



Numerical investigation of space effects of serial spur dikes on flow and bed changes by using Nays2D

Lee, Kyung Su^a · Jang, Chang-Lae^{b*}

^aNational Disaster Management Institute, Ulsan, 44538, Korea

^bAssociate Prof. Dept. of Civil Eng., Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea

Paper number: 15-100

Received: 4 December 2015; Revised: 24 January 2016 / 28 January 2016; Accepted: 28 January 2016

Abstract

In this study, the characteristics of flow and bed changes with variation of space and length of serial spur dikes were investigated with 2 dimensional numerical simulation. Upstream spur dike was affected by flow and made a role as a single spur dike. As time increased, local scouring was developed around outside of spur dike, and migrated upstream. The aggradation of the bed at the back of spur-dike was made at the initial stage of experiment and numerical modelling. However, the aggradation of the bed was increased in the downstream area. The scour hole around a spur dike upstream was not deep as the Dimensionless spur-dike interval (L/b) of the dike increased. The depth of scour hole was nearly constant at the dynamic equilibrium state. The dimensionless scour depth (y/H) increased with L/b . The spur dike downstream had the characteristics of single spur dike as the L/b was larger than 10. However, the spur dike downstream was affected by the dike upstream as the L/b was less than 4, and the bed of the upstream in the spur dike was aggradated and the effects of the serial spur dikes on the bed decreased.

Keywords: Spur dike, numerical model, Nays2D, scour hole

수치모형을 이용한 수제 간격에 따른 흐름 및 하도변화 연구

이경수^a · 장창래^{b*}

^a국민안전처 국립재난안전연구원, ^b한국교통대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제의 설치간격과 길이변화에 따라 흐름특성과 하도의 변화 특성을 파악하였다. 최상류에 설치된 수제는 흐름의 영향을 직접 받으며, 단독 수제와 같은 특성이 있다. 또한 시간이 증가할수록 국부세굴은 흐름과 수제의 외측 가장자리가 만나는 지점에서 발생하며, 수제 상류로 이동한다. 하상도 퇴적은 통수초기에 수제 후면에서 발생하지만 시간이 지날수록 하류 전체에 걸쳐 나타난다. 최상류 단 수제에서 무차원 수제 간격(L/b)이 클수록 세굴공 깊이는 작으나, 동적평형상태에 도달하였을 경우에 세굴공 깊이는 일정하게 유지되었다. L/b 이 클수록 무차원 세굴심(y_s/H)은 증가하지만, L/b 이 10이상인 경우에는 독립성이 강해지면서 하류에 위치한 수제는 단독 수제와 같은 특성을 보였다. 그러나 L/b 이 4이하인 경우에는 하류에 설치된 수제의 간섭을 받아 하류에 설치된 수제 상류에서 퇴적이 발생하였다. 따라서, 무차원 수제 간격이 4~10인 경우에 군수제의 역할이 감소되었다.

핵심용어: 수제, 수치모형, Nays2D, 세굴공

*Corresponding Author. Tel: +82-43-841-5183
E-mail: cljang@ut.ac.kr (C.-L. Jang)

1. 서론

수제는 하천에서 흐름방향을 제어하고 하안 침식을 억제하기 위하여 설치한다. 또한 주수로에 흐름을 집중시키고 유속과 유사이송능력을 증가시켜서, 주수로에서 지형변화를 억제하고 유심선을 유지한다. 최근에는 수생태계 생물 서식지 복원을 위하여 설치되고 있으며(Shields et al., 2000), 치수뿐만 아니라, 하천환경을 복원하는데도 적용되고 있다. 또한 수제에 의한 흐름 및 세굴심의 변화에 대한 현장조사, 실험 및 수치모의를 통하여 다양하게 연구되어 왔다. 수제를 따라 흐름이 분리되는 전단층(shear layer)이 형성되고, 수제 후면에서 흐름의 재순환 구역이 형성되며, 수제 주변에서 복잡한 흐름이 형성된다(Mayerle et al., 1995; Oullion and Dartus, 1997). Tingsanchali and Maheswaran (1990)은 수심평균된 $-\varepsilon$ 난류모델을 이용하여 수제 주변의 흐름 특성을 분석하였고, Molls et al. (1995)는 유한차분모형과 와점성 모델을 적용한 수치모형을 이용하여 수제 주변의 흐름 구조를 파악하였다. Michiue and Hinokidani (1992)는 2차원 하상변동모형으로 수제 주변의 흐름과 세굴현상에 대한 특성을 연구하였으며, Nagata et al. (2005)은 정교한 3차원 모형을 개발하여 수제 주변의 흐름 구조를 파악하고 하상변동을 모의하였다. Kang et al. (2005)은 단일 수제의 수리학적 조건에 따른 선단부 유속과 재순환 영역 특성을 분석해 흐름 분리 길이와 입사각의 변화를 통해 투과율과 수제 설치각에 대한 실험식을 제안하였다. Yeo et al. (2006)는 수리실험을 통해 수제길이 및 투과율 변화에 따른 수제주변의 흐름장을 LSPIV를 이용하여 측정하고, 흐름 중심선과 흐름 분리영역 특성을 파악하였다. 또한 Kang et al. (2009)은 경사수제 주변의 흐름특성을 수리실험을 통해 분석하여 흐름중심선과 수제길이의 관계를 분석하였다.

일반적으로 하천에 수제를 설치할 때, 수제의 수가 많아질수록 흐름을 제어할 수 있는 능력이 증대되기 때문에 단독수제가 아닌 수제군으로 설치되고 있다. 수제의 설치 간격은 하류흐름과 재순환구역(return flow zone)의 특성이 다양하게 변화하며, 하상변화 및 하안침식에 큰 영향을 미치기 때문에 수제의 길이와 밀접한 관계가 있다. Fenwick (1969)은 수제 설치 목적에 따라 수제길이(b)와 수제간격(L)의 비인 무차원 수제 간격(L/b)을 제안하였으며, 흐름제어 목적으로는 $L/b=2.0\sim 2.5$, 제방보호 목적의 경우에는 $L/b=3.0$ 을 제안하였다. Richardson and Simons (1974)는 흐름을 지체시킬 때 $L/b=1.5\sim 2.0$ 으로 설치하고, 유로 고정 및 흐름조절을 위한 목적으로 수제를 설치할 때는 $L/b=3.0\sim 6.0$ 을 제안하였

다. 직선수로 또는 반경이 큰 만곡부에서는 $L/b=4.0\sim 6.0$, 반경이 작거나 비교적 급한 만곡부에서는 $L/b=3.0\sim 4.0$ 을 제안하였다. Copeland (1983)는 하안 보호목적의 수제간격은 $L/b=3.0$ 이상을 제시하였다. 수제군의 경우 수제의 설치간격이 큰 수록 수제 주변에서 국부세굴이 가장 커지는 최상류단 수제는 단독 수제와 같은 특성을 갖는다. 또한 하류에 설치된 수제는 수제 간격과 길이의 변화에 의하여 다양하게 영향을 받으며, 이러한 변화에 따라 생태 서식공간 확보와 치수적 안정성을 확보하는데 매우 중요하다. 그러나 수제군으로 설치된 경우에, 수제 주변에서 국부세굴이 가장 커지는 최상류단 수제는 단독 수제와 같은 특성을 갖고 있고, 그 하류에 설치된 수제는 수제 간격과 길이의 변화에 의하여 다양하게 영향을 받고 있으나, 이에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 수제와 수제 사이의 변화를 정량적으로 파악하는 것은 생태 서식공간 확보와 치수적 안정성을 확보하는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수치모형인 Nays2D를 이용하여 직선수로에서 수제의 설치간격에 따른 세굴 영향을 분석하였다.

2. 모형의 개요

Nays2D 모형은 2009년에 개발된 iRIC 모형에 탑재되어 있으며, Hokkaido University의 Shimizu 교수에 의해 개발되었다. 본 모형은 직교좌표계를 변환하여 형상이 복잡한 하천에도 적용할 수 있도록 경계적합좌표계(boundary fitted coordinates)를 사용하였으며, 수리구조물을 포함한 2차원 흐름특성을 계산하고, 하상변동을 모의할 수 있다.

2.1 지배방정식

본 모형은 평면 2차원 흐름 거동을 모의하기 위하여 흐름의 지배 방정식은 수심 적분된 2차원 연속 방정식과 운동량 방정식을 이용하였다. 직교좌표계에서 경계적합좌표계로 좌표 변환한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

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

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[\xi_x^2 + \xi_y^2 \right] \frac{\partial}{\partial \xi} + \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y \left) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - C_f + \frac{1}{2} C_a s_h \left) \frac{u^\xi}{h J} \left(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta \right)^2 + \left(-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta \right)^2 + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[\left(\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y \right) \frac{\partial H}{\partial \xi} + \left(\eta_x^2 + \eta_y^2 \right) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - \left(C_f + \frac{1}{2} C_a s_h \right) \frac{u^\eta}{h J} \sqrt{\left(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta \right)^2 + \left(-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta \right)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ω 와 η 는 일반좌표계의 공간좌표 성분이다. u 와 u^η 는 ξ, η 방향의 유속(m/s)이며, J 는 Jacobian이다. H 는 수위 (= $z + h, m$)이고, z_b 는 하상고(m)이다. a_s 는 단위체적당 식생에 의한 차단되는 면적이며, C 는 식생에 의한 항력 계수이다. C_f 는 하상 전단계수이고, n 은 Manning의 조도계수이다. 여기서 각 항의 매개변수는 다음과 같다.

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

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \alpha_5 = 2 \left(\eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (5)$$

확산항은 다음과 같다.

$$D^\xi \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \quad (6)$$

$$D^\eta \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\nu_t \xi_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\nu_t \eta_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \quad (7)$$

여기서, ξ_r 과 η_r 은 일반좌표계에서 격자의 크기와 국소적인 격자의 크기 비를 나타내며, 와 동 점성계수 ν_t 는 $k-\epsilon$ model을 이용하여 해석하였다. 일반 좌표계에서 2차원 유사의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_b^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_b^\eta}{J} \right) \right] = 0 \quad (8)$$

여기서, z_b 는 하상고(m)이며, λ 는 하상재료의 공극률이다. q_b^ξ 와 q_b^η 는 ξ 와 η 방향에서 각각 단위 폭당 소류사량($m^3/s/m$)이다. 하상에서 소류사량은 Ashida and Michiue (1972)의

공식으로 계산하였다.

$$q_b = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_*}{\tau_*^*} \right) \left(1 - \frac{u_*}{u_*^*} \right) s_g g d^3 \quad (9)$$

여기서, q_b 는 단위폭당 소류사량($m^3/s/m$)이며, s_g 는 수중에서 하상재료의 상대 밀도이다. g 는 중력가속도(m/s^2)이고, d 는 소류사의 지름(mm)이다. τ_* 는 무차원 한계 소류력이며, u_* 는 한계 마찰속도(m/s)이다.

하천에서 주 흐름 방향에 대한 횡단 방향으로의 소류사이송률을 계산하기 위하여, 원심력에 의한 이차류 및 횡방향 경사를 고려하였다. ξ 와 η 방향에서 유사량은 Watanabe et al. (2001)이 제시한 방법을 사용하였으며, 다음과 같이 계산된다.

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

$$q_b^\eta = q_b \left[\frac{u_b^\eta}{V_b} - \gamma \left(\frac{\partial z_b}{\partial \eta} + \cos \theta \frac{\partial z_b}{\partial \xi} \right) \right] \quad (11)$$

여기서, u_b^ξ 및 u_b^η 는 ξ 와 η 방향으로 하상부근에서 유속(m/s), V_b 는 하상부근에서 유속(m/s), θ 는 ξ 와 η 의 교차 각($^\circ$), $\gamma = \tau_* / \mu_s \mu_k \tau_*^*$, μ_s 는 Coulomb의 정적 마찰계수(=1.0), μ_k 는 Coulomb의 동적 마찰계수(=0.45)이다.

유선이 굽어질 때, 원심력의 변화에 의해 이차류(Secondary flow)가 발생하며, 유선에 수직방향으로 하상부근에서 유속은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_b^n = u_b^s N_s \frac{h}{r_s} \quad (12)$$

여기서, r_s 는 유선의 곡률 반경(m), N_s 는 이차류 강도계수이며, 본 연구에서는 Engelund (1974)에 의한 제시된 7.0을 사용하였으며, 이는 만곡부에서 횡방향 경사가 완만한 상태에서 얻은 것으로써, 횡방향 경사가 급한 경우에 중력효과가 고려되어야 한다. Eq. (12)에서 유선의 곡률은 다음과 같다.

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

$$uv \xi \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) - v^2 \left(\xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \quad (13)$$

여기서, $\xi = (u^2 + v^2)$ 이다.

2.2 수치모의 기법

수치해석 기법으로는 엇갈림 격자(staggered grid) 상에서 이류항에는 CIP (Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계조건으로는 상류에서 흐름을 부여하고, 하류에서 등류수심을 적용하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

3. 모형의 검증

3.1 수치모의 조건

수치모형의 적용성을 검토하기 위하여 Michiue and Hinokidani (1992)의 실험결과와 수치모의 결과를 비교하였다. 실험조건은 폭 0.4 m, 길이 3.0 m의 직사각형 수로에 길이 0.1 m의 수제를 설치하고, 수로바닥은 평균 입경이 0.6 mm인 균일사를 포설하였다. 수로경사는 1/300이며, 유량은 0.004 m³/s이었다. 평균수심이 2.85 cm인 상태로 유지하며 통수하여 하상이 동적평형상태(Dynamic equilibrium stage)에 도달했을 때까지 실험을 계속하였다. 여기서, 동적평형상태는 흐름은 지속되지만 최대 세굴심이 어느 시점에 도달하면 일정하게 유지되어 변화가 없는 상태를 의미한다. 실험조건은 Table

Table 1. Hydraulic conditions (Michiue and Hinokidani, 1992)

Width (m)	Slope	Discharge (m ³ /s)	Depth (m)	Length of spur-dike (m)	Mean diameter of sediment (mm)
0.4	1/300	0.004	0.0285	0.1	0.6

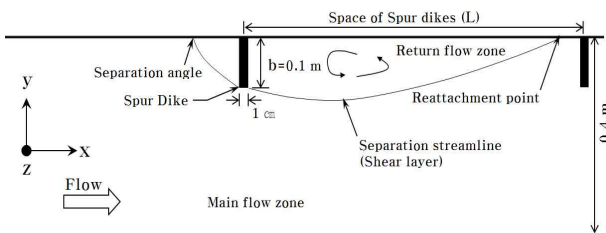


Fig.1. Schematic sketch of flow around a spur dike

1에 자세히 나타났으며, 수제 주변의 2차원 흐름에 대한 개념도는 Fig. 1과 같다. 여기서, 수치모형의 적용성을 검증하기 위한 실험조건과 같이 단일수제(single dike)로 하였다. 수치모의를 위한 계산된 격자망 수는 10(J)×150(I)=1,500개이며, 계산은 2,000초까지 수행하였다. 난류모형은 k-ε모형을 적용하였다.

3.2 모형의 검증

Fig. 2는 수제주변에서 발생된 유속분포를 보여주고 있다. 흐름을 모의한 결과, 수제에 의하여 유선이 굽어지며, 하류로 흐름이 분리되는 전단층이 형성되었다. 전단층을 형성하면서 분리된 흐름은 측벽에 부딪히는 재부착점(reattachment point)이 형성된다. 재결합길이는 수제에서 하류 측벽에서 형성된 재부착점까지 길이이다. 흐름이 정체되거나 재순환되는 재순환 영역의 최대 폭은 측벽에서 흐름이 분리되는 전단층의 최대 폭의 길이이다(Fig. 2). 재결합길이는 수제 길이의 10.8배, 재순환 영역의 최대 폭은 수제 길이의 1.4배로 나타났으며(Fig. 2), Table 2에서 보여주고 있는 것처럼, 기존의 연구자들에 의하여 제시된 연구결과와 일치하였다. Fig. 3은 측벽으로부터 수제에 의한 종방향 유속의 변화를 보여주고 있으며, Rajaratnam and Nwachukwu (1983)과 Tinfanchali and Maheswaran (1990)의 실험 및 수치모의 결과와 전체적으로 일치하였다(Fig. 3). 그러나, 수제 상류에서 수치모의 값이 약간 과다하게 산정되었으며(Fig. 3(a)), 이것은 2차원 모형이 3차원 흐름구조를 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 실내실험과 수치모의를 수행한 하상변동 결과를 보여주고 있다. 세굴은 수제 선단부에서 발생하여 세굴공 최대 -4.0~-9.0 cm까지 형성 되었으며, 수제 하류에서 하상은 1.0 cm 상승하였다. 이러한 수치모의 결과는 Michiue and Hinokidani (1992)의 실험결과와 경향은 일치하지만, 최대 세굴심이 발생하는 위치는 수제 상류에 발생하며, 세굴되는 범위는 과소하게 모의하였다. 이러한 원인은 수치모의를 수행하는 격자의 구성, 난류의 완결문제, 3차원 흐름 구조를 모

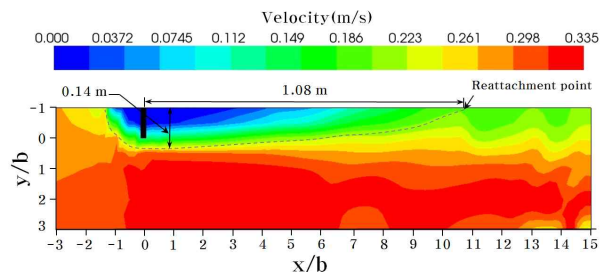


Fig. 2. Computed velocity vector field

Table 2. Length and width of the recirculating zone around a spur-dike

Researcher	Dimensionless recirculating length (x/b)	Dimensionless recirculating width (y/b)	Classification
Francis et al. (1968)	12.5	N/A	Experiment
Rajaratnam and Nwachukwu (1983)	12.0	2.0	Experiment
Holtz (1991)	11.5	N/A	Experiment/Numerical simulation
Tingsanchali and Maheswaran (1990)	12.0	2.0	Numerical simulation (2D)
Ouillon and Dartus (1997)	10.7	1.9	Numerical simulation (3D)
Mayerle et al. (1995)	8.4~15.2	-	Numerical simulation (3D)
Molls et al. (1995)	12.0	1.85	Numerical simulation (2D)
Choi and Oh (2004)	12.5	2.0	Numerical simulation (2D)
Present study	10.8	1.4	Numerical simulation (2D)

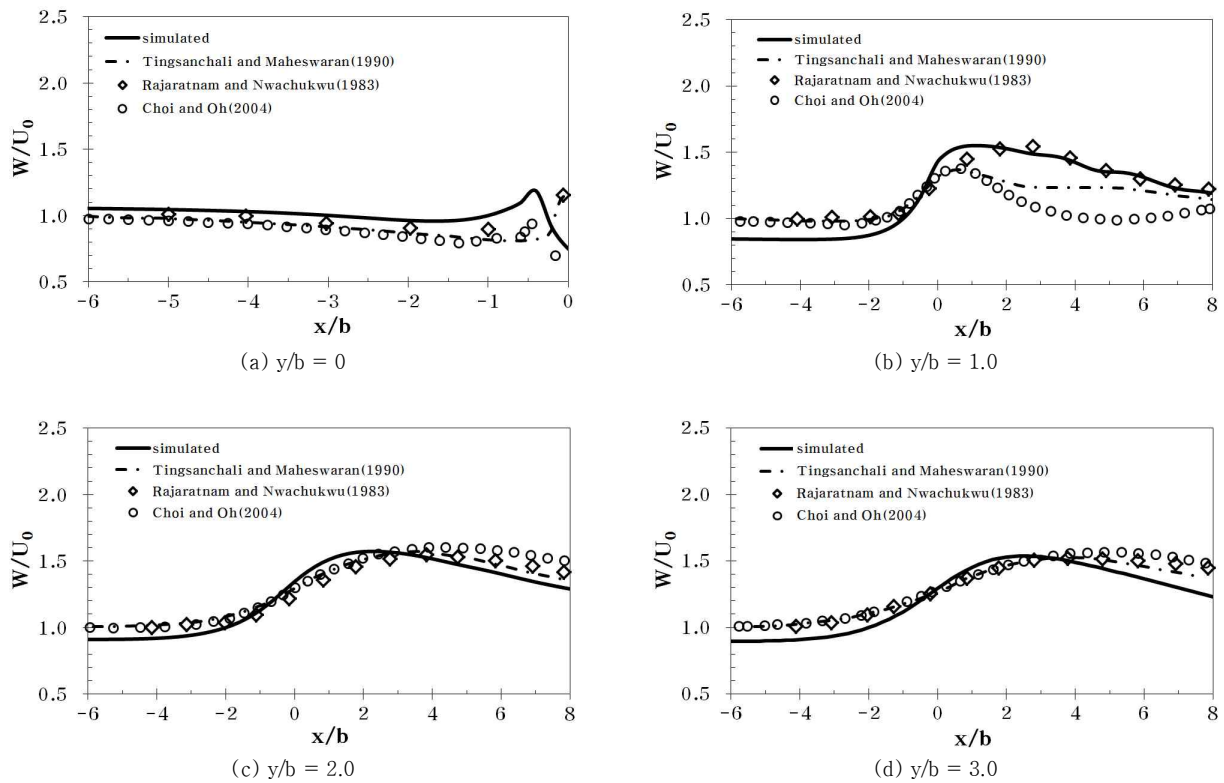


Fig. 3. Computed velocity magnitude profiles is resultant velocity and U is approach velocity

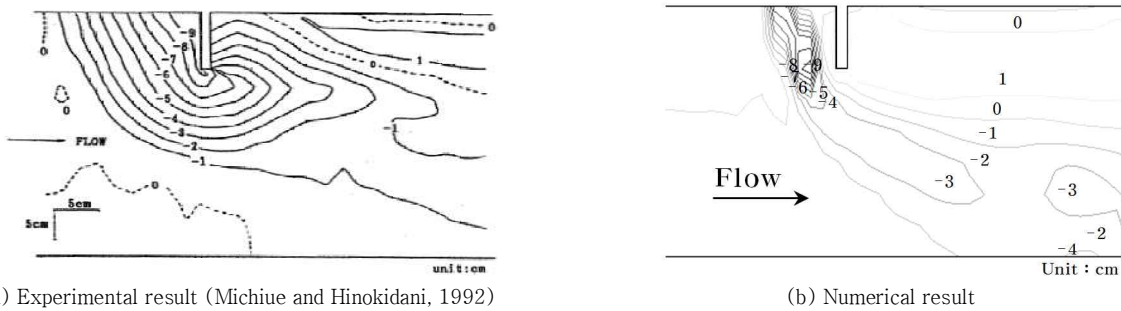


Fig. 4. Numerical and experimental results of bed changes around a spur dike

Table 3. Simulation conditions

Case	Dimensionless spur-dike interval (L/b)	Number of dikes	Distance between dike and dike (m)
Run-1	Single dike	1	-
Run-2	2	2	0.2
Run-3	4	2	0.4
Run-4	8	2	0.8
Run-5	10	2	1.0
Run-6	15	2	1.5

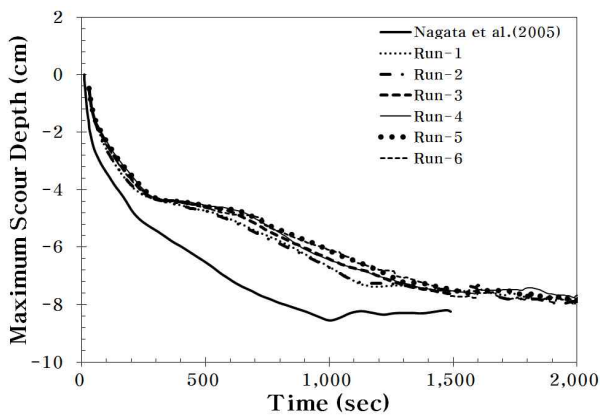


Fig. 5. Maximum scour depth with time for each run

의하는데 한계 등으로 판단된다.

수제와 수제 사이의 변화를 정량적으로 파악하는 것은 치수적 안정성 및 생태 서식공간을 확보하는데 중요하며, 직선수로에서 수제의 설치간격에 따른 세굴 영향을 분석하였다. 수치모의를 하기 위한 계산조건은 Michiue and Hinokidani (1992)이 수행한 실내실험 조건과 같이 설정하였다. Table 3은 수제간격 (L)과 수제길이 (b)의 비인 무차원 수제 간격 (L/b)의 변화에 따른 최상류단 수제 주변에서 발생하는 국부세굴을 특성과 영향을 파악하기 위한 수리학적 조건을 보여주고 있다. Fig. 5는 각 수치모의 조건에 대한 최상류단 수제 주변에서 발생한 최대 세굴심의 변화와 Nagata et al. (2005)의 연구결과를 보여주고 있다. 수제 선단부에서 초기에 국부세굴이 발생하며, 시간이 증가할수록 그 깊이가 증가하고 하상이 깊게 패인 세굴공(scour hole)이 발달하였다. 최대 세굴은 수제 앞부분에서 발달하였다. 시간이 증가하면서, 하상은 동적평형상태에 도달하였다. Nagata et al. (2005)의 결과는 1,000초 후에 동적평형상태에 도달하였다. Run-1과 2는 1,200초에서 평형상태에 도달하였으며, Run-3, 4, 5에서는 1,300초에서 평형상태에 도달하였다. 이러한 원인은 본 수치모형이 2차원 모형이며, 3차원 흐름특

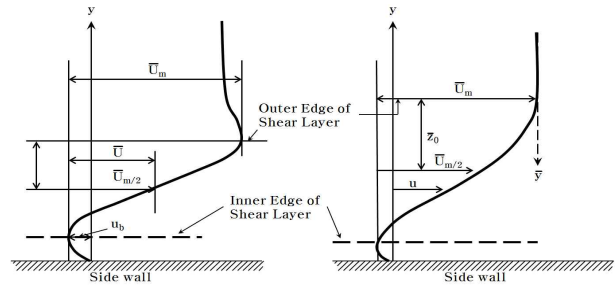


Fig. 6. Shear layer profiles around a spur-dike (Rajaratnam and Nwachukwu, 1983)

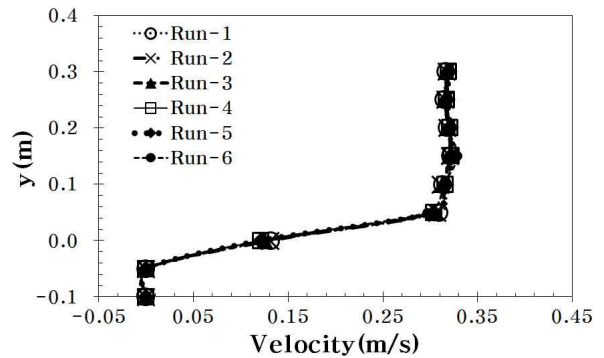


Fig. 7. Numerical velocity distribution at the first dike for each run ($x/b=-0.04$)

성을 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다. 그러나, 본 수치모의의 결과, 평형상태에 도달 한 후($t=1,500$ 초) 발생한 최대 세굴심의 발달 양상은 Nagata et al. (2005)의 결과와 거의 일치하였다.

Fig. 6은 Rajaratnam and Nwachukwu (1983)에 의하여 제시된 수제 주변에서 유속분포 양상을 보여주고 있으며, Fig. 7은 최상류단 수제에서 수치모의의 한 유속분포 결과를 보여주고 있다. 수제에 의한 영향으로 수제 상류에서 수위는 상승하고 수제 하류에서 수위가 급하강 되면서 재순환 영역이 형성되어 유선이 분리된다. 이것은 수제로 인한 단면축소와 마찰 때문에 발생하며, x방향에서의 재순환 영역이 시작하여 y방향으로 최대 0.33 m/s까지 증가하였다. 그러나 하류로 갈수록 수위와 유속은 점차 일정하게 유지하였다(Fig. 7). Fig. 6과 7에서 보여주고 있는 것처럼, 수치모의의 결과는 Rajaratnam and Nwachukwu (1983)의 유속분포 경향을 따르고 있다.

4. 수제 간격에 대한 하도의 변화 분석

4.1 평면변화

Fig. 8(a)는 무차원 수제 간격(L/b)에 따른 초기상태($t=$

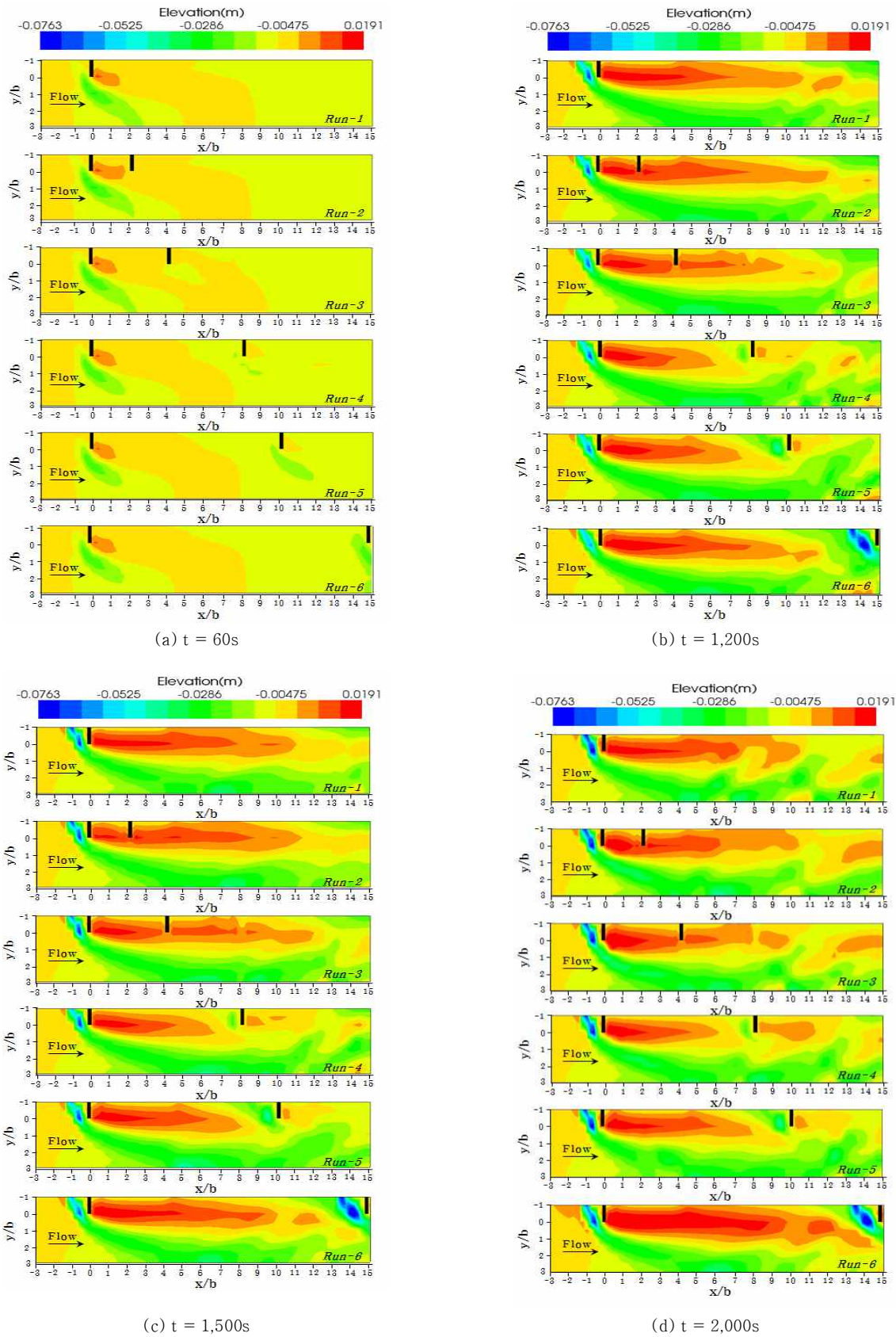


Fig. 8. Planimetric changes for each run with time

60 초)인 경우의 평면변화를 보여주고 있으며, 하상에서 세굴은 최상류단 수제 앞부분에서 시작되고 있다. Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)는 동적평형상태($t = 1,500$ 초,)에 도달하였을 때, b 에 따른 하도의 평면변화를 보여주고 있다. 세굴공은 통수초기 수제 끝에서 시간이 지날수록 상류로 이동하며, 유사의 퇴적은 통수 초기에 수제 뒤에서 발생하지만, 시간이 증가할수록 하류로 전파되며, 하상고가 상승하였다(Fig. 8). 이것은 최상류단 수제 앞부분에서 발생한 세굴에 의하여 유사가 하류로 이동하면서 유속이 작은 부분에 퇴적되기 때문으로 판단된다.

4.2 횡단변화

Fig. 9(a)는 최상류단 수제 직상류에서 초기상태($t = 60$ 초)와 동적평형상태에 도달했을 때, 횡방향 하상변동을 보여주고 있다. 초기상태에서 최상류단 세굴공 깊이는 최대 $-0.012 \sim -0.013$ m까지로 일정한 형상을 유지하고, 수제 끝에서 시작되는 것을 보여주고 있다. Fig. 9(b)의 $t = 1,200$ 초인 경우에 세굴공 깊이는 최대 $-0.064 \sim -0.070$ m 이었으며, 최대 세굴심은 수제 끝에서 발생하였다. $1,500$ 초에 도달했을 때 세굴공 깊이는 $-0.070 \sim -0.072$ m 이었다(Fig. 9(c)). $2,000$ 초에서 세굴공 깊이는 최대 $-0.070 \sim -0.073$ m 이며(Fig. 9(d)), $1,500$ 초에서 발생한 세굴공 깊이는 거의 일치하였다. 또한 세굴공은 초기상태와 마찬가지로 수제 끝에서 발달하였다. 이러한 현상은

Michiue and Hinokidani (1992)의 실험결과와 Nagata et al.(2005)의 수치모의 결과에서도 보여주고 있다.

4.3 종단변화

Fig. 10(a)는 초기상태($t = 60$ 초)에서의 종방향 하상변동을 보여주고 있다. 초기상태에서 최상류 수제 부근에서 발달한 세굴공 깊이는 $-0.011 \sim -0.013$ m이며, 동일 구간에서 일정한 형상을 유지하고 있다. 그러나, Runs-2와 3에서 하류에 위치한 2번째 수제에서 하상고 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. Run-4, 5, 6에서 하류에 위치한 2번째 수제의 세굴공은 각각 -0.006 m, -0.007 m, -0.009 m까지 발달하였다. $1,200$ 초인 경우의 종방향 하상변화는 최상류단에서 $-0.068 \sim -0.073$ m까지 세굴공이 발달하였다(Fig. 13(b)). Runs-2와 3에서 하류에 위치한 2번째 수제에서는 각각 0.011 m, 0.004 m 퇴적이 되었으며, Runs-4, 5, 6에서 최대 세굴심은 각각 -0.015 m, -0.035 m, -0.082 m이었다. Fig. 13(c)는 동적평형상태($t = 1,500$ 초)에 도달했을 때, 종방향 하상변화를 보여주고 있다. 동적평형상태에서 최상류단 세굴심은 $-0.066 \sim -0.072$ m까지 발달하였다. Runs-2와 3에서 하류에 위치한 2번째 수제에서는 각각 0.015 m, 0.009 m 퇴적이 되었으며, Run-4, 5, 6에서 세굴공은 각각 -0.015 m, -0.035 m, -0.082 m까지 발달하였다. Fig. 13(d)는 동적평형상태에 도달한 이후($t = 2,000$ 초)의 종방향 하상변화를 보여주고 있으며, 최상류단 세굴공 깊이는 $-0.070 \sim$

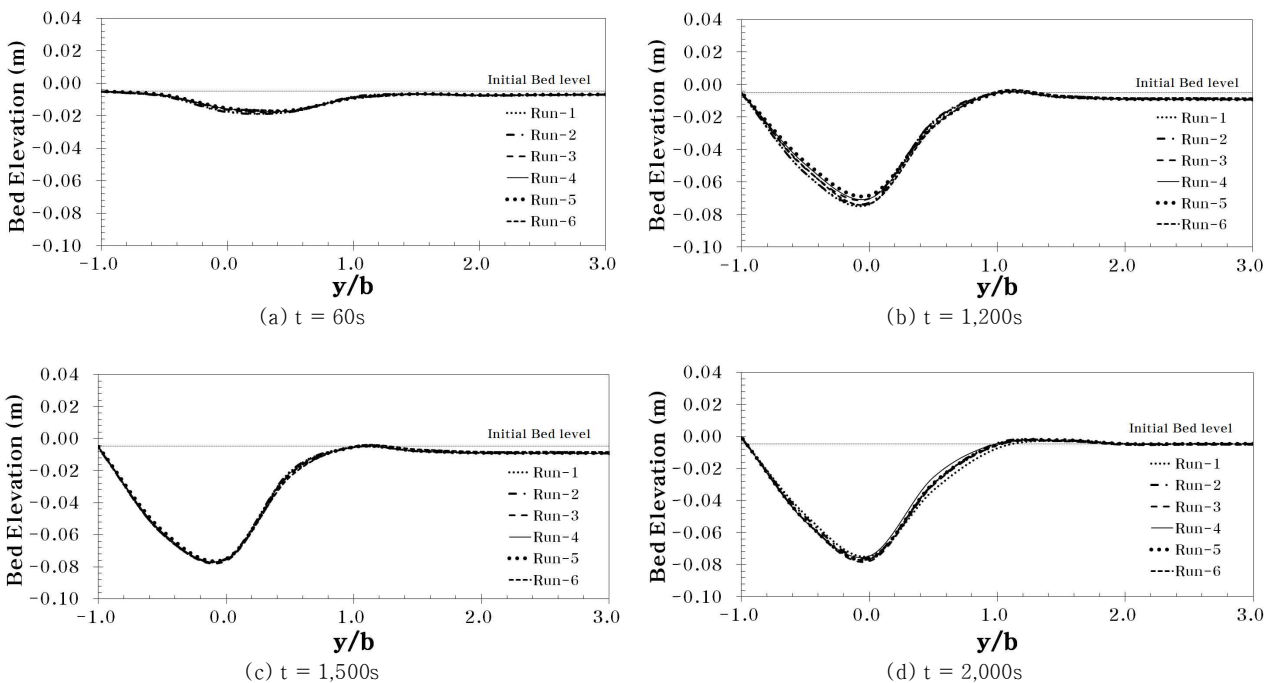


Fig. 9. Changes of cross-section ($x/b = -0.04$)

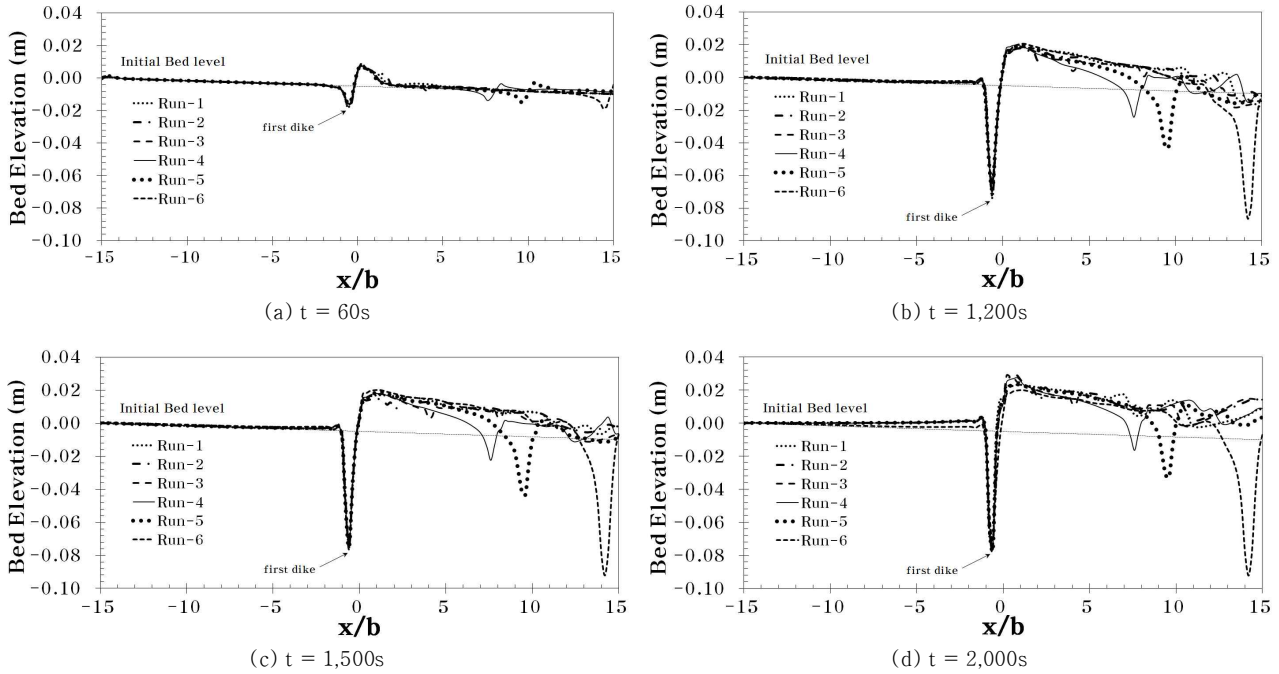


Fig. 10. Longitudinal changes of bed at $y/b=0$

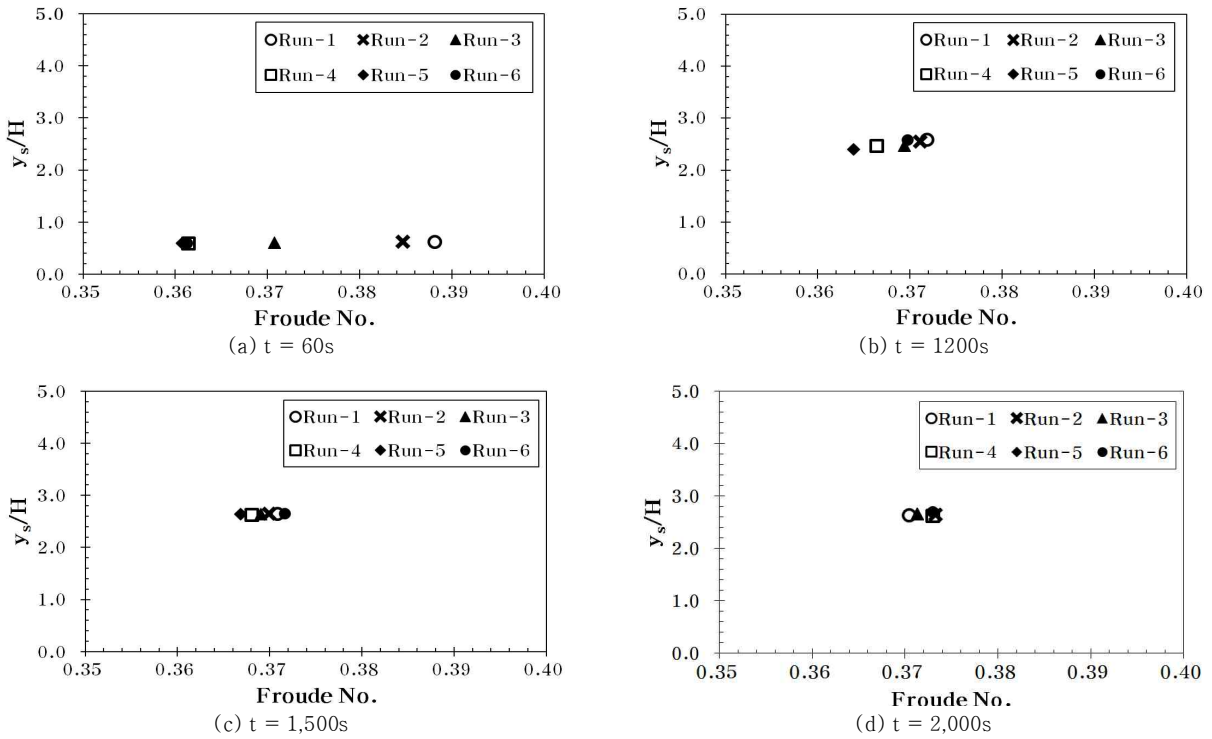


Fig. 11. y_s/H curve

-0.073 m까지 발달하였다. Runs-2와 3에서 하류에 위치한 2 번째 수제에서는 각각 0.021 m, 0.018 m 퇴적이 되는 것으로 나타났다. 또한 Run-4, 5, 6에서 세굴공은 각각 -0.015 m,

-0.035 m, -0.082 m까지 발달하였다. 따라서, 무차원 수제간 격 조건이 4 이하인 경우에는 최상류단 수제의 영향을 받아 하상이 상승하고, 4 이상일수록 수제의 영향을 받지 않고 세굴

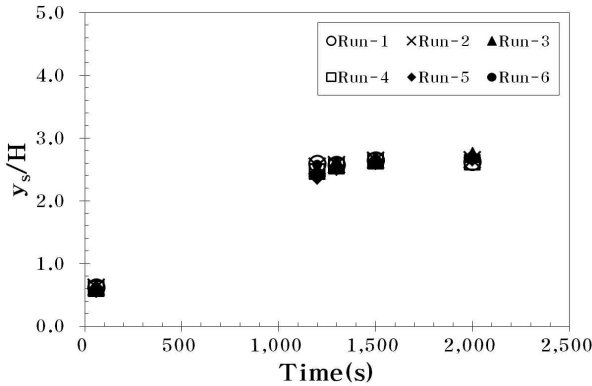


Fig. 12. Variation of y_s/H with time

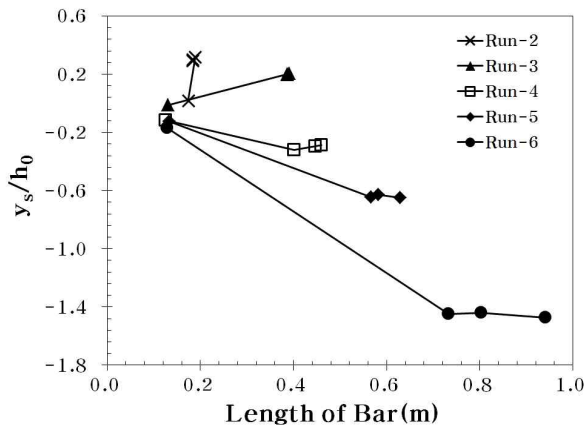


Fig. 13. Change of y_s/h_0 with bar length

공이 발달하는 것으로 나타났다.

4.4 무차원 세굴심의 변화

수제에 의한 하상 세굴은 하상과 하안의 안정성에 큰 영향을 미치므로 이를 예측하는 것은 중요하다. 수제 설계요소에 따른 하상변동 특성을 분석하기 위하여 단일수제와 연속수제 간격 조건 변화에 따른 최대세굴심 (y_s)과 수심 (h_0)의 비인 무차원 세굴심 (y_s/H)을 분석하였다(Figs. 11 and 12). 초기 상태($t = 60$ 초)에서 y_s/H 은 0.59~0.62이며, F_r 는 0.36~0.39으로 나타났다. 무차원 수제 간격(L/b)이 작을수록 y_s/H 은 증가하지만 그 차이는 작았다(Fig. 14(a)). Fig. 14(b)는 $t = 1,200$ 초 일 때 F_r 와 y_s/H 의 변화를 보여주고 있다. y_s/H 는 2.39~2.59이며, F_r 는 0.35~0.37로 나타났다. L/b 이 작을수록 y_s/H 는 증가하였다. 동적평형상태($t = 1,500$ 초)에 도달 했을 때, y_s/H 는 2.63~2.64이고, F_r 는 0.36~0.37로 y_s/H 는 거의 비슷하게 나타났다(Fig. 11(c)). $t = 2,000$ 초 일 때는 y_s/H 가 2.62~2.65로 동적평형상태에 도

달한 이후 y_s/H 의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. F_r 는 0.37로 시간이 지날수록 L/b 에 따른 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 L/b 이 작을수록 y_s/H 와 F_r 는 증가하며, 시간이 증가할수록 y_s/H 는 점차 증가하였다. 또한 동적평형 상태를 유지하면서 F_r 는 0.36~0.37을 유지하였다.

Fig. 13은 최상류단 수제에서 발달된 사주와 무차원 평균세굴심(y_s/h_0)의 변화를 보여주고 있다. h_0 는 평균수심(m)이다. Run-2에서 하상고는 상승하였다. y_s/h_0 는 0.016~0.317이었으며, 하류에 위치한 2번째 수제의 간섭을 받아 사주의 발달이 억제되었다. Run-3은 Run-2와 마찬가지로 하상이 상승하고 2번째 수제의 간섭을 받아서 사주의 발달이 억제되며, L/b 에 의하여 영향을 받는다. y_s/h_0 는 -0.010~0.199이었다. Run-4부터는 L/b 이 커지면서 최상류 수제의 간섭을 받지 않는 것을 보여주고 있다. y_s/h_0 가 -0.320까지 발달하지만 동적평형상태에 도달하면서 -0.286까지 하상이 상승하고 있다. Run-5는 Run-4보다 최상류 수제로부터 간섭이 줄고 독립성이 강해지면서 y_s/h_0 가 -0.129~-0.649로 세굴심이 증가하였다. 사주는 0.63 m까지 발달하지만, 동적평형상태에 도달하면서 하상변화가 거의 없이 일정하였다. Run-6은 Run-5와 마찬가지로 사주는 0.94 m까지 발달하지만 동적평형상태에 도달하면서 y_s/h_0 는 -1.44로 일정하게 나타났다. 따라서 Run-2와 3은 하류에 위치한 2번째 수제의 영향을 받아서 퇴적이 발생하였다. 그러나 Run-4에서 세굴공은 발달하지만 동적평형상태에 도달하면서 하상이 안정화되는 특성을 보였다. 따라서, 최상류단 수제에서 발달된 사주와 무차원 평균세굴심(y_s/h_0)의 변화를 분석한 결과 무차원 수제간격(L/b)이 4 이하인 경우에 최상류단 수제의 영향과 하류단 수제의 간섭을 받아 하류에서 하상이 상승한다. 그러나 무차원 수제 간격이 10 이상인 경우에는 수제의 독립성이 강하게 나타나며, 단독 수제와 같은 특성을 보였다. 따라서, 무차원 수제간격이 4~10인 경우에는 군수제의 역할이 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 수제군이 설치 되었을 때, 수제의 설치간격과 길이변화에 따라 흐름특성과 하도의 변화 과정을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 최상류에 설치된 수제는 흐름의 영향을 직접 받으며, 단독 수제와 같은 특성이 있다. 또한 시간이 증가할수록 국부세굴은 흐름과 수제의 외측 가장자리가 만나는 지점에서 발생하며, 수제 상류로 이동한다. 하상토 퇴적은 통수초기에 수제 후면에서 발생하지만 시간이 지날수록 하류 전체에 걸쳐 나타난다.
- 2) 최상류단 수제에서 세굴공 깊이는 수제간격에 영향을 받지 않았다. 또한 최상류단 수제에서 무차원 수제 간격(b)이 클수록 세굴공 깊이는 작으나, 동적평형상태에 도달하였을 경우에 세굴공 깊이는 일정하게 유지되었다.
- 3) 하류단에 위치한 2번째 수제에서 수제의 간격이 좁은 경우에 하류의 위치한 수제의 간섭을 받아 퇴적된다. 그러나 상류단 수제의 영향을 받지 않을 만큼 충분히 떨어진 수제는 독립적인 특성을 보여주었다.
- 4) L/b 이 클수록 무차원 세굴심(y/H)은 증가하지만, L/b 이 10이상인 경우에는 독립성이 강해지면서 하류에 위치한 수제는 단독 수제와 같은 특성을 보였다. 그러나 L/b 이 4이하인 경우에는 상류단 수제의 영향과 하류에 설치된 수제의 간섭을 받아 하류에서 퇴적이 발생하였다. 따라서, 무차원 수제 간격이 4~10인 경우에 군수제의 역할이 감소되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)과 2015년 한국교통대학교 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- Ashida, K., and Michiue, M. (1972). "Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams." *Transactions, Japan Society of Civil Engineering*, JSCE, No. 206, pp. 59-64.
- Copeland, R.R. (1983). "Bank Protection Techniques Using Spur Dikes." Miscellaneous paper HL83-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Choi, S.U., and Oh, D.W. (2004). "Finite Element Modeling of Shallow Water Equations for Numerical Simulation of Flows near Spur-Dike" *Advances in Hydro-Science and Engineering*, Vol. 6, pp. 1-9.
- Engelund, F. (1974). "Flow and Bed Topography in Channel Bend." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.
- Francis, J.R., Pattanick, A., and Wearne, S. (1968). "Observations of flow patterns around some simplified groyne structures in channels." Technical Note No. 8, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, London, England, pp. 829-846.
- Fenwick, G.B. (1969). "State of Knowledge of Channel Stabilization in Major Alluvial River." Report No. FHWA/RD-83/099, U.S. Department of Transportation, Washington D.C.
- Holtz, K.P. (1991). "Numerical simulation of recirculating flow at groynes." *Computer Methods in Water Resources*, No. 2, Vol. 2, pp. 463-477.
- Kang, J.G., Yeo, H.K., and Kim, S.J. (2005). "An Experimental Study on Tip Velocity and Downstream Recirculation Zone of Single Groyne Conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 143-153.
- Kang, J.G., Kim, S.J., and Yeo, H.K. (2009). "An Experimental Study on Flow Characteristic Around Inclined Crest Groyne." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 715-724.
- Molls, T., Chaudhry, M. H., and Khan, K.W. (1955). "Numerical simulation of two-dimensional flow near a spur-dike." *Advances in Water Resources*, Vol. 18, No. 4, pp. 227-236.
- Michiue, M., and Hinokidani, O. (1992). "Calculation of 2-dimensional bed evolution around spur-dike." *Proceedings of Hydraulic Engineering*, Vol. 36, pp. 61-66.
- Mayerle, R., Wang, S.S.Y., and Toro, F.M. (1995). "Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 33 No. 2, pp. 243-256.
- Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T., and Muramoto, Y. (2005). "Tree-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Hydraulic Structures." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 12, pp. 1074-1087.
- Ouillon, S., and Dartus, D. (1997). "Three-Dimensional Computation of Flow around Groyne." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 11, pp. 962-970.
- Rajaratnam, M.N., and Nwachukwu, B.A. (1983). "Flow near groin-like structure." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 463-480.
- Richardson, E.V., and Simons, D.B. (1974). "Spurs and guide banks." Open File Report, Colorado State University Engineering Research Center, Fort Collins, Colo.
- Shields, F.D.Jr., Knight, S.S., and Cooper, C.M. (2000). "Warm-water Stream Bank Protection and Fish Habitat: A Comparative Study." *Environmental Management*, Vol. 26, No. 3, pp. 317-328.
- Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). "2-D Depth-Averaged Flow Computation near Groyne." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 71-86.
- Watanabe, A., Fukuoka, S., Yasutake, Y., and Kawaguchi, H. (2001). "Method for Arranging Vegetation Griens at Bends for Control of Bed Variation." *Collection of Papers on*

River Engineering, Vol. 7, pp. 285-290.

Yeo, H.K., Kang, J.G., Kim, S.J., and Yoon, B.M. (2006)
“Experimental Study on Bed Change Around Upward

Vertical Groyne with Installed Spacing.” *Journal of Korean
Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 271-278.