

주기적인 하폭 변화 수로에서 사주의 거동에 관한 수치실험

Numerical Experiments of the Behavior of Bars in the Channels with Periodic Variable Width

장 창 래*

Jang, Chang-Lae

Abstract

This study examines the processes and the behaviour characteristics of forcing bars in channels with periodic variable width in the alternate and braided regimes by using a two dimensional numerical model. The wavelength and the migration speed decrease as the amplitude of variable width increases. The forcing effects of the width variation on the alternate bars is stronger than those on the braided bars. The bar migration speed increases as the dimensionless amplitude in the braided regime is 0.25. However, the migration speed is abruptly decreased as the amplitude in it was larger than 0.25. The bar migration speed increases in the alternates bar regime as the dimensionless wavelength increases. However, the migration speed decreases around 1 of the wavelength. As the bar wavelength and the variable width wavelength coincide, the bars don't migrate downstream by the strong forcing effects on the bars due to the suppression by the width variation.

Keywords : morphological changes, periodic width variation, numerical model, free bars, forced bars

요 지

본 연구에서는 하폭의 주기적인 변화에 의하여 교호사주와 복렬사주가 발생하는 수리학적 조건에서 주기적인 하폭변화에 의한 강제사주의 형성과정과 거동 특성을 2차원 수치모형을 이용하여 파악하였다. 하폭변화의 진폭이 크면, 사주의 파장은 짧아지고, 사주의 이동성은 크게 감소하였다. 교호사주가 발생할 수 있는 영역에서는 하폭의 변화에 대하여 강제효과가 크게 작용하며, 복렬사주가 발생할 영역에서는 하폭의 변화에 의한 강제효과가 상대적으로 작은 특성을 보여주었다. 복렬사주가 발달한 조건에서는 하도변화의 진폭 대 평균하폭의 비인 무차원 진폭이 0.25로 증가할 때 사주의 이동속도는 증가하지만, 이보다 크면 사주의 이동속도가 급격하게 감소하였다. 교호사주가 발생하는 조건에서는 사주의 파장 대 하폭 변화의 파장 비인 무차원 사주의 파장이 증가할수록 사주의 이동속도가 증가하지만, 무차원 사주의 파장이 1에 가까운 경우에 사주의 이동속도가 급격하게 감소하였다. 즉, 사주의 파장과 하폭의 파장이 일치할 때, 하폭변화에 의한 강제효과가 강하게 작용하여 사주가 압박되기 때문이다.

핵심용어 : 지형변동, 주기적인 하폭변화, 수치모형, 자유사주, 강제사주

* 한국교통대학교 토목공학과 부교수 (e-mail: cljang@ut.ac.kr, Tel: 043-841-5183)
Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

1. 서 론

하천에서 지형학적 형상 거동은 흐름과 이동상 하상의 불안정성의 결과로서, 하천에서 자발적으로 발달한 자유사주(free bars)와 하도의 사행, 하폭의 변화 등 물리적인 제약에 의하여 발달한 강제사주(forced bars)의 상호작용에 의하여 지배된다. 자유사주와 강제사주는 사주의 발생과 지형학적 특성에 의하여 구별된다(Seminara and Tubino, 1989). 자유사주는 난류의 흐름과 하상의 고유한 불안정성에 의하여 발생하며, 직선 하도에서는 하상에서 교란이 지속되어 흐름의 방향으로 이동하는 교호사주(alternate bars)가 자발적으로 발달하게 된다. 자유사주는 여울과 웅덩이가 번갈아가며 연속적으로 있는 특징이 있다. 특히, 자유사주 중에서 교호사주의 파장은 하폭의 6~8배 정도이고, 사주의 파고는 수심의 1~2배 정도이다(Whiting and Dietrich, 1993; Garcia and Nino, 1993; Lanzoni, 2000). 교호사주가 완전히 발달하면, 하류로 이동하는 동안에 그 형상이 유지된다. 강제사주는 하도의 만곡 혹은 하폭의 변화 등과 같이 공간적으로 불균형한 하도의 형상에 의하여 발생한 강제효과(forcing effect)의 영향을 받아 형성된 하상형상이며, 흐름의 방향으로 이동하는 교호사주와는 다르게, 이동하지 않은 상태로 안정한 형상을 유지한다(Seminara and Tubino, 1989). 하도의 만곡부에서 발달한 하상과의 전형적인 예는 사행하천의 만곡부 내측에서 발달한 고정사주(point bars)가 있다. 또한 하폭의 변화에 의한 강제효과에 의하여 하폭이 넓은 하도의 중앙에서 발달한 중앙사주(central bar)와 측벽에 발달한 측벽사주(side bars)가 있다(Bittner, 1994; Repetto and Tubino, 2001; Wu and Yeh, 2005).

하폭의 변화는 하안침식, 사주의 발달과 하천의 만곡과 관련이 있으며, 망상하천(braided channel)에서는 새로운 하도가 생성되는 하도망의 분기(bifurcation)가 발생하는 역학적인 메커니즘을 해석하는 데 중요하다(Fig. 1). 이와 같이, 하폭의 변화가 하도의 지형변화에 중요한 영향을 미치고 있음에도 불구하고, 하도의 지형변화를 연구함에 있어서 이에 대한 연구가 부족한 실정이다(Bittner, 1994; Repetto and Tubino, 1999; Wu and Yeh, 2005). Bittner (1994)는 실험적 이론적으로 선구적인 연구를 수행하였으며, 하폭이 주기적으로 변하는 하도에서 사주의 거동과 하도의 평면변화를 분석하였다.

Repetto et al. (2002)은 이론적으로 선형 해석을 수행하고, 2차원 및 3차원 수치모형을 이용하여, 주기적인 하



Fig. 1. Sediments Bars in the Channel with Periodic Variable Width (Jang, 2013): Arrows Indicate the Locations of Flow Concentration

폭의 변화에 의한 하도의 지형변화 형성과정을 파악하였다. 특히, 2차원 수치모형은 유선이 굽어질 때 발생하는 이차류의 영향을 고려하지 않았으며, 3차원 수치모형에 의하여 이러한 한계를 극복하였다. Wu and Yeh (2005)는 교호사주가 발달할 수 있는 수리학적 조건에서 2차원 수치모형을 개발하여 3차원 문제를 해결하지 않고 국부적으로 유선이 굽어지면서 발생하는 2차류 흐름의 특성을 고려하여 하도의 평면변화 특성을 분석하였다. 또한 Wu et al. (2011)은 하폭변화의 파수가 사주의 거동과 하도의 평면변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 자유사주에 영향을 미치는 하폭변화의 진폭과 파수의 관계를 제시하였다. 그러나 앞에서 언급한 연구는 교호사주가 발달하는 영역에서 연구가 수행되었으며, 교호사주와 복렬사주의 형상이 하폭 변화에 의한 강제효과에 의하여 사주의 변화와 거동을 정량적으로 파악하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 하폭의 변화에 의하여 유선이 굽어질 때 발생하는 2차류를 고려한 2차원 수치모형을 이용하여, 교호사주와 복렬사주가 발생하는 각각의 수리학적 조건에서 주기적인 하폭변화에 의하여 강제사주의 형성과정과 거동 특성을 파악하였다. 본 논문은 실내실험 결과(Bittner, 1994)에 대한 2차원 수치모의 적용성 검토 결과를 보여주고, 수치실험에 의한 교호사주와 복렬사주의 지형변동 특성을 파악하며, 각각의 수리학적 조건에 대한 사주의 형상과 거동 특성을 분석하여 그 결과를 제시하였다.

2. 수치모형의 특징

본 연구에서는 사행하천에서 평면 2차원 흐름 거동을 모의하기 위하여 흐름의 지배 방정식은 수심 적분된 2차

원 연속 방정식 및 운동량 방정식을 이용하였다. 직교 좌표계에서는 하천의 경계가 복잡한 하천을 모의하는데 한계가 있으므로(Jang and Shimizu, 2005), 이들 식을 일반 좌표계에서 좌표변환을 하여 표시하면 다음과 같다.

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

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

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

여기서, ξ 및 η 는 일반 좌표계에서 공간 좌표 성분, H 는 수위($=h+z_b$)이고, h 는 수심이며, z_b 는 기준면에서 측정 한 하상고이다. C_d 는 하상의 마찰계수이며($=\frac{gn}{h^{1/3}}$), g 는 중력가속도이고, n 은 Manning의 조도계수이며, Kishi and Kuroki (1973)이 제안한 식($=\frac{d^{1/6}}{8.9\sqrt{g}}$)을 이용하였다. 여기서 d 는 하상토의 평균입경이다. J 는 Jacobian 이며, u^ξ 및 u^η 는 ξ 및 η 방향에서 유속의 성분으로, $u^\xi = \xi_x u + \xi_y v$ 및 $u^\eta = \eta_x u + \eta_y v$ 로 정의된다. 계수 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 는 다음과 같이 주어진다.

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

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

Eqs. (2) and (3)에서 운동량방정식에서 확산항 D^ξ 와 D^η 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

여기서, κ 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, λ 는 하상재료의 공극률, q_b^ξ 및 q_b^η 는 ξ 및 η 방향에서 단위 폭당 소류사량이다. 하상에서 소류사량은 Meyer-Peter and Muller (1972)의 공식으로 계산하였다.

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

여기서, q_b 는 소류사량, s 는 수중에서 하상재료의 상대 밀도, g 는 중력가속도, d 는 하상토의 평균입경, τ_{*c} 는 무차원 한계 소류력, τ_* 는 무차원 소류력이다.

하천에서 주 흐름 방향에 대한 횡단 방향으로의 소류사 이동률을 계산하기 위하여, 원심력에 의한 이차류 및 횡방향 경사를 고려하였다.

ξ 및 η 방향에서 유사량은 Watanabe et al. (2001)이 제시한 방법을 사용하였으며, 다음과 같이 계산된다.

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

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

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

유선 방향으로의 하상부근에서 유속은 다음과 같이 가

정한다.

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

여기서, V 는 수심 평균 유속이다.

β 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 ϕ 는 속도계수(= V/u_*), κ 는 von Karman 상수 (=0.4)이다.

유선이 굽어질 때, 원심력의 변화에 의해 이차류가 발생하며, 유선에 수직방향의 하상부근의 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)에 의한 제시된 7.0을 사용하였으며, 이는 만곡부에서 횡방향 경사가 완만한 상태에서 얻은 것으로서, 횡방향 경사가 급한 경우에 중력 효과가 고려되어야 한다.

Eq. (13)에서 유선의 곡률은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{V^3} \left[u^2 \left(\xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) + uv \left(\xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) - uv \left(\xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) - v^2 \left(\xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \right] \quad (14)$$

여기서, $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 이다.

수치해석 기법으로는 엇갈린 격자(staggered grid) 상에서 이류항에는 Cubic Interpolated Pseudoparticle 법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계 조건으로서 상류단에 유량을 부여하고 하류단에 등류수심을 부여하였다. 측벽에서는 측벽에 수직으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

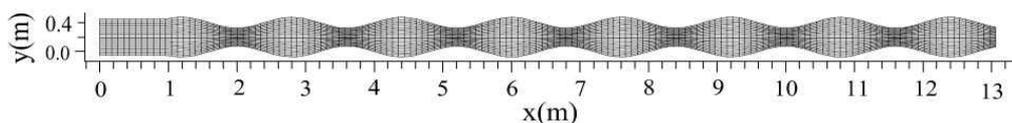


Fig. 3. Computational Grid

3. 수치모형의 검증

본 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여 Bittner (1994)의 주기적인 하폭변화에 의한 하도의 변화 실험 C1-11의 실험자료를 사용하였다. Fig. 4와 같이 주기성을 갖는 사인곡선(sine-generated curve) (Langbein and Leopold, 1966)의 하폭 변화 수로는 다음 식을 이용하여 만들었다.

$$B(x) = B_0 \pm A_m \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (15)$$

여기서, $B(x)$ 는 거리 x 에서 하폭, B_0 는 평균 하폭, L 은 변화하는 하폭의 파장을 나타낸다.

실내 실험은 하상경사 $S_0 = 0.004$ 인 수로에서 수행되었으며, 평균 하폭 $B_0 = 0.4\text{m}$ 이고, 측벽의 진폭 $A_m = 0.075\text{m}$ 이며, 파장 $L = 1.6\text{m}$ 이다. 실험을 위하여 총 8개의 파장을 포함하는 길이 14m, 폭 0.9m의 수로에 설치하였으며, 실험이 진행되는 동안 지형자료와 수위는 중앙에 설치된 4개의 파장에서 측정하였다. 유량 Q 는 2.92 l/s 이며, 초기의 등류수심 $h_0 = 2.2\text{ cm}$ 이었다. 하상은 평균 입경 $D_m = 0.53\text{ mm}$ 인 균일사로 이루어져 있다. 실험의 지속시간은 평형하상이 되도록 6~8시간 동안 지속되었다.

수치모형을 검증하기 위하여, 계산 조건은 실험 조건과 같은 조건을 사용하였다. 계산 영역은 총 7개의 파장을 포함하여 수행하였으며, 유입구에서 1m 구간을 직선하도록 설치하여 흐름이 일정하게 유지되도록 하였으며, 수치모의를 수행하는 유입구에서 발생하는 오차를 최소화 하고, 하상이 평형상태에 도달하는데 용이하도록 하였다 (Defina, 2003).

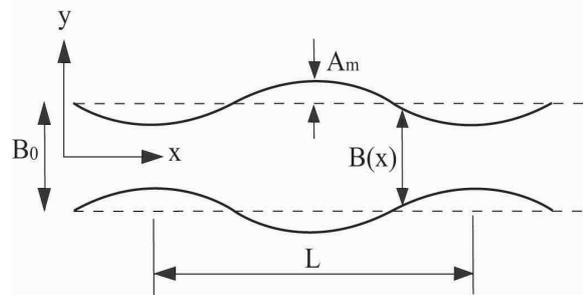


Fig. 2. Sketch of Channel Geometry

계산을 수행하기 위한 격자는 흐름방향으로 150개와 흐름의 수직방향으로 20개를 사용하였으며(Fig. 3). 계산 격자망의 흐름방향 대 흐름의 수직방향의 비는 4.26이다. 실험 및 계산은 측정구간에서 유사의 유입과 유출이 같아서 침식과 퇴적이 평형을 이루어 하상 변동이 거의 없는 동적 평형상태에 이르렀을 때, 즉 8시간 후에 종료하였다.

Fig. 4는 하폭이 주기적으로 변하는 수로에서 하도의 지형변동에 대한 실험 및 계산 결과를 보여주고 있다. 하폭이 넓은 구간에서는 좌안과 우안으로 흐름이 분산되고 유사 퇴적되어 중앙사주(central bar)가 형성되었으며, 하폭이 좁은 구간에서는 흐름이 집중되어 하상이 세굴되는 특성을 보여주고 있다. 수치모형에 의해 모의된 세굴 및 퇴적된 위치는 실내실험에 의해 측정된 값과 거의 일치하였다.

Fig. 5는 종방향 하상고의 변화에 대한 실내실험 및 계산 결과를 보여주고 있다. 하폭이 좁은 구간에서는 흐름이 집중되어 하상이 세굴되고, 하폭이 넓은 구간에서는 흐름이 하폭 전체로 분산되면서 유속이 감소되어 하상이 상승되는 특성을 보여주고 있다. 종방향 하상고의 변화는 하폭의 변화와 일치하며, 하폭의 변화와 하상고 변화의

위상은 정위상을 유지하고 있다. 하상고의 상승과 저하로 인한 진폭은 수치모형의 의하여 계산된 값과 실내실험에서 관측된 값이 잘 일치하고 있다. 그러나 하상고가 최대 상승하는 부분에서 수치모형에 의한 계산값이 실내실험에 의한 관측값보다 약간 높은 특성을 보여주고 있다. 이러한 특성은 하폭이 넓은 구간에서 흐름의 유선이 좌안과 우안으로 굽어지면서 2차류가 발생하여 종방향으로 유속이 감소하고 횡방향으로 유사를 이송하여 하상고가 상승하는 특성을 수치모형이 모의할 때, 실험값보다 약간 과대하게 평가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 하폭이 넓은 부분과 하폭이 좁은 부분에서 횡방향 하상고의 변화를 보여주고 있다. 하폭이 넓은 부분에서 하도의 중앙에서는 하상이 세굴되고, 좌안과 우안에서 하상고가 상승하고 있다 (Fig. 6(a)). 이것은 하폭이 넓어지면서 흐름이 좌안과 우안으로 분리되며, 유사가 하도의 좌안과 우안에 퇴적되고 측벽에서 사주(side bars)가 형성되기 때문으로 판단된다. 하폭이 좁은 구간에서 실험 결과는 하도의 좌안과 우안보다 중앙에서 하상고가 높은 특성을 보여주고 있으나, 수치모의 결과는 하도의 양안보다 하도의 중앙에서 하상고가 낮은 특성을 보여주

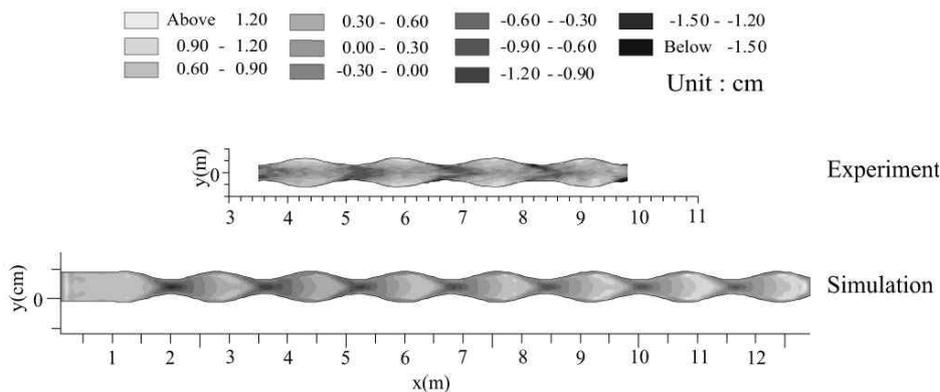


Fig. 4. Morphological Changes for Run C1-11: (a) Laboratory Experiments (Bittner, 1994); (b) Numerical Result (this study)

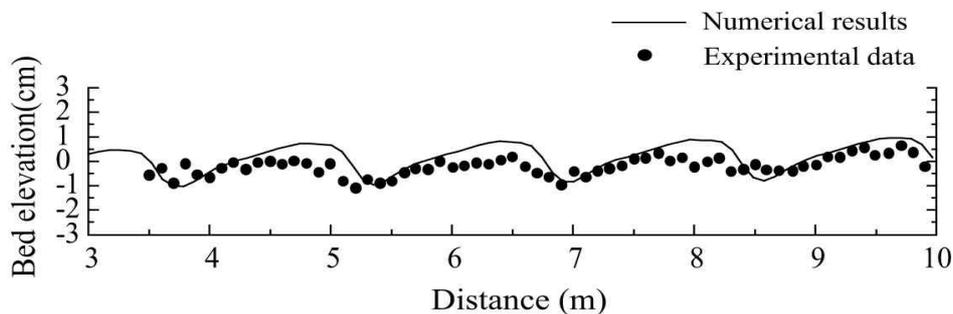
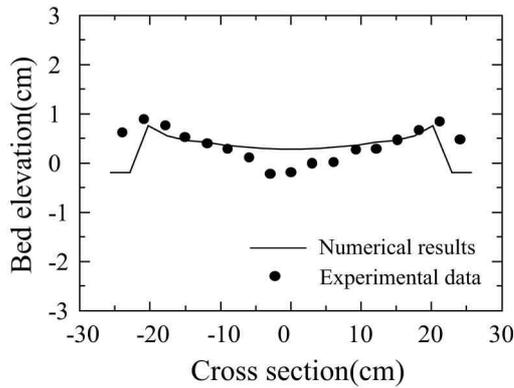
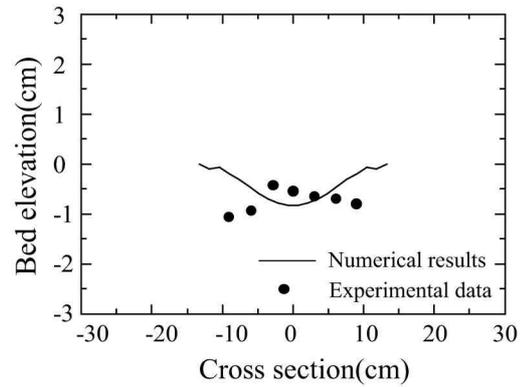


Fig. 5. Longitudinal Bed Profile for Numerical and Experimental Results



(a) Wide section



(b) Narrow section

Fig. 6. Cross Sectional Bed Profile: (a) Wide Section; (b) Narrow Section

고 있다 (Fig. 6(b)). 이러한 원인은 수치모형이 수심적분된 2차원 흐름 특성을 모의하고 있으므로, 하폭이 좁은 구간에서 발생하는 3차원 흐름 특성을 모의하는데 한계가 있기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 대체적으로 주기적인 하폭 변화 수로에서 하도의 변화 과정을 상대적으로 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

4. 수치실험 결과

유사의 이동에 영향을 주는 무차원 소류력과 하폭 대 수심의 비에 의하여 하도에서 교호사주(alternate bar)나 복렬사주(multiple bar)가 발달하여, 다양한 하도의 평면변화가 발생한다(Parker, 1976; Fredsoe, 1978; Kuroki and Kishi, 1984). 본 연구에서는 주기적인 하폭변화에 의한 사주의 거동과 하도의 평면변화 특성을 파악하기 위하여 Kuroki and Kishi (1984)가 제안한 하도의 영역 구분에 의하여, 사주가 발생되지 않은 조건(R-1), 교호사주가 발달할 수 있는 수리학적 조건(R-2), 교호사주와 복렬사주가 공존하여 발생할 조건(R-3), 복렬사주가 발달할 수 있는 수리학적 조건(R-4)을 만족하도록 적용하였다(Fig. 7). 하상도의 평균입경의 크기는 하도의 평면변화를 일으킬 수 있는 수리학적 조건에서 유사가 이동할 수 있는 무차원 한계 소류력(τ_*)을 만족시킬 수 있도록 0.53 mm로 설정하였다. 수치실험에서 주기적인 하폭의 변화는 하폭의 파장과 진폭에 의하여 결정되며, 각각의 조건은 Table 1에 나타나 있다. 여기서, 하폭의 변화에 대한 사주의 거동에 영향을 주는 무차원 하폭의 진폭(A_{mw})과 무차원 파수(λ)는 다음과 같이 정의 된다.

$$A_{mw} = \frac{A_m}{B_o} \quad (16)$$

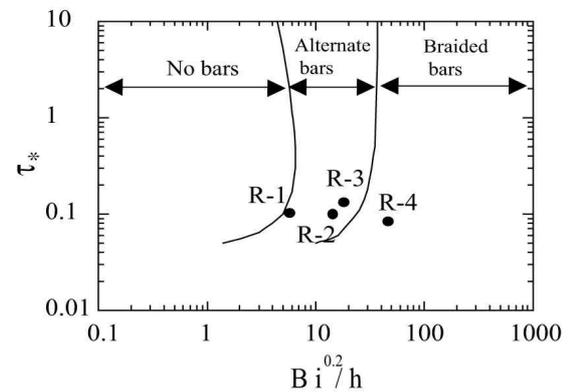


Fig. 7. Numerical Conditions in the Alternate and Braided Bar Regime Diagram (Kuroki and Kishi, 1984)

$$\lambda = \frac{2\pi L}{B_o} \quad (17)$$

4.1 하도의 지형변동 특성

Fig. 8은 사주가 거의 발생하지 않는 수리학적 조건에서 하폭의 진폭 변화에 의한 사주가 발달하는 과정을 보여주고 있다. R-1-1은 진폭이 작은 조건에서 사주가 거의 발생하지 않고 있다. R-1-2와 R-1-3에서 보여주고 있는 것처럼, 하폭변화의 진폭이 증가할수록 하폭의 변화에 적합하게 사주가 발달하고 있다. 흐름이 집중되는 구간에서는 하상이 깊게 세굴 되고 있으나, 하폭이 넓은 구간에서는 하상고가 상승하며, 중앙사주(central bar)가 발달하고 있다. 특히, R-1-3에서 보여주고 있는 것처럼, 하폭변화의 진폭이 크면, 하폭이 좁은 구간에서 흐름이 집중되어 하상이 세굴 되고, 하폭이 넓은 구간에서는 유속이 감소되어 하상이 상승한다. 사주의 파장은 하폭의 파장과 일

Table 1. Hydraulic Conditions for Numerical Experiments

Run	So	Q (m ³ /s)	Bo (m)	L (m)	Am (m)	A _{mw}	λ
R-1-1	1/250	0.00292	0.4	1.6	0.01875	0.047	1.57
R-1-2	1/250	0.00292	0.4	1.6	0.03750	0.094	1.57
R-1-3	1/250	0.00292	0.4	1.6	0.075	0.1875	1.57
R-2-1	1/167	0.00257	0.6	1.6	0.00000	0.000	2.35
R-2-2	1/167	0.00257	0.6	1.6	0.01875	0.03125	2.35
R-2-3	1/167	0.00257	0.6	1.6	0.0375	0.0625	2.35
R-3-1	1/167	0.007	1.0	2.5	0.01875	0.01875	7.85
R-3-2	1/167	0.007	1.0	2.5	0.0375	0.0375	7.85
R-3-3	1/167	0.007	1.0	2.5	0.075	0.075	7.85
R-3-4	1/167	0.007	1.0	2.5	0.13	0.13	7.85
R-4-1	1/200	0.008	2.0	5.0	0.1	0.05	7.85
R-4-2	1/200	0.008	2.0	5.0	0.3	0.15	7.85
R-4-3	1/200	0.008	2.0	5.0	0.5	0.25	7.85
R-4-4	1/200	0.008	2.0	5.0	0.6	0.30	7.85

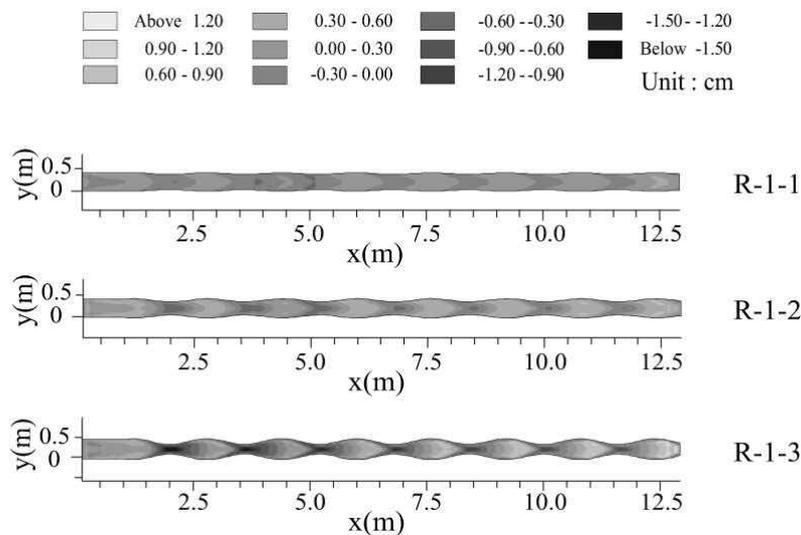


Fig. 8. Numerical Results for R-1 (Calculation time is 180 minutes)

치하며, 사주의 형상과 하폭 변화의 위상은 정위상을 형성하고 있다.

Fig. 9는 교호사주와 복렬사주가 공존하는 수리학적 조건에서 하폭의 진폭 변화에 의하여 사주가 발달하는 과정을 보여주고 있다. R-3-1과 R-3-2는 하폭의 진폭이 상대적으로 작은 조건에서 교호사주가 발달하였으며, 교호사주가 하류로 이동하고 있다.

R-3-3과 R-3-4의 결과에서 보여주고 있는 것처럼, 진폭이 크면, 교호사주의 특성은 감소하고 중앙사주의 특성

을 보이면서, 사주의 파장은 주기적인 하폭 변화의 파장에 적합하도록 짧아지고 있다. 또한 사주의 이동성은 크게 감소한다. 특히, R-3-4는 교호사주에 대한 하폭의 위상차는 정위상을 유지한다. 이와 같이 자유사주와 강제사주가 서로 공존할 때, 자유사주와 강제사주의 상호간섭이 발생하여 세굴이 가속되며, 사주의 이동이 정지되면서 고정사주가 발달한다(Tubino and Seminara, 1990). 따라서 진폭이 증가할수록 교호사주의 형상은 강제효과에 의하여 사주의 형상이 변하며, 사주의 파장은 하폭의 진폭 변

화에 적합하도록 감소하는 특성을 보여주고 있다.

Fig. 10은 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 크며, 복렬 사주가 발달할 수 있는 수리학적 조건에서 하폭의 진폭 변화에 의한 사주의 발달하는 과정을 보여주고 있다. R-4-1과 같이 무차원 하폭의 진폭이 0.05인 작은 조건에서는 2열 복렬사주가 발달하였으며, 그 형상을 잘 유지하면

서, 흐름의 방향으로 이동하고 있다. Run-4-2와 Run-4-3과 같이 무차원 하폭의 진폭이 0.15~0.25인 조건에서는 복렬사주의 형상은 강제효과에 의하여 그 하상이 변하고 있다. 하폭이 넓은 구간에서는 흐름이 하도의 중앙에 집중되어 하상이 저하되고 하도의 양안에서는 사주가 발달하는 특성을 보여주고 있다. 하폭이 좁은 구간에서는

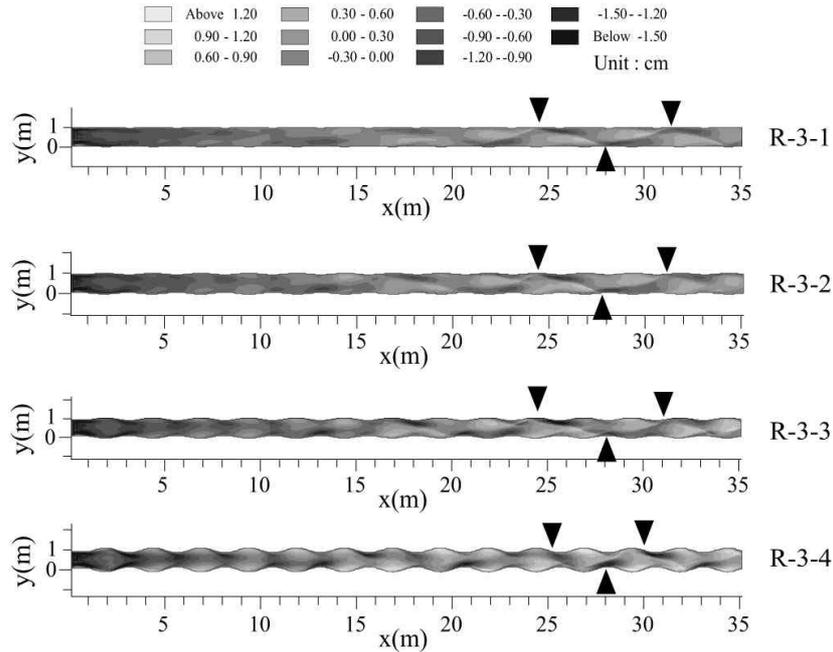


Fig. 9. Numerical Results for R-3 (Calculation time is 180 minutes) ▲ Indicates the Front of Alternate Bars

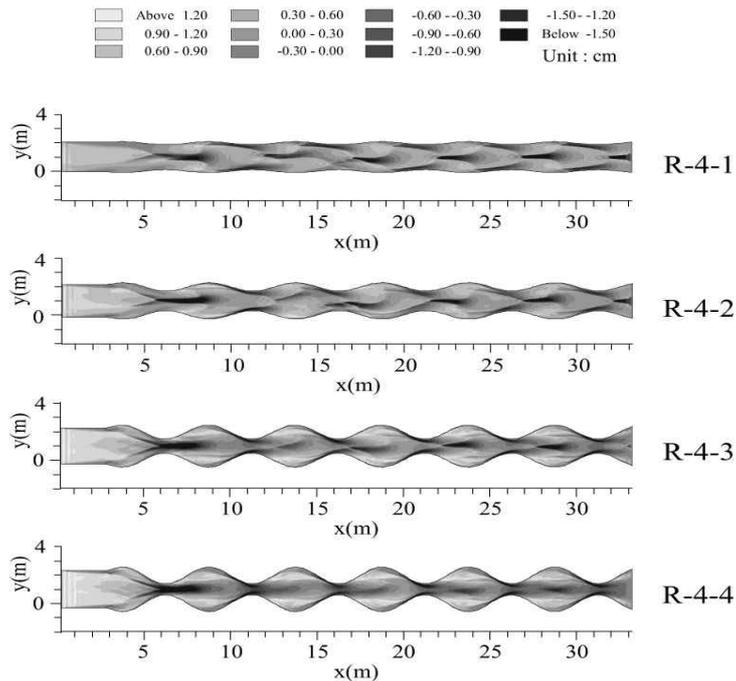


Fig. 10. Numerical results for R-4 (Calculation time is 180 minutes)

흐름의 집중이 하도의 양안에 이루어지며, 중앙사주가 발달하고 있다. 하폭이 좁은 구간에서 흐름이 집중되는 것은 하폭이 넓은 구간에서 사주의 분열을 일으켜서 사주의 수를 증가시키는 역할을 하며, 망상하천에서 하도망의 분기(bifurcation)를 발생시키고, 사주의 이동을 촉진시키는 역할을 한다(Repetto et al., 2002). 그러나 R-4-4와 같이 무차원 하폭의 진폭이 크면 하폭의 변화에 의한 강제효과가 강하게 작용하여 사주의 이동이 정지된다. 하폭이 넓은 구간에서 하도의 좌안과 우안에서 측벽사주(side bars)가 형성되고, 하도의 중앙에서는 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴 된다. 사주의 파장은 하폭의 파장과 일치한다.

4.2 사주의 형상과 거동 특성

Fig. 11은 하폭 대 수심의 비에 대한 하도의 무차원 진폭과 사주의 이동 특성을 보여주고 있다. 하폭 대 수심의 비(β_0)는 사주의 형태를 구별하는 중요한 인자이며, 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_0 = \frac{B_0}{h_0} \quad (18)$$

여기서, h_0 은 등류수심이다. 하폭 대 수심의 비가 50 이상이 되면 복렬사주가 형성되며, 100 이상이 되면, 완전한 복렬사주가 된다(Crosato and Mosselman, 2009). 하폭 대 수심의 비가 17.4인 R-1은 무차원 진폭의 변화가 작은 구간에서도 사주의 이동이 없으며, 하폭 대 수심의 비가 40인 R-2에서는 무차원 진폭이 0.15 정도에서 사주의 이동이 정지되었다. 하폭 대 수심의 비가 133인 R-4에서는 무차원 진폭이 0.3 정도에서 사주의 이동이 정지되는 특성을 보여주었다.

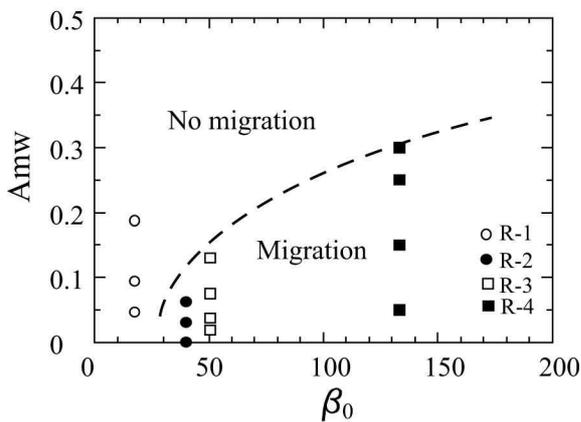


Fig. 11. Plot of the Dimensionless Width Amplitude Versus the Width to Depth Ratio

하폭 대 수심의 비가 작으면, 무차원 진폭의 변화가 작은 구간에서 사주가 이동할 수 없으나, 하폭 대 수심의 비가 크면 무차원 진폭의 변화가 상대적으로 큰 구간에서도 이동할 수 있는 특성을 보여 주었다. 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 작으면, 하폭 대 수심의 비가 작고 교호사주가 발생할 수 있는 영역에서는 하폭의 변화에 대하여 강제효과가 크게 작용하며, 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 크고 복렬사주가 발생할 영역에서는 하폭의 변화에 의한 강제효과가 상대적으로 작은 특성을 보여주고 있다. Wu and Yeh (2005)는 하폭 대 수심의 비가 변하면, 사주에 작용하는 강제효과가 다르게 작용하여 사주의 형상이 다양한 형태로 형성되는 것을 제시하였으며, 본 연구에서도 이러한 특성이 교호사주와 복렬사주의 조건에서 나타나는 것으로 보여주고 있다.

Fig. 12는 무차원 하폭의 진폭 변화에 대한 사주의 이동속도 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 무차원 진폭이 증가함에 따라, 사주의 이동속도가 감소하는 특성을 보여주고 있다. 이러한 원인은 하폭의 진폭이 증가하면 사주의 거동에 압박을 주는 강제효과가 증가하기 때문이다(Repetto et al., 2002; Wu and Yeh, 2005). 그러나 하폭 대 파장의 비인 무차원 파수(λ)가 7.85이고, 상대적으로 하폭이 크고 복렬사주가 발달한 R-4에서는 무차원 진폭이 0.25로 증가할 때 사주의 이동속도는 증가하지만, 이보다 크면 사주의 이동속도가 급격하게 감소하는 특성을 보여주고 있다. 하폭 변화의 진폭이 증가하면서 사주가 이동할 수 있는 유효 하폭이 감소하고, 사주와 측벽사이의 공진효과에 의하여 사주의 이동이 촉진되어 사주의 이동속도가 증가하지만, 이러한 한계상태를 초과하면 하폭 변화에 의한 강한 강제효과가 발생하여 사주의 이동이 정지된다(Repetto, et al., 2002). 그러나 상대적으로 하폭이 작

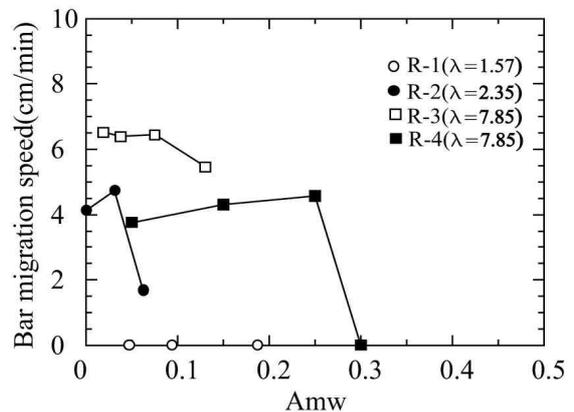


Fig. 12. Plot of the Bar Migration Speed Versus the Dimensionless Width Amplitude

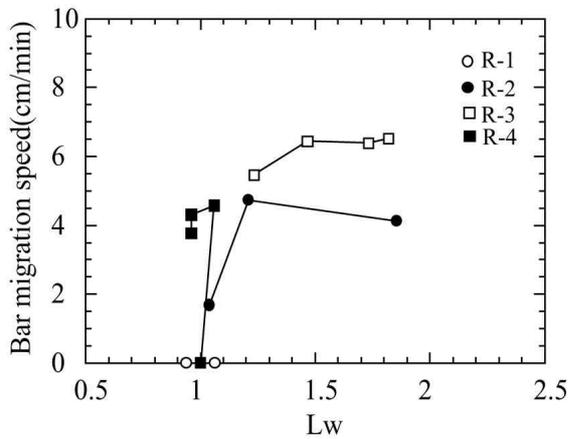


Fig. 13. Plot of the Dimensionless Bar Wavelength Versus Bar Migration Speed

고 교호사주가 발생하는 영역인 R-2와 R-3에서는 무차원 진폭이 증가하면 강제효과가 크게 작용하여 사주의 이동속도가 지속적으로 감소하는 특성을 보여주고 있다.

Fig. 13은 무차원 사주의 파장(L_w)에 대한 사주의 이동 특성을 보여주고 있으며, 무차원 사주의 파장은 다음과 같이 정의된다.

$$L_w = \frac{L_b}{L} \quad (19)$$

여기서, L_b 는 사주의 파장이다.

상대적으로 하폭이 좁고 교호사주가 발생하는 R-2와 R-3에서는 무차원 사주의 파장이 증가할수록 사주의 이동속도가 증가하지만, 무차원 사주의 파장이 1 부근에서는 사주의 이동속도가 급격하게 감소하고 있다. 이것은 사주의 파장과 하폭의 파장이 일치할 때, 사주의 이동 속도가 감소하며, 하폭의 변화에 의한 강한 강제효과에 의하여 사주가 압박되어 사주의 거동이 정지되기 때문으로 판단된다. 그러나 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 큰 복렬사주가 발달한 R-4에서는 R-2와 R-3과 다르게 무차원 사주의 파장에 대한 영향이 크지 않지만, 무차원 사주의 파장이 1에서 사주의 이동이 정지되었다. 하폭 대 수심의 비가 클수록 무차원 사주의 파장에 대한 사주의 거동에 대한 영향이 상대적으로 적지만, 무차원 사주의 파장이 1일 때는 사주의 강제효과가 큰 특성을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 하폭의 주기적인 변화에 의하여 교호사주와 복렬사주가 발생하는 각각의 수리학적 조건에서 주

기적인 하폭변화에 의하여 강제사주의 형성과정과 거동 특성을 2차원 수치모형을 이용하여 파악하였다. 본 수치모형의 계산 결과는 Bittner (1994)의 실험 결과를 잘 재현하였다. 특히, 하폭이 넓은 구간에서 발생하는 2차류 특성을 잘 모의하여, 사주의 발달과정이 재현되었으며, 수치실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 하폭변화의 진폭이 크면, 사주의 파장은 주기적인 하폭 변화의 파장에 적합하도록 짧아지고, 사주의 이동성은 크게 감소하였다. 자유사주와 강제사주가 서로 공존할 때, 자유사주와 강제사주의 상호간섭이 발생하여 세굴이 가속되고, 사주의 이동이 정지되면서 고정사주가 발달하였으며, 사주의 파장은 하폭의 진폭 변화에 적합하도록 감소하는 특성을 보여주었다.
- 2) 하폭 대 수심의 비가 작으면, 무차원 진폭의 변화가 작은 구간에서 사주가 정지되었으나, 하폭 대 수심의 비가 크면 무차원 진폭의 변화가 상대적으로 큰 구간에서도 이동하였다. 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 작으면, 교호사주가 발생할 수 있는 영역에서는 하폭의 변화에 대하여 강제효과가 크게 작용하며, 복렬사주가 발생할 영역에서는 하폭의 변화에 의한 강제효과가 상대적으로 작은 특성을 보여주었다.
- 3) 하폭 대 파장의 비인 무차원 파수(λ)가 7.85이고, 복렬사주가 발달한 조건에서는 무차원 진폭이 0.25로 증가할 때 사주의 이동속도는 증가하지만, 이보다 크면 사주의 이동속도가 급격하게 감소하였다. 하폭 변화의 진폭이 증가하면서 사주가 이동할 수 있는 유효 하폭이 감소하고, 사주와 측벽사이에 공진효과에 의하여 사주의 이동이 촉진되어 사주의 이동속도가 증가하지만, 이러한 한계상태를 초과하면 하폭 변화에 의한 강한 강제효과가 발생하여 사주의 이동이 정지되었다.
- 4) 교호사주는 무차원 사주의 파장이 증가할수록 사주의 이동속도가 증가하지만, 무차원 사주의 파장이 1 부근에서는 사주의 이동속도가 급격하게 감소하였다. 즉, 사주의 파장과 하폭의 파장이 일치할 때, 하폭변화에 의한 강제효과가 강하게 작용하여 사주가 압박되기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- Bitter, L. (1994). *River bed response to channel width variation*. Master thesis, University of Illinois.
- Crosato, A., and Mosselman, E. (2009). "Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding." *Water Resour. Res.*, Vol. 45, W03424, doi:10.1029/2008WR007242.
- Defina, A. (2003). "Numerical experiments on bar growth." *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 4, 1092, doi:10.1029/2002WR001455.
- Engelund, F. (1974). "Flow and bed topography in channel beds." *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.
- Garcia, M., and Nino, Y. (1993). "Dynamics of sediment bars in straight and meandering channels: Experiments on the resonance phenomenon." *J. Hydraul. Res.*, Vol. 31, No. 6, pp. 739-761.
- Jang, C.-L. (2013). "Dynamic characteristics of multiple bars in the channels with erodible banks." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 25-34.
- 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.
- Kuroki, M., and Kish, T. (1984). "Regime criteria on bars and braids in alluvial straight channels." *Proc. JSCE*, Vol. 342, pp. 87-96. (in Japanese)
- Langbein, L.B., and Leopold, M. G. (1966). "River meanders and the theory of minimum variance." *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 442-H.
- Lanzoni, S. (2000). "Experiments on bar formation in a straight flume 1. Uniform sediment." *Water Resour. Res.*, Vol. 36, pp. 3337-3349, doi:10.1029/2000WR900160.
- 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.
- Parker, G. (1976). "On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers." *J. Fluid Mech.*, Vol. 76, No. 3, pp. 457-479.
- Predsoe, J. (1978). "Meandering and braiding of rivers." *J. Fluid Mech.*, Vol. 84, No. 4, pp. 609-624.
- Repetto, R., and Tubino, M. (2001). "Topographic expressions of bars in channels with variable width." *Phys. Chem. Earth, Part B*, Vol. 26, pp. 71-71.
- Repetto, R., Tubino, M., and Paola, C. (2002). "Planimetric instability of channels width variable width." *J. Fluid Mech.*, Vol. 457, pp. 79-109.
- Seminara, G., and Tubino, M. (1989). *Alternate bars and meandering: Free, forced and mixed interactions, in River meandering*, Water Resour. Monogr. ser., Vol. 12, edited by Ikeda, S., and Parker, G., pp. 267-320, AGU, Washington, D.C.
- Tubino, M., and Seminara, G. (1990). "Free-forced interactions in developing meanders and suppression of free bars." *J. Fluid Mech.*, Vol. 214, pp. 131-159.
- Watanabe, A., Fukuoka, S., Yasutake, Y., and Kawakuchi, H. (2001). "Groin arrangements made of natural willows for reducing bed deformation in a curved channel." *Advances in River Engineering*, Vol. 7, pp. 285-290.
- Whiting, P. J., and Dietrich, W. (1993). "Experimental constraints on bar migration through bends: Implications for meander wavelength selection." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1091-1102.
- Wu, F. C., and Yeh, M. G. (2005). "Forced bars induced by variations of channel width: Implications for incipient bifurcation." *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, F02009, doi:10.1029/2004JF000160.
- Wu, F.C., Yeh, T.H., and Chen, Y.C. (2011). "Quantifying the forcing effect of channel width variations on free bars: Morphodynamic modeling based on characteristic dissipative Galerkin scheme." *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, F0302, doi:10.1029/2010JF00194.

논문번호: 13-069	접수: 2013.08.27
수정일자: 2013.10.29/11.14	심사완료: 2013.11.14