

사행하천에서 사주의 이동특성에 관한 수치실험

Numerical Experiments of Bar Migration in Meandering Channels

장창래* · 정관수**

Jang, Chang-Lae · Jung, Kwansue

Abstract

This study is to analyse the characteristics of bar migration, which is important roles to bank erosion and meandering development, for the meandering channels with erodible bed by using a 2-D numerical model in the generalized coordinate systems. The results of the numerical experiments showed that the features of bar migration were affected by the meandering wavelength to the width ratio, and had a relatively good agreement with the criterion for bar migration through a bend suggested by Kinoshita and Miwa (1974). The bar migrated with speed in the channel with long wavelength and broad width, and the criterion for bar migration was increased. The bar celerity was decreased abruptly near the criterion.

Keywords : numerical model, meandering channel, bar migration, wavelength, criterion for bar migration

요 지

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 사행하천에서 하안 침식과 사행의 발달을 일으키는 기본적인 요소인 사주의 이동 특성을 파악하였다. 본 2차원 수치모형에서는 직교좌표계를 변환하여 하천의 형상에 적합하도록 일반좌표계를 사용하였다. 본 연구의 수치모형을 이용하여 하천의 만곡부에서 2차원 흐름특성을 계산하고, 하상변동을 모의하여 사주의 거동을 모의하였다. 수치모의에서는 이용하여 사행수로의 사행과장 대 하폭 비가 사주의 이동특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 모의 결과를 Kinoshita와 Miwa(1974)에 의해 제시된 한계이동각과 비교한 결과, 상대적으로 잘 일치하였다. 그리고 사행하천에서 사행의 과장이 크고, 하폭이 넓을수록 사주의 이동에 대한 강제효과의 영향을 작게 받기 때문에 사주의 이동속도가 빠르고, 사주의 이동한계에 대한 사행 각도가 크며, 사주의 이동한계 사행각에 접근할 때 사주의 이동속도가 급격하게 감소되는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 수치모형, 사행하천, 사주의 이동, 사행과장, 이동한계각

1. 서 론

하천에서 중규모 하상형상을 결정하는 중요한 요인으로는 이동성이 있는 교호사주(alternate bar) 등과 같은 자유사주(free bar)와 하천의 만곡부 내측에서의 퇴적과 외측에서의 세굴 등을 발생하며, 사주의 이동이 없는 고정사주(point bar)가 있다(Seminara 등, 1989).

교호사주(alternate bar)는 주로 하천의 선상지(扇狀地) 하도구간에서 형성되는 하상형태로서, 하안(河岸)선을 따라 하상이 깊게 세굴되어 웅덩이를 형성시키고, 홍수시에 주흐름이 하안 혹은 강턱에 충돌하여 수충부를 형성시켜서 하안침식 및 호안 손실을 일으키며, 하천에서 발생하는 재해의 중요한 원인 중의 하나이다. 그런데 교호사주는 홍수유에 의해 하류로 이동하기 때문에 하안의 세굴위치와 수충부도 하류로 이동하므로, 이로 인하여 발생하는 재해의 위치도 하류로 이동하여 발생한다. 따라서 교호사주의 기본적인 특성 중에

서 사주의 이동은 하안 혹은 강턱 침식과 사행의 발달을 일으키는 기본적인 요소이고, 하천에서 취수구의 막힘 현상 등을 유발하므로, 사주의 거동을 파악하는 것은 하천 계획 및 관리에 매우 중요하다. 그림 1은 사행하천에서 교호사주를 보여주고 있다.

하천의 사행은 하폭의 10배에 이르는 과장을 가지고 있으며, 사행하천의 평면선형을 사인곡선(sign-generated curve)으로 표현될 수 있다(Langbein 등, 1966). 규칙적인 사행지형에 대하여 지금까지 완전히 설명할 수 없으나, 대부분 직선 하천에서 흐름이 불안정하여 하상 표면에 작은 불규칙 파를 일으키고, 이것이 이동상 하상에서는 작은 하상 파동을 일으켜서 하상파(sediment wave)로 발달한다. 이동상 하천에서 이들 하상파는 한쪽 하안에서 다른 쪽 하안으로 번갈아가며 3차원적 특징을 갖고 하류로 이동하며, 이에 따라 하천 종단면상에 여울과 웅덩이가 발달한다. 이들 교호사주는 하폭의 6에서 10배의 과장을 갖는다(Ikeda 등, 1981; Fujita

*정회원 · 교신저자 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원(E-mail: cjang@kowaco.or.kr)
**정회원 · 충남대학교 토목공학과 부교수(E-mail: ksjung@cnu.ac.kr)



그림 1. 사행하천에서 교호사주의 모습: 황강의 항공사진(2000.3)이며, 흐름 및 사주는 좌측 위에서부터 사행의 만곡부를 지나 위(북쪽)로 이동한다

등, 1985). 그러나 많은 하천에서 하안침식을 일으키는 시간 규모는 사주의 이동보다 훨씬 길며, 하천의 곡률 반경과 관련된 지형과 교호사주와 관련된 하상의 진폭 사이에는 상호 작용이 존재한다.

이동성이 있는 교호사주와 같은 자유사주(free bar)와 하천의 사행 등에 의해 이동성이 없는 고정사주(point bar)에 대하여 다양한 실험과 이론으로 그 발생한계 및 형성특성에 관하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 자유사주와 고정사주의 상호 작용에 관한 선구적인 연구로, Kinoshita 등(1974)은 사주가 zigzag로 굽어진 사행하천의 만곡부를 통과하여 이동하는 것을 실내실험을 통하여 보여주었으며, 이동과 정지를 나누는 한계굴절각을 사행과장의 함수로 설명하였다. Blondeaux 등(1985)은 이론적인 연구를 통하여 수로의 사행 주파수가 있는 특성값에 대하여 자유사주와 고정사주가 공진적으로 발달하는 공진현상(resonance)을 처음으로 제시하였으며, Parker 등(1989)이 보다 더 정교하게 개념을 정립하였다. Shimizu(1991)는 Kinoshita 등(1974)의 수행한 실험하천에서 사행의 거동에 관하여 수치모형을 이용하여 설명하였다. 그러나 이들 연구는 정곡부가 날카로운 zigzag 사행을 갖는 사행수로에서 실험하여 얻은 결과이므로, 실제 자연현상에서 존재한 정곡부가 완만한 사행수로와는 차이가 있다. Whiting 등(1993)은 Kinoshita 등(1974)의 연구를 토대로 사인곡선으로 재현된 사행하천에서 사행의 곡률반경, 과장, 그리고 하폭 대 수심의 비가 사행의 이동에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였으나, 사주가 이동한계에 접근할 때 사주의 이동속도가 감소되는 현상에 대한 정량적인 연구가 필요하다. Jang 등(2005)은 하천에서 식생에 의해 영향을 받는 하안의 강도에 따른 사주의 거동 특성을 수치모형을 이용하여 파악하였으며, 식생의 번성에 의해 하안이 안정화 될수록 사주의 이동속도가 빠르고, 사주의 과장이 짧아지는 것을 설명하였으나, 직선하천에서 수행되었으며, 사행하천에서 연구가 필요하다.

본 연구에서는 하상변동을 예측할 수 있는 2차원 수치모형을 개발하였다. 본 모형의 특징으로는 직교좌표계를 변환하여 하천의 형상에 적합하도록 일반좌표계를 사용하였으며, 하천의 만곡부에서 2차원 흐름특성을 계산하고, 하상변동을 모의하여 사주의 거동을 모의하였다. 본 수치모형은

Hasegawa(1984)의 실내실험을 통하여 적용성을 검토하였다. 또한 사인곡선으로 형성된 사행수로에서 사행과장과 하폭 대 수심의 비가 사주의 이동특성에 미치는 영향과 사주의 이동 및 정지의 한계조건에서 사주의 거동특성을 검토하고, 특히 사주의 이동한계 사행각에 접근할 때 그 특성을 파악하였다.

2. 수치모형

본 연구에서는 사행하천에서 평면 2차원 흐름 거동을 모의하기 위하여 흐름의 지배 방정식은 수심 적분된 2차원 연속 방정식 및 운동량 방정식을 이용하였다. 직교 좌표계에서는 하천의 경계가 복잡한 하천을 모의하는데 한계가 있으므로(Jang 등, 2005), 이들 식을 일반 좌표계에서 좌표변환을 하여 표시하면 다음과 같으며, 그림 2는 좌표계의 정의도를 보여주고 있다.

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

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

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

여기서, ξ 및 η 는 일반 좌표계에서 공간 좌표 성분, H 는 수위(= $h+z_b$)이고, η 는 수심이며, z_b 는 기준면에서 측정한 하상 고이다. C_d 는 하상의 마찰계수이며(= $gn/h^{1/3}$), g 는 중력가속도

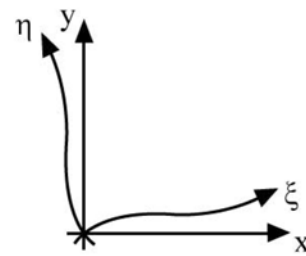


그림 2. 직교좌표계(x-y)와 일반좌표계(ξ-η)의 정의도

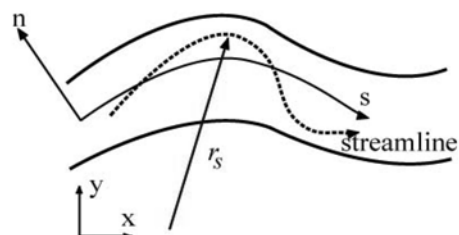


그림 3. 유선과 곡률반경(r_s)의 개념도

이고, n 은 Manning의 조도계수이며, Kishi 등(1973)이 제안한 식($=d^{1/6}/8.9\sqrt{g}$)을 이용하였다. 여기서 d 는 하상토의 평균입경이다. J 는 Jacobian 이며, u^ξ 및 u^η 는 ξ 및 η 방향에서 유속의 성분이며, $u^\xi = \xi_x u + \xi_y v$ 및 $u^\eta = \eta_x u + \eta_y v$ 로 정의된다. 계수 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 는 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

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

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

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

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 및 η 방향에서 단위 폭당 소류수량이다. 하상에서 소류수량은 Ashida 등 (1972)의 공식으로 계산하였다.

$$\frac{q_b}{\sqrt{s g d_m^3}} = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_* c}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_* c}{u_*} \right) \quad (8)$$

여기서 q_b 는 소류수량, s 는 수중에서 하상재료의 상대 밀도, g 는 중력가속도, d_m 는 각 입경별 소류사의 지름, τ_* 는 무차원 한계 소류력, u_* 는 한계 마찰속도이다.

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

ξ 및 η 방향에서 유수량은 Watanabe 등(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, $\gamma = \frac{\tau_* c}{\mu_s \mu_k \tau_*}$, μ_s 는

Coulomb의 정적 마찰계수(=1.0), μ_k 는 Coulomb의 동적 마찰계수(=0.45)이다.

유선 방향으로의 하상부근에서 유속은 다음과 같이 가정한다.

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

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.

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

여기서 γ_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 중력효과가 고려되어야 한다.

식 (13)에서 유선의 곡률은 다음과 같다(그림 3).

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

여기서 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 이다.

수치해석 기법으로는 엇갈린 격자(staggerd grid) 상에서 이류형에는 CIP(Cubic Interpolated Pseudoparticle)법을 적용하였으며, 확산항에는 중앙차분법을 적용하였다. 경계조건으로는 상류와 하류의 흐름조건을 같게 하는 주기경계조건(Periodic boundary conditions)을 사용하였다. 측벽에서는 측벽에 직각으로 유속이 없는 것으로 가정하였으며, 흐름 방향으로는 활동(slip) 조건으로 가정하였다.

3. 수치모형의 검증

본 수치모형의 적용성을 검토하기 위하여 Hasegawa(1984)의 사행수로 실험 ME-2의 조건하에서 모형을 적용하였다. 그림 4와 같이 주기성을 갖는 사인곡선(sine-generated curve)(Langbein and Leopold, 1966)의 사행수로는 다음 식을 이용하여 만들었다.

$$\theta = w \sin(2\pi s/L) \quad (15)$$

여기서 θ 는 측과의 편각, w 는 θ 의 최대각, L 은 사행의 길이, s 는 사행수로 중심곡선을 따라 계산된 거리이다. 또한 그림 4에서 λ 는 사행의 파장(wavelength)을 나타낸다.

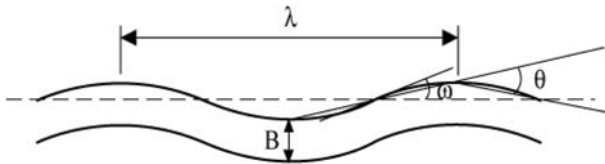


그림 4. 사인곡선으로 재현된 사행수로에 대한 모식도

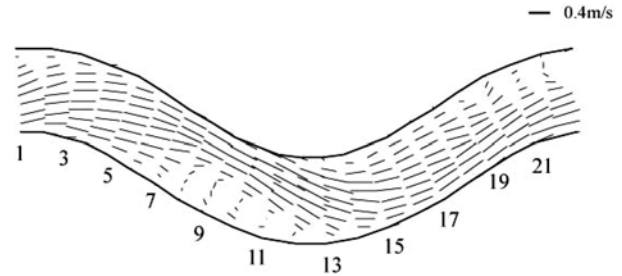


그림 7. 수치모형에 의해 계산된 유속분포

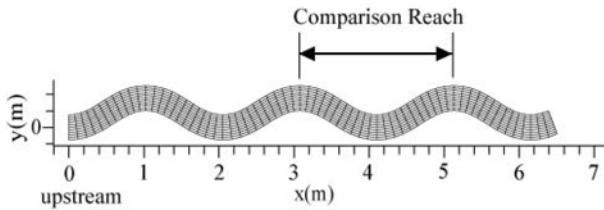


그림 5. 실험 및 계산에 사용된 사행수로의 모식도 및 계산 격자

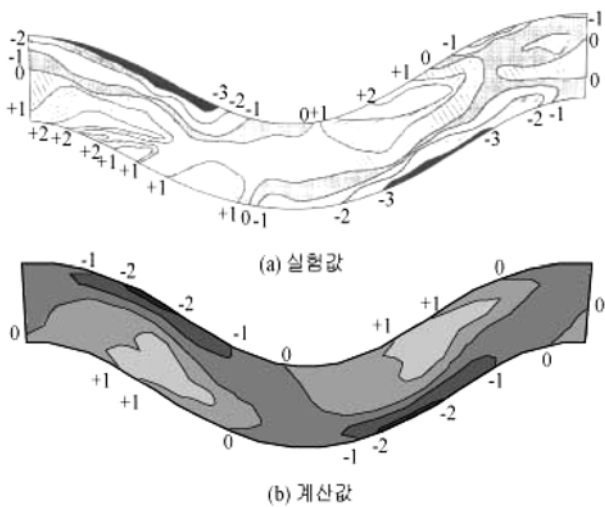


그림 6. 하상변동에 대하여 (a)실험(Hasegawa, 1984)과 (b)수치모형의 결과 비교: 등고선의 단위는 cm 이다.

실내 실험은 하상경사가 1/300인 수로에서 수행되었으며, 사행수로의 초기조건으로서 $\theta_{max}=30^\circ$ 이며, 초기수심은 2.58 cm로 유지되었고, 사행 길이는 220 cm, 하폭 B 는 30 cm, 유량 Q 는 1.87 l/s, 하상재료는 평균 입경 $D_m=0.43$ mm인 균일사이다. 실험 중에 수로의 상류에서 국부세굴을 방지하고 평형상태를 유지하기 위하여 수로의 하류에서 일정한 시간 간격으로 회수한 유사(流砂)를 상류에서 균등하게 투입하였다.

수치 모의를 하기 위하여 계산 조건은 실내 실험조건과 같은 조건을 사용하였으며, 계산 격자로는 흐름방향으로 66 개와 흐름의 수직방향으로 10개를 사용하였다(그림 5). 실험 및 계산은 측정구간에서 유사의 유입과 유출이 같아서 침식과 퇴적이 평형을 이루어 하상 변동이 거의 없는 동적 평형 상태에 이르렀을 때, 즉 240분 후 종료하였다.

그림 6은 사행수로에서 하상변동에 대한 실험 및 계산 결과를 보여주고 있다. 하상변동은 초기 평탄하상에서 변동을 의미한다. 하상변동을 보면 만곡부의 하류부에서 흐름의 방향이 변하게 되어 하상이 세굴 되었으며, 반대쪽에서는 하상이 상승하였다. 이때 세굴이 발생하는 지점은 만곡부의 하류로 사행과장의 약 25%정도 위상(位相)차이가 발생한다. 수치모형에 의해 계산된 세굴 및 퇴적된 위치는 실험에 의해

측정된 값과 거의 일치하였으나, 최심 세굴 및 퇴적된 하상고는 약 1 cm 정도로 과소평가 되었다. 이는 만곡부에서 유선에 수직으로 발생한 2차류 및 수로의 측벽에 부딪쳐 발생하는 복잡한 3차원적 흐름 특성을 수치모형이 정확하게 모의하지 못하기 때문으로 생각되며, 향후에 보다 더 정교한 3차원 모형의 개발이 필요하다.

그림 7은 계산된 유속분포를 보여주고 있으며, 만곡부보다는 하류로 이동된 외측부에서 유속이 빠른 수찰부가 나타나는 것을 보여주고 있으며, 이와 반대로 7~13지점의 내측에서 흐름의 박리(剝離, detachment)현상에 의해 와(vortex)가 발생하였다. 이 지점은 고정사주(point bar)의 전면(前面)에 해당되며, 퇴적이 발생하게 된다. 이러한 박리현상은 두 하천이 만나는 합류부나 수체의 하류부에서도 발생하게 되며, 유선의 방향이 바뀌어 흐름이 뒤틀리는 현상으로 사수역을 형성하게 된다(Shimizu, 1991). 이러한 사수역의 형성은 하천에서 유효 통수단면적의 감소 및 토사의 퇴적을 유발하는 등 하천관리에 여러 가지 문제점을 내포하고 있다.

4. 수치모형의 적용

수치 실험은, 그림 8에서 보여준 것처럼, 수로의 길이가 5.1 m이고, 하상경사가 0.01인 수로에서 하상이 평균 입경 $D_m=0.8$ mm의 균일사로 이루어진 사행곡선으로 재현된 사행수로에서 수행되었으며, 사용된 계산격자는 흐름방향으로 80 개와 흐름에 직각방향으로 10개를 사용하였다. 수치실험에서 수로의 단면은 직사각형 형상을 갖고 있으며, 하폭의 크기는 각각의 수리조건에 따라 결정되며(표 1), 그 결과는 다음과 같다.

사행의 과장 대 하폭의 비가 10인 경우(R-1), 그림 9(a)에서 보여준 것처럼, 사주의 과장이 사행의 약 1/2에 해당하며, 사주가 하류로 이동한다. 또한 그림 9(a)에서 약 720 sec에는 하상재료가 사행의 만곡부 외측에서 쌓이고 내측에서 세굴 되어, 사주와 사행의 위상(phase)이 반대로 위치하는 역위상(out of phase)을 갖고 있으나, 그 사주의 형상은 사행의 만곡부 외측에서 세굴 되고 만곡부 내측에서 퇴적되

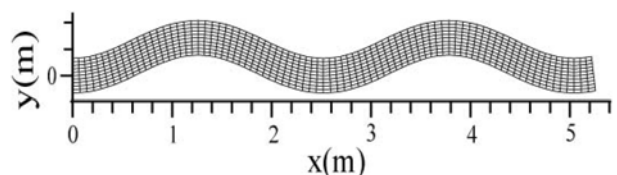


그림 8. 수치실험을 위해 사용된 사행수로의 계산 격자망

표 1. 수치실험조건

실험	하폭 B(m)	사행과장 λ(m)	사행각 α(deg)	유량 Q(l/s)	수심 D(m)	Froude Number $(\frac{v}{\sqrt{gD}})$	B/D	λ/B	무차원 소류력 (τ)	사주의 이동성
R-1-1	0.26	2.6	10.0	1.00	0.01	1.23	26	10.0	0.075	이동
R-1-2	0.26	2.6	12.5	1.00	0.01	1.23	26	10.0	0.075	이동
R-1-3	0.26	2.6	15.0	1.00	0.01	1.23	26	10.0	0.075	이동
R-1-4	0.26	2.6	20.0	1.00	0.01	1.23	26	10.0	0.075	정지
R-2-1	0.26	3.12	10.0	1.00	0.01	1.23	26	12.0	0.075	이동
R-2-2	0.26	3.12	12.5	1.00	0.01	1.23	26	12.0	0.075	이동
R-2-3	0.26	3.12	15.0	1.00	0.01	1.23	26	12.0	0.075	이동
R-2-4	0.26	3.12	20.0	1.00	0.01	1.23	26	12.0	0.075	정지
R-3-1	0.708	3.12	10.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	이동
R-3-2	0.708	3.12	15.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	이동
R-3-3	0.708	3.12	20.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	이동
R-3-4	0.708	3.12	25.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	이동
R-3-5	0.708	3.12	30.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	이동
R-3-6	0.708	3.12	40.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	정지
R-3-7	0.708	3.12	50.0	2.72	0.01	1.23	71	4.4	0.075	정지

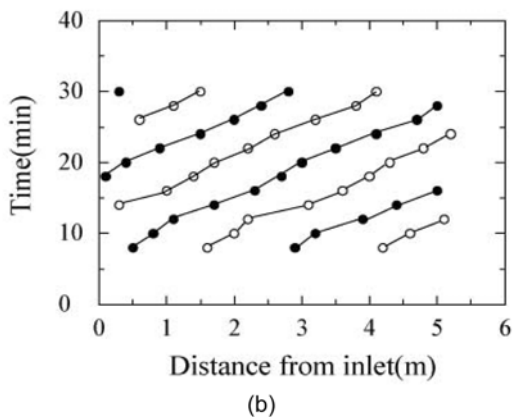
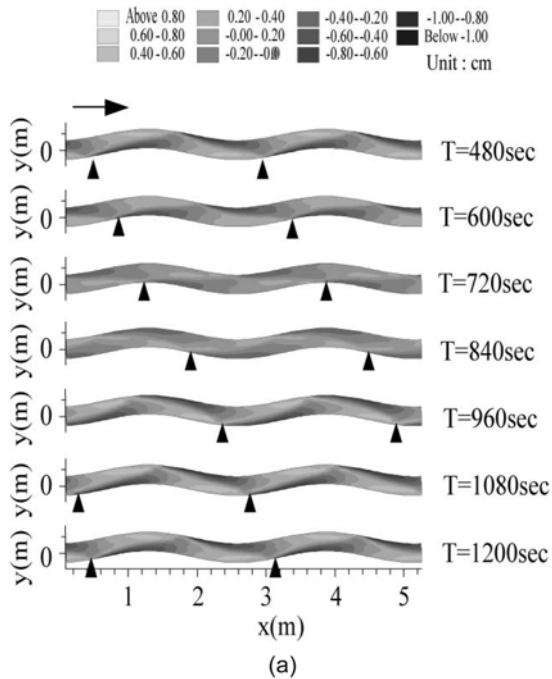


그림 9. R-1의 조건(α=10°인 경우)에서 (a) 사주의 이동과 (b) 이동 추세선 : 검정색 원은 좌안에서 사주의 위치이며, 흰색 원은 우안에서 사주의 위치이다.

는 정위상(in phase)일 경우보다 덜 분명하였다. 또한, 그림 9(b)에서 보여주는 것처럼, 역위상을 형성하는 구간에서는 사주의 이동이 느린 것을 보여주고 있으며, 이 구간을 통과하여 정위상 상태가 되었을 때는 이동이 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Kinoshita와 Miwa(1974)의 실내실험, Shimizu(1991)의 수치실험, 그리고 Whiting 등(1993)의 실험에서도 확인되었다.

사주의 파고(bar height)는 사주의 이동에 의해 사주의 사행수로의 위상에 따라 일정하지 않으나, 사주의 파장은 수로의 사행과 일치하게 1.4 m로 거의 일정하게 유지되었다. 사주는 사행각도가 10°, 12.5°, 15°일 경우에도 이동을 하였으나, 평균 이동속도는 각각 0.18 m/min, 0.16 m/min, 0.08 m/min이며, 사행각도의 증가에 따라 감소하였다. 그림 10(a)와 (b)에서 보여준 것처럼 사주는 사행각도가 20°가 되었을 경우에는 사주의 이동이 거의 없었다.

사행의 파장이 긴 경우, 즉 사행의 파장 대 하폭의 비가 12인 경우(R-2)에도 사주가 하류로 이동한다. R-1과 마찬가지로 사주의 거동은 거의 비슷하였으며, 사행 각도가 10°, 12.5°, 15°일 경우에 평균 이동속도는 각각 0.23 m/min, 0.2 m/min, 0.09 m/min로 이동하였으나, 사행 각도가 20° 일 경우에는 사주의 이동이 거의 멈추었다(그림 11과 13). R-1의 수치실험의 결과와 마찬가지로 R-2의 결과에서 보여주듯이 사행의 각도가 점점 커질수록 사주의 이동속도가 감소한다. 이는 사행 하천에서 사행의 각도가 클수록 강한 강제효과(forcing effect)에 의해 사주의 이동이 정지된 것으로 판단된다. 여기서 사주와 하천의 하안 혹은 강터 사이에서 발생하는 강제효과의 물리적 의미는 하천의 사행 혹은 하폭의 불규칙한 변화에 의해 사주의 거동이 하천측벽에 의해 압박되는 현상이다(Jang 등, 2005).

하폭이 넓은 경우, 즉 사행의 파장 대 하폭의 비가 4.4인 경우(R-3)에 사주는 사행각도가 10°, 15°, 20°, 25°, 30° 인

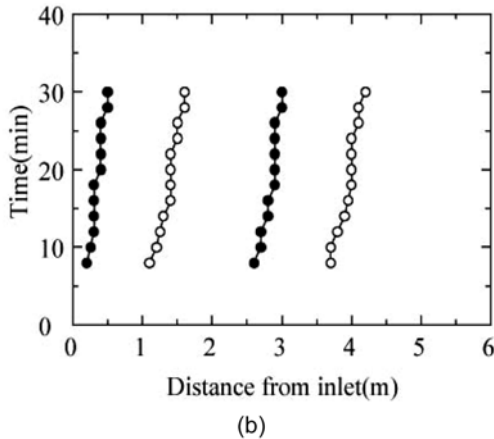
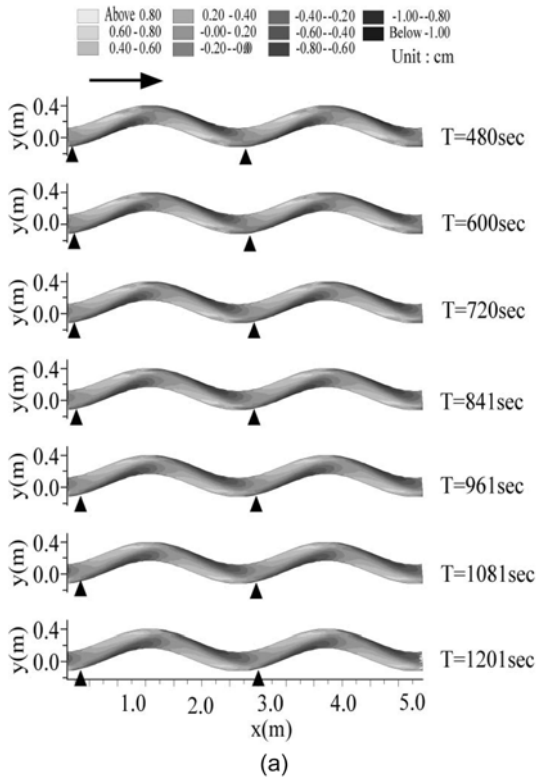


그림 10. R-1의 조건($\omega=20^\circ$ 인 경우)에서 (a) 사주의 이동과 (b) 이동 추세선: 검정색 원은 좌안에서 사주의 위치이며, 회색 원은 우안에서 사주의 위치이다.

경우에는 평균 이동속도가 0.365 m/min, 0.35 m/min, 0.33 m/min, 0.16 m/min, 0.08 m/min으로 이동하였으나, 40° 와 50° 가 되었을 경우에는 거의 멈추었다.

그림 12(a)에서는 사행각도가 20° 일 때, 계산시간이 500 sec와 1,000 sec에서 사행수로와 사주의 형상이 역위상 상태를 보여주고 있으며, 그림 11(b)에서는 사행각도가 50° 일 때, 사주의 이동이 완전히 정지된 것을 보여주고 있다. R-2와 R-3의 결과를 비교해 보면 사행의 파장은 같으나 하폭이 넓은 경우에 사주의 이동한계 사행각(θ_c)이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 하폭이 클수록 사주의 이동에 대한 강제효과가 작아지기 때문으로 판단된다.

그림 13은 각각의 수치실험에 대하여 사행각도에 따른 사주의 이동속도를 보여주고 있다. R-1과 R-2에서는 사행각도가 12.5° 보다 클 때, 사주의 이동속도가 거의 지수형태로 급격하게 감소되는 것을 볼 수 있으며, 하폭이 넓은 경우(R-3)에는 사행각도가 20° 보다 클 때, 사주의 이동속도가 급격

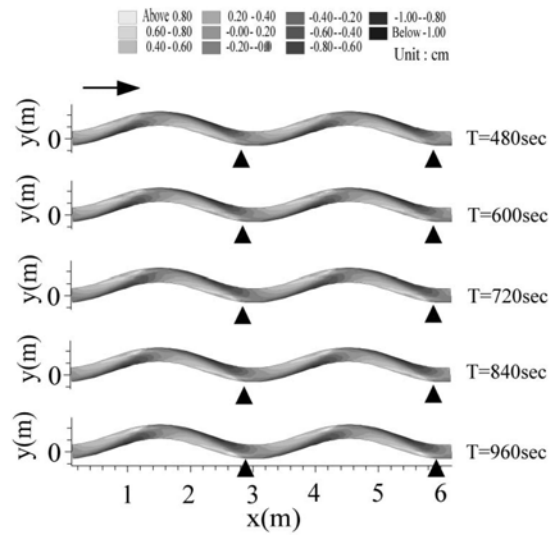


그림 11. R-2의 조건($\omega=20^\circ$ 인 경우)에서 사주의 이동

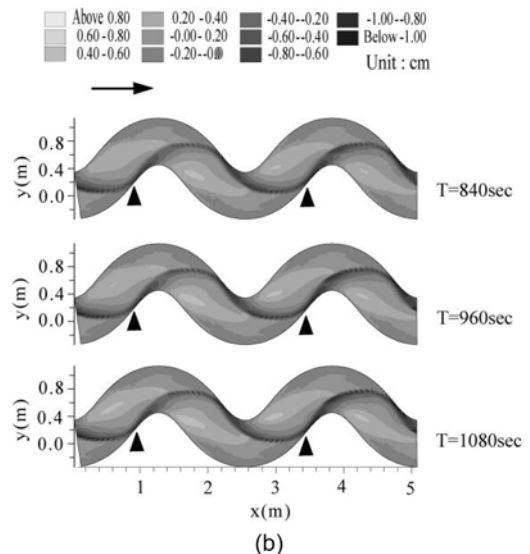
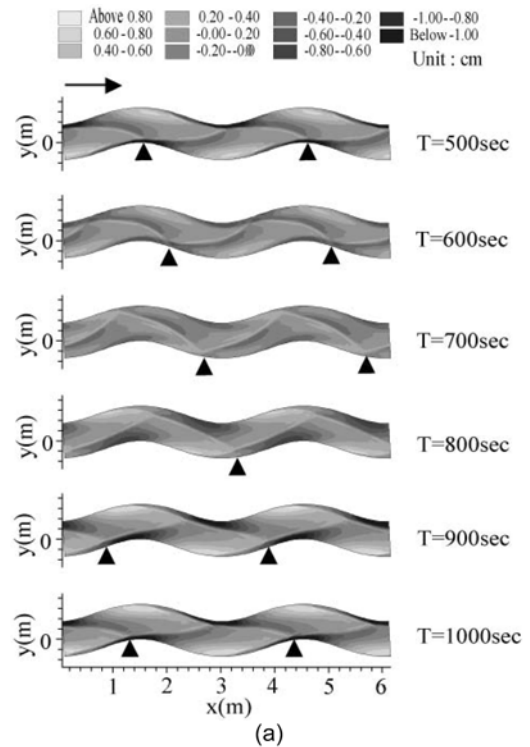


그림 12. R-3의 조건에서 (a) $\omega=20^\circ$ 와 (b) $\omega=50^\circ$ 에서 사주의 이동

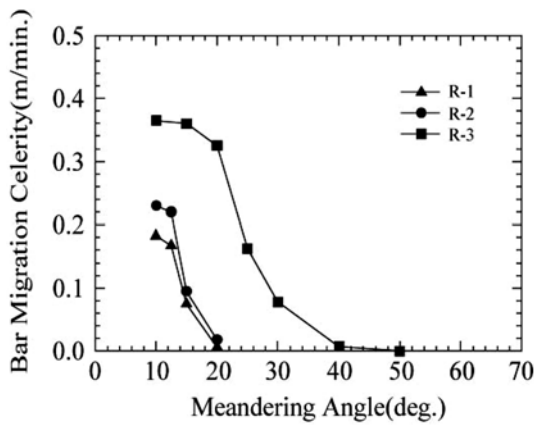


그림 13. 사행각도에 따른 사주의 이동속도

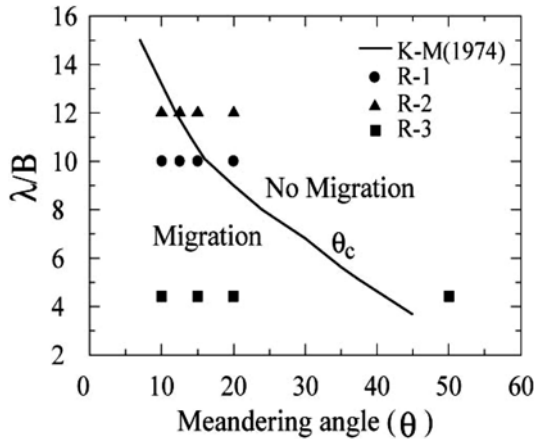


그림 14. Kinoshita와 Miwa(1974)의 이동한계각과 수치실험의 결과: 그래프에서 K-M(1974)는 Kinoshita와 Miwa(1974)를 의미한다.

하게 지수형태로 감소하는 것을 보여주고 있다. R-1과 R-2에서 사주의 평균 이동속도를 비교해 보면, 하폭이 같을 경우에는 사행의 파장이 긴 R-2에서 사행의 파장이 짧은 R-1보다 사주의 평균 이동속도가 빠른 것을 보여주고 있다. R-2와 R-3의 결과를 보면 사행의 파장이 같은 경우에 하폭이 큰 경우에는 사주의 이동속도가 큰 것을 보여주고 있다. 즉, 하폭이 넓어지면서 사주의 이동한계각도가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 사행의 파장이 길거나 하폭이 넓을수록 수로의 측벽과 사주사이에 작용하는 강제효과를 상대적으로 적게 영향 받기 때문으로 판단된다.

그림 14는 Kinoshita와 Miwa(1974)의 이동한계 사행각(θ_c)과 본 연구에서 실시한 수치실험의 결과를 보여주고 있으며, 사행의 파장 대 하폭의 비가 작고, 사행의 각도가 증가할수록 사주의 이동한계 사행각(θ_c)이 증가하며, 수치모의 결과도 상대적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 그림 13에서는 사행의 각도가 15° 일 때 R-1의 수치모의 결과로는 사주가 0.08 m/min의 평균 이동속도로 이동하고 있으며, 그림 14에서는 Kinoshita와 Miwa(1974)의 실험에서 얻은 이동한계선과 비교하여 보면 그 이동한계선을 초과하여 위치하고 있다. 이것은 사주의 이동이 없는 것을 의미하므로, 수치모의 결과와 Kinoshita와 Miwa(1974)의 결과가 약간 차이가 있다. 그 이유는 Kinoshita와 Miwa(1974)의 실험은 사행의 정곡부가 날카로운 zigzag 사행을 갖는 사행수로에서 실험하여 얻은 결과이며, 날카로운 정곡부에서는 흐름의 에너지 손실

이 크기 때문에, 수치실험에서 사용된 사행의 정곡부가 둥그런 사행하천에서 얻은 사주의 이동한계 사행각(θ_c)이 크기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 수치모형을 이용하여 하안 침식과 사행의 발달을 일으키는 기본적인 요소인 사주의 이동 특성을 파악하였다. 2차원 수치모형에서는 직교좌표계를 변환하여, 하천의 형상에 적합하도록 일반좌표계를 사용하였으며, 하천의 만곡부에서 2차원 흐름특성을 계산하고, 하상변동을 모의하여 사주의 거동을 모의하였다. 사행수로에서 사행의 파장과 하폭의 비가 사주의 이동특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서 수행한 수치실험에 의해 얻은 사주의 이동특성은 Kinoshita와 Miwa(1974)의 실내실험에서 얻은 사주의 이동한계각과 비교적 잘 일치하였다.
2. 사주의 이동 특성으로 역위상을 형성하는 구간에서는 사주의 이동이 느린 것을 보여주고 있으며, 이 구간을 통과하여 정위상 상태가 되었을 때는 이동이 빠른 것을 알 수 있다.
3. 사주의 파고는 사주의 이동에 의해 사주의 사행수로의 위상에 따라 일정하지 않으나, 사주의 파장은 수로의 사행과 일치하게 거의 일정하게 유지되었다.
4. 사주의 이동 특성으로는 사행의 파장이 길거나 하폭이 넓을수록 수로의 측벽과 사주사이에 작용하는 강제효과를 상대적으로 적게 영향 받기 때문에 사주의 이동속도가 큰 것을 보여주고 있다. 또한 사주의 이동한계각에 접근할 때 사주의 이동속도가 급격하게 감소되는 것을 알 수 있었다. 향후에는 실제하천의 흐름 특성에 적합하도록 부정류 상태에서 혼합사로 이루어진 하천에 대한 사주의 이동특성을 파악하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- Ashida, K. and Michiue, M. (1972) Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams, *Proc. JSCE*, 201, pp. 59-69(in Japanese).
- Blondeaux, P. and Seminara, G. (1985) A unified bar-bend theory of river meanders, *J. Fluid Mech.*, 157, pp. 449-470.
- Engelund, F. (1974) Flow and bed topography in channel bends, *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 100(11), pp. 1631-1648.
- Fujita, Y. and Muramoto, Y. (1985) Studies on the process of development of alternate bars, *Bull. Disaster Prev. Res. Inst.*, 35, pp. 55-86.
- Hasegawa, K. (1984) Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers. *PhD Dissertation, Hokkaido University, Sapporo, Japan* (in Japanese).
- Ikeda, S., Parker, G., and Sawai, K. (1983) Bend theory of river meanders, I, Linear theory, *J. Fluid Mech.*, 112, pp. 363-377.
- Jang, C.-L. and Shimizu, Y. (2005) "Numerical simulations of the behavior of alternate bars with different bank strengths". *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 43, No. 6, pp. 595-611.
- Kinoshita, R. and Miwa, H. (1974) River channel formation which prevents downstream translation of traverse bars. *Shin Sabo*, 94, pp. 12-17(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.
- Parker, G. and Johannesson, H. (1989) *Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels*, in *River Meandering*, Water Resour. Monogr. Ser., Vol. 12 (edited by S. Ikeda and G. Parker), pp. 379-416, AGU.
- 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 S. Ikeda and G. Parker), pp. 267-319, AGU.
- Shimizu, Y. (1991) *A study on prediction of flows and bed deformations in alluvial streams*, Research Report(N0.93), Civil engineering research institute of Hokkaido (in Japanese).
- Watanabe, A., Fukuoka, S., Yasutake, Y., and Kawaguchi, H. (2001) "Groin arrangements made of natural willows for reducing bed deformation in a curved channel". *Advances in River Engineering*, 7, pp. 285-290 (in Japanese).
- 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.

(접수일:2005.10.25/심사일:2005.11.14/심사완료일:2006.1.3)