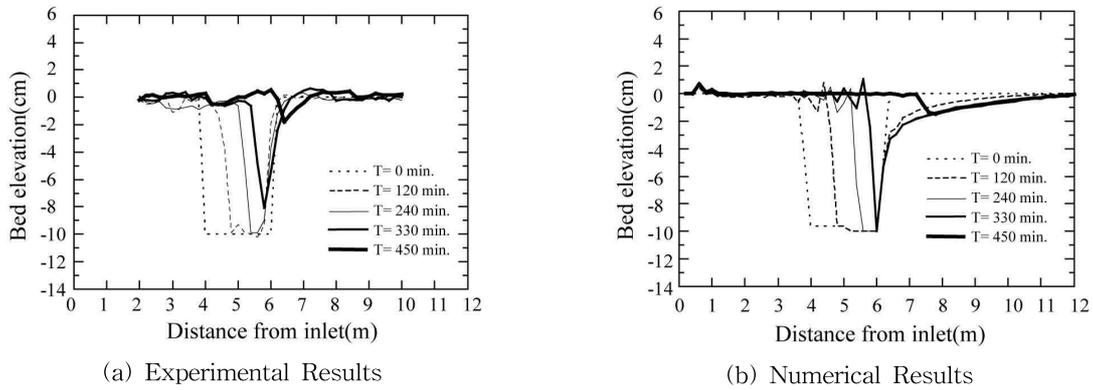


Fig. 8. Comparison of Longitudinal Profiles between Experimental and Numerical Results for Run-3

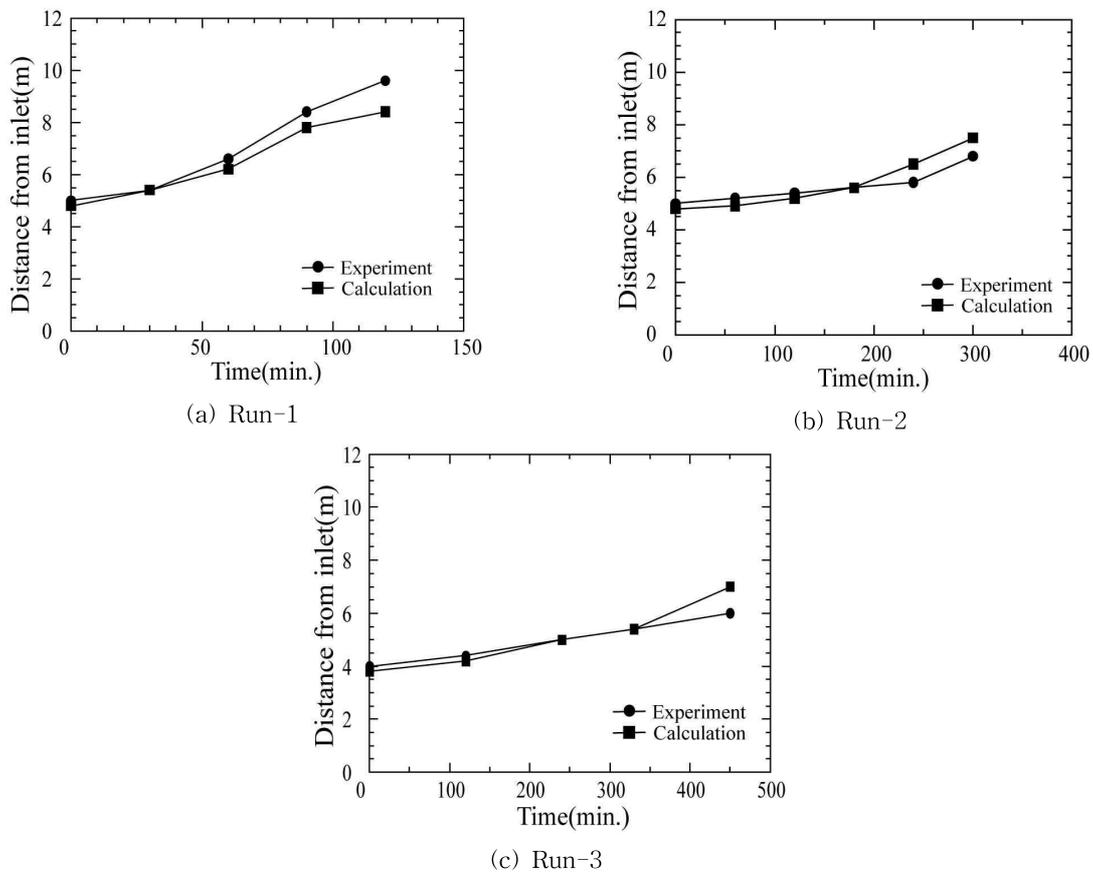


Fig. 9. Comparison of Pit Migration with Time between Experimental and Numerical results for Each Run

Fig. 9는 웅덩이의 이동 추이에 대한 수치모형의 결과와 실내실험의 결과를 보여주고 있다. Run-1에 대하여 웅덩이는 30분까지 느리게 이동하다가 그 이후부터는 빠르게 이동하는 것을 보여주고 있다. 이것은 웅덩이의 퇴메우기가 완료되면서 웅덩이의 깊이가 얕아지기 때문이다. 수치모형은 실험결과를 대체적으로 잘 모의하고 있으나, 90분 이후부터는 약간 과소평가 하고 있다 (Fig. 9(a)). Run-2에서는 240분까지 웅덩이의 이동이 추세선이 완만하지만, 그 이후부터는 급격하게 변하는 경향을 보여주고

있다. 이것은 웅덩이의 퇴메우기가 완료되는 것을 의미하며, 수치모의 결과는 실험결과가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다 (Fig. 9(b)). Run-3에서도 웅덩이가 퇴메워지는 동안에 웅덩이의 이동 특성을 수치모의 결과와 실험결과가 잘 일치한다. 따라서 웅덩이의 퇴메우기가 진행 중일 때에는 웅덩이의 이동속도는 일정하지만, 퇴메우기가 완료된 후에는 웅덩이의 이동속도가 빠르게 되며, 수치모의 결과는 이러한 특성을 잘 모의하고 있는 것을 의미한다.

Fig. 10은 각각의 실험에 대한 웅덩이의 이동속도에 대한 수치모의 결과와 실내실험 결과를 보여주고 있다. Run-1과 Run-2에서 웅덩이의 규모가 같더라도, 하상경사가 Run-2보다 급한 Run-1에 대하여 웅덩이의 이동속도가 Run-2의 결과보다 빠른 것을 보여주고 있다. Run-3에 대하여 하상경사가 같으므로 웅덩이의 평균 이동속도가 Run-2의 결과와 거의 일치하는 것을 보여주고 있다. 따라서 Run-1과 같이 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이의 변화에 대하여 되메워지는 시간이 짧고, 웅덩이의 이동속도가 빠른 것을 보여주고 있으며, 수치모의 결과는 실내실험 결과와 상대적으로 잘 일치하고 있다.

Fig. 11은 장창래와 정관수 (2010)의 실험결과를 토대로 웅덩이의 최대 깊이 (Hc)에 대한 웅덩이의 상류 수심 (y)으로 무차원화 된 웅덩이 깊이 (Hc/y)와 한계 마찰속도 ( $u_{*c}$ )에 대하여 웅덩이의 이동속도 ( $U_{bc}$ )로 무차원화 된 웅덩이의 이동속도 ( $U_{bc}/u_{*c}$ )의 관계를 수치모의 결과와 비교한 것이다. 무차원 웅덩이의 이동속도가 증가하면 무차원 웅덩이의 깊이가 감소한다. 무차원 웅덩이의 값이 작은 경우에는 수치모의 결과와 실험결과가 잘 일치하지

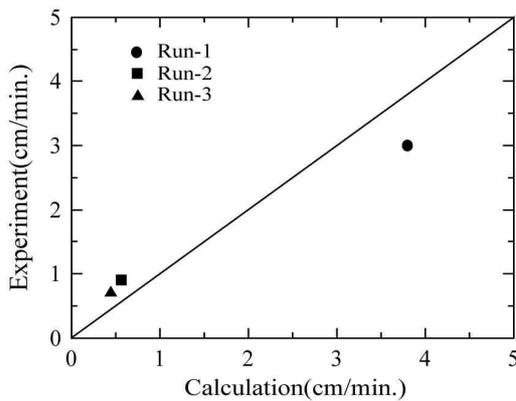


Fig. 10. Comparison of Migration Speed of the Pit between Numerical and Experimental Results for Each Run

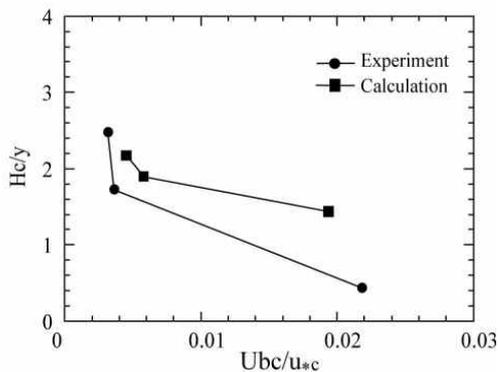


Fig. 11. Comparison of  $H_c/y$  versus  $U_{bc}/u_{*c}$  between Numerical and Experimental Results

만, 무차원 웅덩이의 이동속도가 0.02 이상인 경우에는 실험결과에 비하여 수치모의 결과가 약 0.8 정도로 약간 과대평가하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 12는 한계 마찰속도 ( $u_{*c}$ )에 대하여 웅덩이의 이동속도 ( $U_{bc}$ )로 무차원화 된 웅덩이의 이동속도 ( $U_{bc}/u_{*c}$ )와 무차원 마찰속도 ( $u_*/u_{*c}$ )의 관계를 수치모의 결과와 비교한 것이다. 무차원 마찰속도가 증가하면, 무차원 웅덩이의 이동속도가 증가하며, 수치모의 결과는 실내실험의 경향을 잘 보여주고 있다. 그러나 무차원 마찰속도가 1.2 이상인 경우에는 실험결과에 비하여 수치모형이 약 0.02 정도 과대평가하는 것을 보여주고 있다. 따라서 본 수치모형은 Figs. 8, 9, 10에서 보여주는 것처럼, 하상경사가 급하고 웅덩이의 규모가 작은 경우 (Run-1) 약간 과대평가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 원인은 본 수치모형이 하천준설로 인하여 발생한 웅덩이는 흐름이 3차원 특성을 가지고 있지만, 웅덩이에서 3차원 특성을 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 하천의 골재채취 혹은 하천준설로 인하여 교란된 하천의 적응과정을 하도의 평면변화에 적합하도록 일반좌표계 상에서 흐름 및 하상변동을 모의할 수 있는 2차원 수치모형을 이용하여, 하상경사와 준설 규모의 변화에 따른 하도의 응답 특성을 정량적으로 파악하였다.

하천준설 혹은 골재채취에 의해 형성된 웅덩이는 초기에 웅덩이 상류 지점에서 급격한 두부침식이 발생하여 상류로 전파되었고, 상류로 갈수록 그 규모는 작아졌다. 시간이 증가하면서 상류에서 공급되는 유사에 의해 두부침식은 감소되었으며, 웅덩이가 되메워지기 시작하였다. 웅덩이는 상류에서 공급되는 유사에 의하여 채워지면서, 일정한 안식각을 유지하면서 거의 균일한 속도로 이동하고, 웅덩이 하류에서는 하상저하가 지속되고 있다. 수치모의

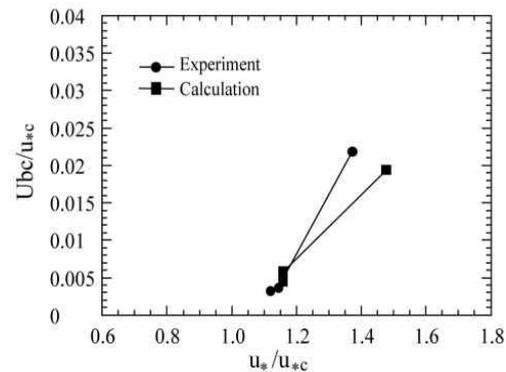


Fig. 12. Comparison of  $U_{bc}/u_{*c}$  versus  $u_*/u_{*c}$  between Numerical and Experimental Results

결과는 이러한 과정을 잘 모의하였다. 그러나 수치모의 결과는 웅덩이 하류에서 발달한 미부침식 현상을 실내실험보다 약간 과대평가 하였으며, 이러한 차이는 수치모형이 웅덩이에서 흐름의 3차원적인 특성을 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다.

웅덩이의 퇴메우기가 진행 중일 때에는 웅덩이의 이동속도는 일정하지만, 퇴메우기가 완료 된 후에는 웅덩이의 이동속도가 빠르게 되며, 수치모의 결과는 이러한 웅덩이의 적응과정을 잘 모의하였다. 하상경사가 급할 경우에, 웅덩이의 변화에 대하여 퇴메워지는 시간이 짧고, 웅덩이의 이동속도 빠른 것을 보여주고 있으며, 수치모의 결과는 실내실험 결과와 상대적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 본 수치모형은 하상경사가 급하고 웅덩이 규모가 작은 경우에 하도의 적응과정을 모의하는데 약간 과대평가가 하는 경향이 있다.

본 연구에서는 하도의 평면변화를 고려한 웅덩이의 적응과정을 파악하는데 소류사의 이송만을 고려하여 수치모의를 하였으나, 부유사가 지배적인 하도의 변화를 파악하거나, 혼합사로 이루어진 자갈하천에서 유사의 분급을 고려하여 하도의 변화를 파악하는데 한계가 있으며, 향후에 지속적인 연구가 필요하다. 또한 다양한 웅덩이의 형상 및 규모뿐만 아니라 사행하천 등의 하도 형태에 따른 일반화된 적응과정에 대하여 연구할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업(06건설핵심B01)의 ECORIVER21 사업단 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 장창래, 이광만, 이준열 (2008), **하천준설에 의한 교란하천의 반응해석을 하상변동 연구 (2차년도)**, 한국수자원공사 수자원연구원.
- 장창래, 정관수 (2010). "준설하천의 웅덩이 적응에 관한 실험적 연구." **한국수자원학회논문집**, 제43권, 제7호, pp. 657-666.
- Cao, Z., and Pender, G. (2004). "Numerical modelling of alluvial rivers subject to interactive sediment mining and feeding." *Advances in Water Resources*, Vol. 27, pp. 533-546.
- Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel beds." *J. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.
- Gill, M.A. (1994). "Hydrodynamics of mining pits in erodible bed under steady flow." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 11, pp. 1337-1348.
- Gob, F., Houbrechts, G., Hiver, M., and Petit, F. (2005). "River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (the river Semois, Belgium)." *River Res. Applic.* Vol. 21, pp. 791-804.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2005). "Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 131, No. 7, pp. 565-575.
- Kishi, T., and Kuroki, M. (1973). "Bed form and flow resistance in alluvial rivers (I)." *Research Report of Faculty of Engineering, Hokkaido Univ.*, Vol. 67, pp. 1-23.
- Kondolf, G.M. (1994). "Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining." *Landscape and Urban Planning*, Vol. 28, pp. 225-243.
- Kondolf, G.M., Piegay, H., and Landon, N. (2002). "Channel response to increased and bedload supply from land use change: contrast between two catchments." *Geomorphology*, Vol. 45, pp. 35-51.
- Lee, H.Y., Fu, D.T., and Song, M.H. (1993). "Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 64-80.
- Lee, H.Y., and Hwang, S.T. (1994). "Migration of backward-facing step." *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 693-705.
- Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport." *Proc. 2nd Congress, IAHR*, Stockholm, Sweden, Vol. 2, No. 2, pp. 39-64.
- Rinald, M., Wyzga, B., and Surian, N. (2005). "Sediment mining in alluvial channels: Physical effects and management perspepts." *River Res. Applic.*, Vol. 21, pp. 805-828.
- Wu, W., and Wang, S.S.Y. (2008). "Simulation of morphological evolution near sediment mining pits using a 1-D mixed-regime flow and sediment transport model." *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, pp. 1-10.
- van Rijn, L.C. (1996). "Sedimentation of dredged channels and trenches." *Handbook of coastal and ocean engineering* (ed. by Herbich, J.B.), pp. 611-650.

Yabe, T., Ishikawa, T., Wang, P. Y., Aoki, T., Kadota, Y., and Ikeda, F. (1991). "A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation II. Two and three-dimensional solvers." *Comput.*

*Phys. Commun.*, Vol. 66, pp. 233-242.

논문번호: 10-072	접수: 2010.08.18
수정일자: 2010.09.27/10.07	심사완료: 2010.10.07