

하안침식을 고려한 복렬사주의 동적 거동 특성 분석

Dynamic Characteristics of Multiple Bars in the Channels with Erodible Banks

장 창 래*

Jang, Chang-Lae

Abstract

In this study, the development processes of multiple bars in the channels with erodible banks were investigated by double Fourier analysis. The initially straight channels in the experiment flume were widened with eroding the side banks, and the multiple bars were generated and grew due to stalling of the sediment on the bed. The bars migrated downstream and the size of the bars increased with time. The flow was separated around the bars, and the bed and banks near the bars were scoured due to the impinged secondary flow. The morphologic changes were accelerated by the bank erosion, which affected the fluctuations of sediment discharge downstream. The double Fourier analysis of the bed waves showed that 1-1 mode (alternate bar) was dominant at the initial stage of the channel development. As time increased, 2-3 mode (central or multiple bars) was dominant due to the increased width to depth ratio. Moreover, the number of bars in a cross section of the channel were increased due to the non linearity of alternate bars. The width to depth ratio was increased by the bank erosion, which affected the bar migration and the bar wavelength. However, the dimensionless tractive force was decreased by it.

Keywords : bank erosion, multiple bars, double fourier analysis, mode of bars

요 지

본 연구에서는 복렬사주의 모드를 객관적으로 판단할 수 있는 2중 푸리에 해석을 수행하여 하폭의 변화에 따른 복렬사주의 발달 과정을 정량적으로 분석하였다. 초기에 직선하도에서 하안침식이 발생하고, 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 복렬사주가 발달하였다. 사주가 하류로 이동하면서 성장하고, 사주의 주변에서 흐름이 분리되어 하안 침식을 가속시키면서, 지형이 지속적으로 변하여 유사의 유출특성에 영향을 주었다. 2중 Fourier 해석에 의한 하상파(wave)의 분포와 지배적인 성분의 변화를 분석 한 결과, 초기에 1-1 모드(mode)인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 지나면서 하폭이 증가하여 상대적으로 수심이 감소하면서 2-3 모드가 지배적인 것으로 나타났으며, 교호사주의 강한 비선형 특성이 상호작용하기 때문이다. 하안침식이 진행되면서 하폭 대 수심의 비가 증가하고, 무차원 소류력이 감소하였다. 하폭 대 수심의 비가 증가할수록 사주의 이동속도가 감소하고, 사주의 파장은 증가하였다. 무차원 소류력이 증가하면서, 사주의 이동속도는 증가하였다.

핵심용어 : 하안침식, 복렬사주, 2중 푸리에 해석, 사주의 모드

1. 서 론

하천복원 및 정비 사업은 종종 하폭을 넓히거나 하도의

선형을 개선하여 하천환경을 복원하거나 홍수의 소통을 원활히 하여 홍수 피해를 경감시킨다. 최근에는 기존에 설치된 하안침식 방지를 위한 호안공 등을 제거하고 하안침식

* 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

을 허용하여 하폭이 자유롭게 확대되도록 하고, 하천을 개사행시켜서 하천을 복원하고 있다(Abad and Garcia, 2006). 이와 같이 하폭이 변하면, 하도에서 교호사주(alternate bar)나 복렬사주(multiple bar)가 발달하여, 하도의 평면이 다양하게 변하게 된다(Parker, 1976; Fredsoe, 1978; Kuroki and Kishi, 1984).

하천의 생태계는 하도의 지형 변화에 많은 영향을 받는다. 하천의 지형학적 상태를 나타내는 중요한 정량적인 지표 중의 하나는 하도에서 다양한 사주가 발달하는지를 판단하는 것이다(Crosato and Mosselman, 2009). 사주는 하도의 지형을 다양하게 변하는데 중요한 역할을 하고, 수생태계의 서식처를 만든다. 따라서 하천의 자연도를 평가할 때 하도에서 발달한 사주의 다양성을 조사한다(Park et al., 2005).

하도에서 자유사주(free bars)가 발달하는 조건은 선형 안정해석에 의하여 이론적으로 정립되었다(Callander, 1960). 복렬사주(multiple bars)는 교호사주보다 하폭 대 수심의 비가 큰 곳에서 발생한다. 하도에서 흐름에 의하여 이동하는 자유사주(free bars)는 하도 및 흐름의 작은 변화(perturbation)에 반응하는 시스템으로써, 하상에서 진동이 발생한다. 이것은 하안의 지형에 의해서 유사가 퇴적되어 이동하지 않는 고정사주(point bars)인 강제사주(forced bars)와 구별이 되며, 자유사주와 고정사주에 의한 하도의 평면형태에 대한 이론 및 실험을 통하여 많은 연구가 진행되어 왔다(Parker, 1976; Fredsoe, 1978; Kuroki and Kishi, 1984; Repetto et al., 2002). 그러나 이러한 연구는 하폭이 고정되어 있는 상태로 가정하고 사주의 변화를 파악한 연구이므로, 하안 침식을 허용하여 하천을 복원하거나 관리를 위해 하안침식을 고려하여 하폭의 변화에 따른 사주의 발달 과정을 연구하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 하안침식을 고려하여 복렬사주의 발달 과정을 실내실험을 통하여 분석하였다. 복렬사주에 의하여 발달한 망상하천은 하상형상(河床形狀)이 복잡하며, 국부적으로 유속이 빠르고, 사주의 변화가 복잡하며, 하안침식에 의하여 주변에 미치는 영향이 크다(Fujita, 1989, Ashmore, 1991). 그러므로 하상형태가 복잡한 복렬사주를 대상으로 하여 사주의 발달과정을 파악할 때, 사주의 형상을 판단하는 기준이 명확하지 않아 사람마다 달리 해석하는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 복렬사주의 형상을 객관적으로 판단할 수 있는 2중 푸리에 해석(Double Fourier Analysis)을 수행하여 하폭의 변화에 따른 복렬사주의 발달 과정을 정량적으로 분석하였다.

2. 실내실험

실내실험은 길이 12m, 넓이 2m의 가변형 경사 수로에서 수행되었다(Fig. 1(a)). 수로는 평균입경이 1.4mm이고, 표준편차가 1.35인 균일사로 10cm의 두께로 전체가 균등하게 채웠다. 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밑변이 80cm, 깊이가 3cm, 하안의 경사가 40도인 저수로를 만들었으며(Fig. 1(b)), 수로의 경사는 1/100로 설정하였다. 고가수조에서 모래로 채워진 이동상 경사 수로에 물이 유입될 때, 유입구에서 국부세굴이 발생하므로, 고가수조의 물이 이동상 초기 수로에 물을 유도하고, 유입구에서 국부세굴이 발생하지 않도록 길이가 0.6m이고, 폭이 0.8m인 고정상 수로를 설치하였다(Fig. 1(a)). 하도 변화에 대한 지형 자료는 상류로부터 2~12m 구간에서 종방향으로 0.2m, 횡방향으로는 0.05m 간격으로 point gauge를 이용하여 측정되었다. 초기에 상류에서 3.97 l/s의 유량으로 일정하게 공급하였다. 하폭 대 수심의 비는 76.0이다. Run-2와 3은 Jang (2003)의 실험결과를 이용하여 분석하였으며, 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도의 지형과 사주의 변화

망상하천은 하상 및 하안침식에 의하여 흐름 및 하도가 급격하게 변하여 예측하기 어렵기 때문에, 하도를 계획하거나 관리하는데 많은 한계가 있다. 망상하천의 변화 과정은 우선 직선하도에서 하안침식이 발생하고(Fig. 2(a)), 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 복렬사주가 발달한다. 사주가 하류로 이동하면서 성장하고, 사주의 주변에서 흐름이 분리되어 하안 침식을 가속시킨다(Fig. 2(b)). 시간이 증가하면서, 사주는 하류로 이동하고 사주의 면적은 증가하며 하폭이 넓어진다(Figs. 2 and 3). 사주의 후미에서는 흐름이 집중되고, 하상이 깊게 세굴되면서 세굴공(scour hole)이 발생한다(Figs. 2 and 3).

통수 후 30분에 유입구로부터 2.2m 지점과 6m 지점에서 중앙사주(central bar)가 나타나며, 흐름이 분열된다(Fig. 3). 중앙 사주의 파장은 약 4m 정도이며, 시간이 증가하면서 하류로 이동한다. 하도에서 흐름이 분열되는 것은 망상하천을 형성하는데 중요하며, 사주에서 유선(streamline)이 분열되어 만들어진다(Mosley, 1976).

사주의 상류에서 흐름이 분리되는 것은 무차원 소류력(dimensionless tractive force)에 의하여 흐름의 Froude

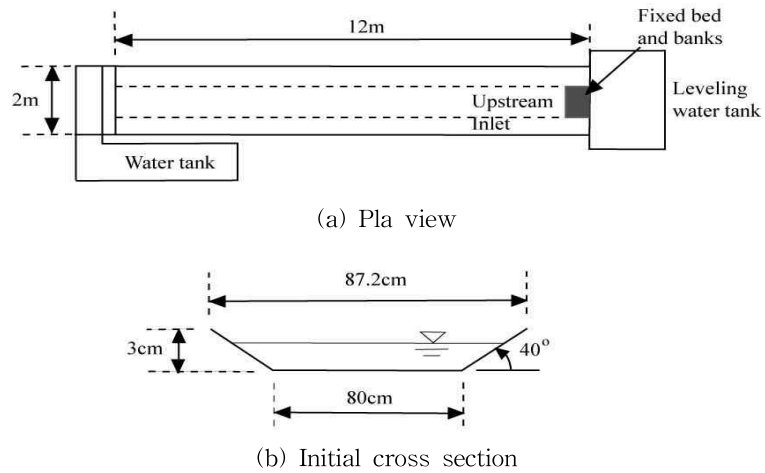


Fig. 1. Sketch of Experimental Setup

Table 1. Experimental Conditions

Run	Water Discharge (L/s)	Bed Slope (%)	Mean Dia. of Bed Material (mm)	Initial Water Depth (m)	Width/depth	Remarks
1	3.97	1/100	1.4	0.011	76.0	
2	4.5	1/100	1.25	0.0141	59.1	Jang (2003)
3	3.5	1/67	1.25	0.0093	89.9	Jang (2003)



(a) T=0 min.



(b) T=30 min.



(c) T=60 min.



(d) T=90 min.

Fig. 2. Experimental Results for Run-1

수와 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 흐름의 불안정성 (instability)이 증가하여 발생한 것이며(Federici and Paola, 2003), 무차원 소류력은 다음과 같다.

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (1)$$

여기서, τ_0 는 하상의 전단응력이며, d 는 하상도의 입경, ρ_s 와 ρ 는 유사와 물의 밀도이다. 그리고 g 는 중력가속도이다. 하폭 대 수심의 비(β)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{w}{h_0} \quad (2)$$

여기서, w 는 하폭이며, h_0 는 수심이다.

무차원 소류력이 0.15보다 클 때, 흐름이 사주에 의하여 완전하게 분열되어 안전한 상태를 유지한다. 그러나 무차원 소류력이 0.15보다 작을 때, 흐름의 분열은 불안정한

상태를 유지하며, 2개의 하도 중에서 하나는 막히고, 다른 하나는 하도에 구속된다(Federici and Paola, 2003). 상류에서 발달한 복렬사주(중앙사주)는 좌우 대칭으로 발달하지만, 하류에서 발달한 복렬사주는 좌우 비대칭을 이루고 있다(Figs. 2 and 3). 이것은 흐름의 무차원 소류력이 0.15보다 작은 상태에서 하도의 불안정에 의하여 발달한 것으로 판단된다.

망상하천에서 저수로의 흐름이 합류되는 지점은 흐름이 집중되어 하상이 깊게 세굴 되고, 세굴공이 형성된다. 이러한 합류부의 세굴은 망상하천의 발달과정을 이해하는데 중요하다. 합류점에서 발생한 세굴공은 망상하천에서 저수로와 저수로가 만나는 지점으로써, 하도의 이동과 유사의 분포에 많은 영향을 준다. Fig. 4는 세굴공의 이동 특성을 보여 주고 있다. 상류에서 발달한 세굴공은 60분에 1.67 cm/min.에서 2.33 cm/min.으로 증가하였으며, 하류에서 발달한 세굴공도 1.67 cm/min.에서 2.0 cm/min.으로

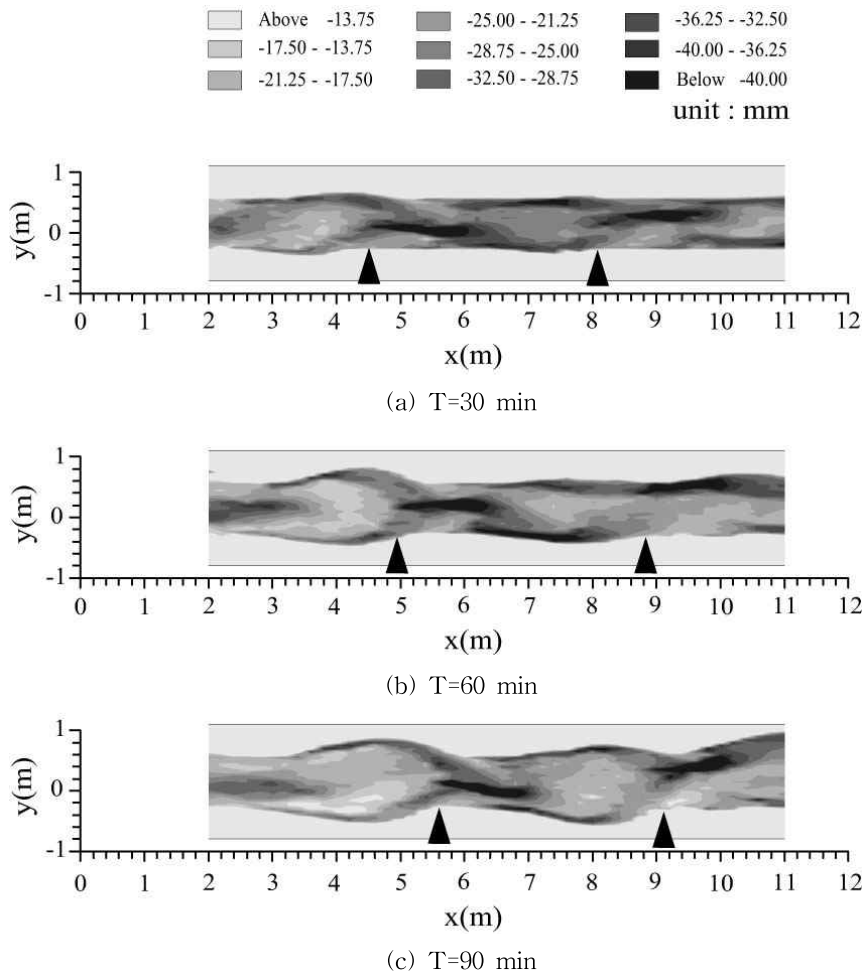


Fig. 3. Morphological Changes in Time : ▲ Indicates Scour Holes in the Channel and Flow is from Left to Right

증가하였다. 망상하천에서 세굴공이 이동하는 특성은 파악하는 것은 상류에서 발달한 사주에 의하여 흐름이 합류되는 각도에 따라서 변하게 된다. 시간이 증가함에 따라, 사주가 발달하면 유입 각도가 증가하고, 각각 유입되는 흐름이 강하게 충돌하여 와류가 크게 발달하며, 하상이 깊게 세굴되기 때문으로 판단된다.

망상하천에서 저수로의 변화는 유사의 유출 특성과 밀접한 관계를 갖고 있다. 본 연구에서는 실험이 진행되는 동안 가변형 경사수로의 하류단에서 매 5분 간격으로 유사를 수집하여, 유사량을 측정하였다. Fig. 5는 시간에 따른 유사의 유출량을 보여주고 있다. 통수 후 30분까지는 유사의 유출량이 거의 일정하게 증가하였으나, 그 후에는 강한 변동을 보이면서 유사가 유출되는 것을 보여주고 있다. 통수 30분까지 유사의 유출량이 일정한 것은 초기에 저수로에서 일정하게 하안침식이 발생하기 때문이다. 그러나 30분 후에 유사의 유출량이 강한 변동을 보이는 것은 사주의 증가에 의하여 하안이 침식되고, 저수로의 수가 증가하거나 하폭이 증가하면서 유사가 이동되지 않는 수심이 얇은 구간이 증가하면서 유사의 유출이 증가하거나 감소하기 때문에, 유사의

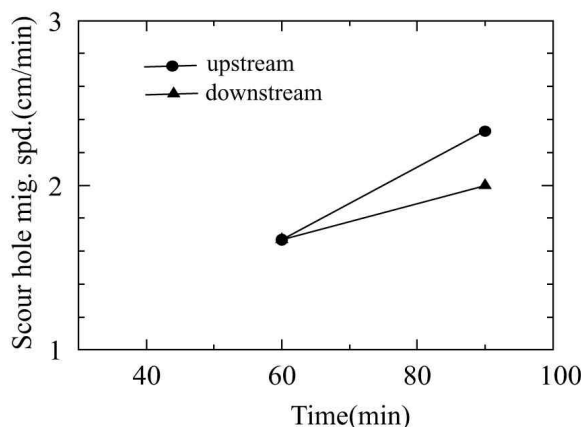


Fig. 4. Migration of SCOUR Hole for Run-1

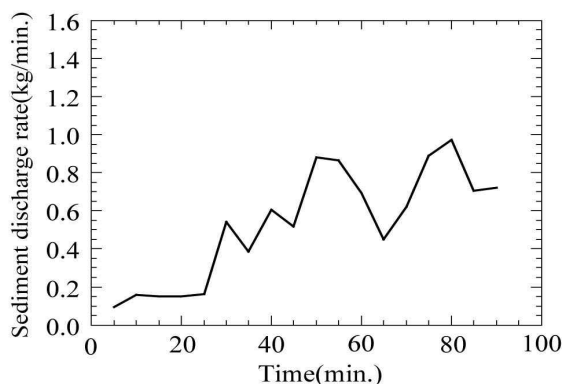


Fig. 5. Sediment Discharge with Time for Run-1

유출에서 강한 변동을 보여주고 있는 것으로 판단된다.

3.2 2중 푸리에 해석

2중 푸리에 해석은 하상형상을 다양한 하상파로 선형화 하여 표현하는 것이 가능하다. 2중 푸리에 해석을 통하여 얻은 각 파의 진폭 성분을 분석하여 모드(mode)의 특성을 파악한다. 2중 푸리에 변환을 할 때에 종횡단 방향에 1 파장의 자료를 계산하며, 횡단방향에서는 유로의 반과장 자료를 반대방향으로 굴절시키고, 하폭을 B라면 2B까지 자료가 있다고 가정하여 계산하며, 정밀하게 하상형상의 파를 재현하는 것이 가능하다(Hasegawa, 1984).

해석을 하는 하상형상의 흐름 방향(s)에 대한 1 파장의 길이를 L , 횡단방향(n)에 관해서 유로의 1/2에 대한 자료를 양측에 반대방향으로 굴절시킬 때의 길이를 기준과장 Y 로 한다.

평균수심을 H 라 하고, 하상고와 평균 하상고의 차를 $\tilde{\eta}$ (중력이 작용하는 방향을 +로 함)라 하고, $\tilde{\eta}$ 를 H 로 나눈 무차원 하상고 η 로 하상형상을 나타낸 계산식은 다음과 같다(Hasegawa, 1984). i 는 물이 흘러 내려가는 방향의 계산점이고, j 는 횡단방향의 계산점이다.

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{1}{2} \sum_i \left\{ a_{i0} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) + b_{i0} \left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_j \left\{ a_{0j} \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + c_{0j} \sin\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \right\} \quad (3) \\ & + \sum_i \sum_j \left\{ a_{ij} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + b_{ij} \sin\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \right\} \\ & \left\{ + c_{ij} \cos\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \sin\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) + d_{ij} \sin\left(\frac{2\pi i}{L} s\right) \cos\left(\frac{2\pi j}{Y} n\right) \right\} \end{aligned}$$

Eq. (3)을 이산(離散)화한 식으로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta(k, m) = & \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ a_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ b_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ c_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \quad (4) \\ & + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M \left\{ d_{ij} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \left\{ a_{i0} \cos\left(\frac{\pi i}{K} k\right) + b_{i0} \sin\left(\frac{\pi i}{K} k\right) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M \left\{ a_{0j} \cos\left(\frac{\pi j}{M} m\right) + c_{0j} \sin\left(\frac{\pi j}{M} m\right) \right\} \end{aligned}$$

Eq. (4) 중에서 계수 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} 는 역변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \cos\left(\frac{\pi i}{K}k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M}m\right) & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \\ 0 & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \sin\left(\frac{\pi i}{K}k\right) \cos\left(\frac{\pi j}{M}m\right) & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \\ 0 & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \end{cases} \quad (6)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \cos\left(\frac{\pi i}{K}k\right) \sin\left(\frac{\pi j}{M}m\right) & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ 0 & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{KM} \sum_{k=1}^{2K} \sum_{m=1}^{2M} \eta_{km} \sin\left(\frac{\pi i}{K}k\right) \sin\left(\frac{\pi j}{M}m\right) & (j = 1, 3, 5, 7, \dots) \\ 0 & (j = 0, 2, 4, 6, \dots) \end{cases} \quad (8)$$

이 식을 역변환 하여 얻은 계수 a , b , c , d 는 다음 진폭 성분을 구하는 식으로 대입한다.

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 짝수임} \\ \sqrt{c_{ij}^2 + d_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 홀수임} \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 7은 Run-1의 실험결과에 대한 각 시간별 하도의 지형변화에 대하여 2중 푸리에 해석에 의한 하상파의 분포와 지배적인 성분(mode)의 변화를 보여주고 있다. 여기서 1-1 모드는 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 모드는 1-2 모드와 2-2 모드

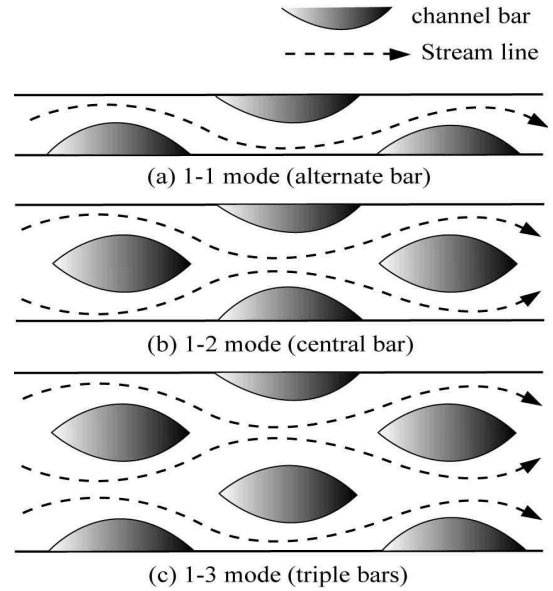
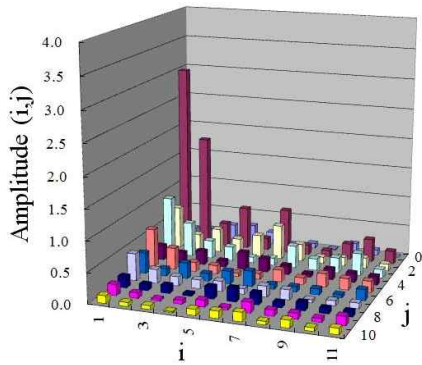
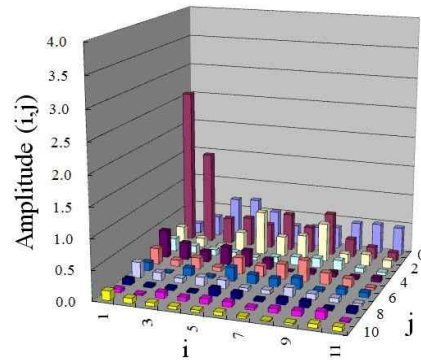


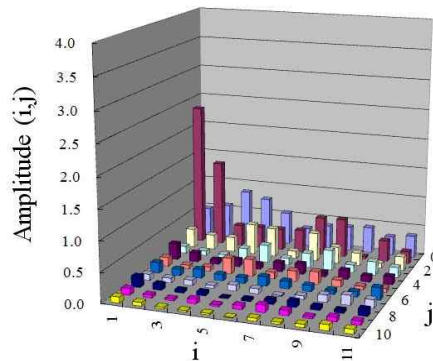
Fig. 6. Schematic Illustration of the Bar Modes



(a) T=30 min.



(b) T=60 min.



(c) T=90 min.

Fig. 7. Distribution of Sand Wave with Time by Double Fourier Analysis

는 2차 횡방향 모드로서 중앙사주(central bars)를 나타낸다. 1-3 모드와 2-3 모드는 한 단면에서 횡방향으로 3개의 사주가 형성된 것(triple bars)을 나타낸다(Fig. 6).

통수 후 30분에는 1-1 모드가 가장 지배적이며, 사주의 진폭(amplitude)이 1.8이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3 모드로써, 0.69에 이르고 있다. 통수 후 60분에서는 1-1 모드가 가장 지배적이지만, 진폭이 1.54이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3 모드로써, 0.48에 이르고 있다. 통수 후 90분에는 1-1 모드의 진폭이 1.42이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3 모드로써, 0.36에 이르고 있다(Fig. 7). 1-3 횡단모드의 진폭은 하상변화의 발달과정과 관련이 있다. 실제로, 사주가 분리되는 시작단계에서 하상형태에 의하여 전개된 비대칭은 교호사주(1-1 모드)의 발달로부터 시작된다.

실험 초기에는 1-1 모드인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 증가함에 따라, 교호사주인 1-1 모드는 감소하고, 한 단면에서 3개의 사주가 형성되는 2-3 모드가 지배적인 것으로 나타났다(Fig. 8). 이러한 원인은 시간이 지나면서 사주가 발달하고, 하안이 침식되면서, 하폭이 증가하여 복렬사주가 발달하기 때문이며, Colombini et al. (1987)의 연구에서도 보여준다. 한 단면에서 3개의 모드가 나타나는 것은 하상에서 변화를 일으키는데 중요한 역할을 하며, 직

선하도에서 사주의 수가 증가하는 것은 교호사주의 강한 비선형으로 상호작용하기 때문이다.

Fig. 9는 실험결과에 대하여 하폭 대 수심의 변화에 대한 사주의 각 모드에 대한 진폭을 보여주고 있다. Run-1에서 1-1 모드와 1-3 모드는 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 사주의 진폭이 감소하지만, 1-2 모드와 2-2 모드는 사주의 진폭이 거의 일정하게 유지되고 있다. Run-2에서 1-1모드와 1-3 모드는 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 진폭이 거의 일정하게 유지되지만, 1-2 모드와 2-2 모드

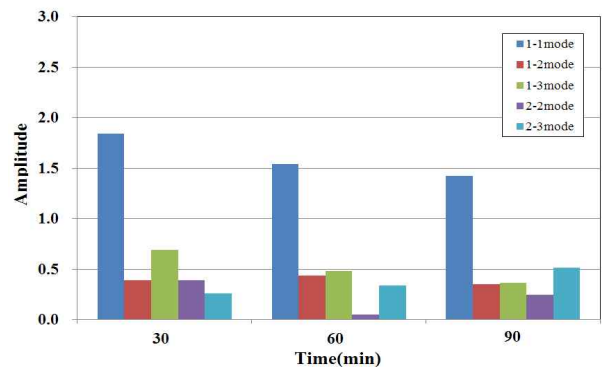


Fig. 8. Dominant Amplitude Modes with Time for Run-1

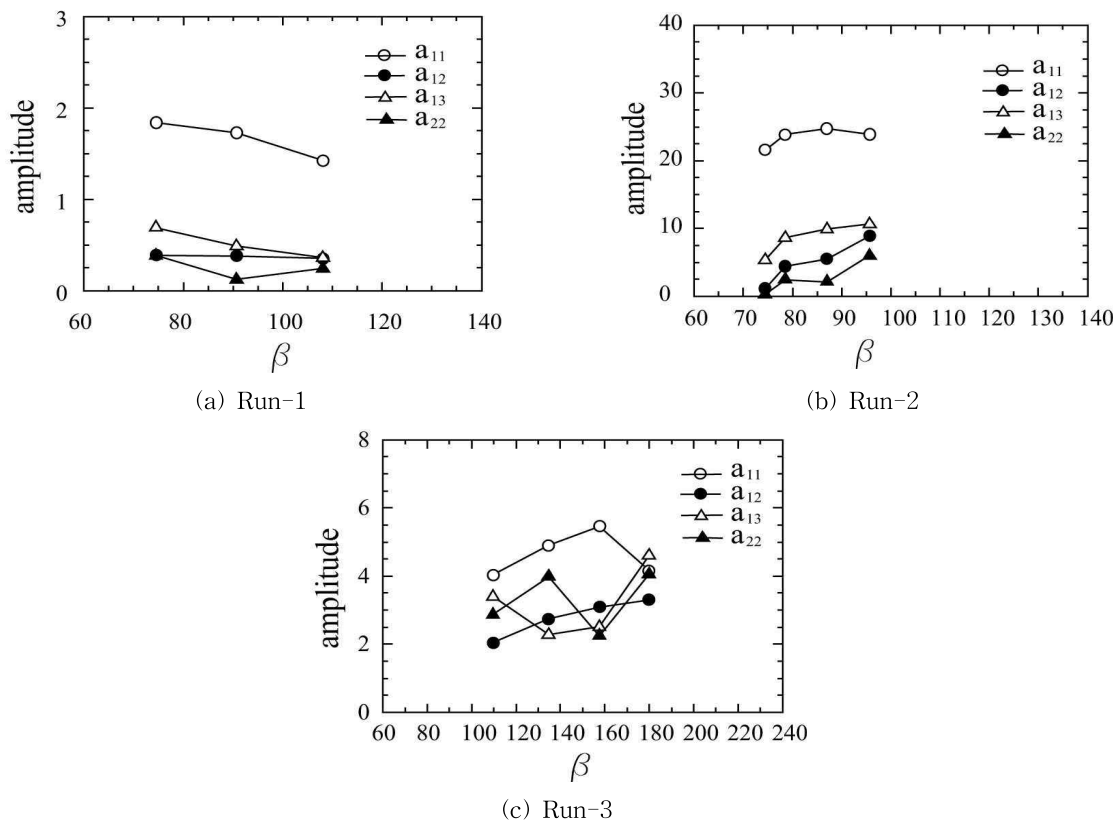


Fig. 9. Amplitudes of Bars with Width to Depth Ratio for Each Run

는 진폭이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 Run-3에서 1-1 모드는 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 진폭이 증가하다가 하폭 대 수심의 비가 160이 되면서 감소한다. 1-2 모드는 진폭이 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 원인은 하안침식에 의하여 하도의 평면이 변화되어 하안의 진폭이 크고, 하안의 변화와 사주의 상호작용에 의하여 2차 횡방향 모드(1-2)의 발달을 강화시켰기 때문이며, 이와 같은 특성은 Repetto and Tubino (1999)의 연구에서도 보여주고 있다.

Fig. 10은 하폭 대 수심의 변화에 대한 사주의 이동 속도를 보여주고 있다. 하폭 대 수심의 비가 증가할수록 사주의 이동 속도는 감소한다. 이러한 현상은 하안침식이 발생하여 하폭이 증가하면 수심이 감소하면서, 사주의 성장에 영향을 주는 비선형 특성에 의하여 사주의 이동속도가 감소한 것으로 판단되며, 교호사주의 거동을 대상으로 수행한 Fujita (1989)의 실험 결과와 Seminara and Tubino (1989)의 이론적인 해석에서도 검토되고 있다. 사주에 의한 불규칙한 하안의 침식은 사주의 이동에 영향을 준다. 사주의 이동에 의하여 형성된 수층부에서 하안침식이 불규칙하게 발생하며, 강제효과(forcing effects)에 의하여 사주의 이동에 영향을 준다. 이러한 강제효과는 하안의 안정성과 관련이 있으며, 하안의 안정성이 증가하면 하안침식이 상대적으로 적게 발생하여 강제효과가 감소하고, 하안의 안정성이 감소하면, 강제효과가 크게 발생하여 사주의 이동에 영향을 준다(Jang and Shimizu, 2005).

Fig. 11은 무차원 소류력에 대한 사주의 이동 속도를 보여주고 있다. 무차원 소류력이 증가하면서, 사주의 이동 속도는 증가하고 있다. 그러나 run-2에서는 무차원 소류력이 증가함에도 불구하고 일부 구간에서 사주의 이동속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 하안의 불규칙한 침식에 의하여 강제효과에 의하여 사주의 이동속도가 감소하기 때문으로 판단된다.

Fig. 12는 하폭 대 수심의 변화에 대한 무차원 소류력의 변화를 보여주고 있다. 하안침식이 진행되면서 하폭 대 수심의 비가 증가하고, 무차원 소류력이 감소한다(Fig. 12). 이러한 특징은 사주의 이동 속도에 영향을 준다. 하상경사가 완만하고, 무차원 소류력이 상대적으로 작은 값에서 사주의 분열은 하폭 대 수심의 비가 큰 범위에서 발생한다. 그러나 하상경사 급하고 무차원 소류력이 상대적으로 크면, 하폭 대 수심의 비가 상대적으로 작은 상태에서 사주가 분열된다(Bertoldi, et al., 2002).

Fig. 13은 하폭 대 수심의 변화에 대한 파장의 변화를 보여주고 있다. 하폭 대 수심이 증가하면, 사주의 파장은 증

가하고 있다. 사주의 파장은 사주의 이동속도와 깊은 관계가 있다. 사주의 파장이 증가하면 사주의 이동속도는 감소하며, Fig. 9는 이러한 특성을 잘 보여주고 있다. Seminara and Tubino (1989)의 이론적 검토와 Jang and Shimizu (2005)의 수치모의를 통하여 사주의 파장과 이동속도의 관계가 설명되고 있으며, Fig. 12는 하폭이 상대적으로 넓고 수심의 얕은 조건에서 이러한 관계를 실험적으로 잘 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 복렬사주의 모드를 객관적으로 판단할 수 있는 2중 푸리에 해석을 수행하여 하폭의 변화에 따른 복렬사주의 발달 과정을 정량적으로 분석하였다. 실험초기에 직선하도에서 하안이 침식되고, 하폭 대 수심의 비가 증가하면서 복렬사주가 발달하였다. 사주가 하류로 이

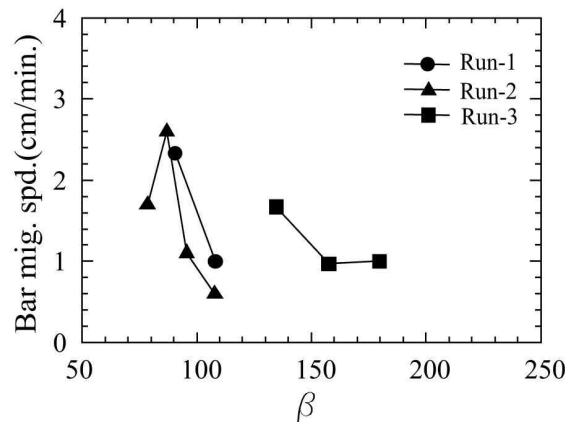


Fig. 10. Bar Migration Celerity with Width to Depth Ratio for Each Run

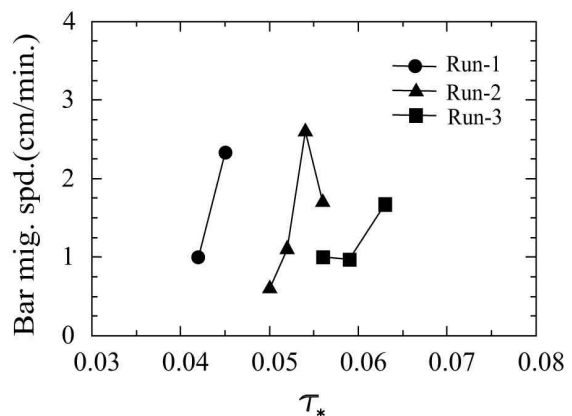


Fig. 11. Bar Migration Celerity with Dimensionless Tractive Force for Each Run

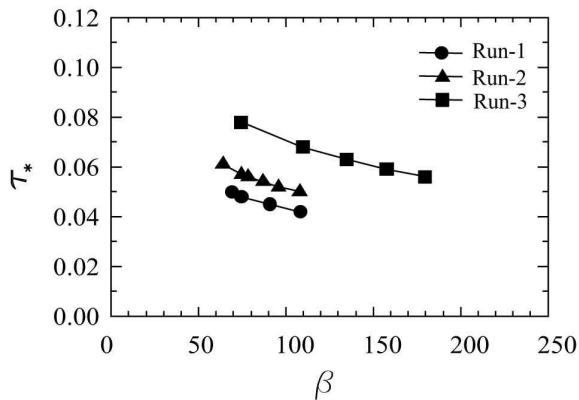


Fig. 12. Dimensionless Tractive Force with Width to Depth Ratio for Each Run

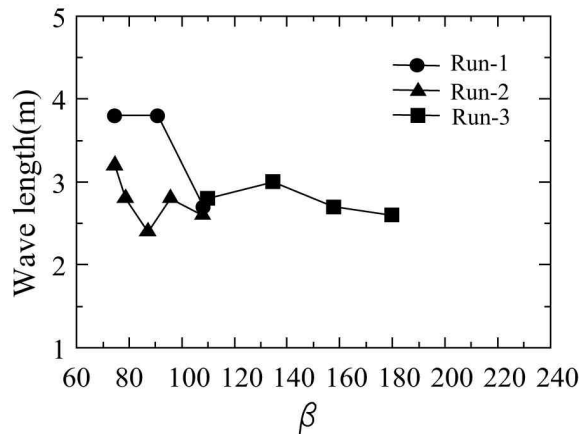


Fig. 13. Wave Lengths of Bars With Width to Depth Ratio for Each Run

동하면서 성장하고, 사주의 주변에서 흐름이 분리되어 하안침식을 가속시키며, 하도의 지형이 지속적으로 변화되어 유사의 유출량에 변화를 주었다.

2중 플리에 해석에 의한 하상과의 분포와 지배적인 성분을 분석한 결과, 초기에 1-1 모드인 교호사주가 지배적이지만, 시간이 지나면서 하폭이 증가하여 상대적으로 수심이 감소하면서 2-3 모드가 지배적인 것으로 나타났다.

하안이 침식되면서 하폭 대 수심의 비가 증가하고, 무차원 소류력이 감소하였다. 하폭 대 수심의 비가 증가할수록 사주의 성장에 영향을 주는 비선형 특성에 의하여 사주의 이동속도가 감소하였다. 사주에 의한 불규칙한 하안의 침식은 강제효과가 발생하여 사주의 이동에 영향을 주며, 사주의 이동속도가 큰 상태에서 사주의 분열이 발생하였다.

무차원 소류력이 증가하면서, 사주의 이동속도는 증가하였다. 또한 하폭 대 수심이 증가하면, 사주의 파장은 증가하였으며, 사주의 파장이 증가하면 사주의 이동속도는 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0009759) 및 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신 C06)에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Abad, J.D., and Garcia, M.H. (2006). "RVR Meander: A toolbox for remeandering of channelized streams." *Comput. Geosci.*, Vol. 32, pp. 92-101.
- Ashmore, P.E. (1991). "How do gravel-bed rivers braid?." *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 28, pp. 326-341.
- Bertoldi, W., Tubino, M., and Zolezzi, G. (2002). Experimental observations of river bifurcations with uniform and graded sediments" in *River Flow 2002*, edit by D. Bousmar and Y. Zech, Balkema, Lisse, Netherlands, pp. 751-759.
- Callander, R.A. (1969). "Instability and river channels." *J. Fluid Mech.*, Vol. 36, No. 3, pp. 456-480.
- Colombini, M., Seminara, G., and Tubino, M. (1987). "Finite amplitude alternate bars." *J. Fluid Mech.*, Vol. 181, pp. 213-232.
- 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: 10.29/2008WR007242.
- Federici, B., and Paola, C. (2003). "Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments." *Water Resour. Res.*, Vol. 39, No. 6, 1162. doi: 10.1029/2002 WR001434.
- Fredsoe, J. (1978). "Meandering and braiding of rivers." *J. Fluid Mech.*, Vol. 84, No. 4, pp. 609-624.
- Fujita, Y. (1989). Bar and channel formation in braided stream. *River meandering, Water Res. Monogr.*, Vol. 12, edited by S. Ikeda and G. Parker, AGU, Washington, D.C., pp. 417-462.
- Hasegawa, K. (1984). Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers., PhD Dissertation, Hokkaido University, Japan (in Japanese).
- Jang, C.-L. (2003). Study on the morphological behavior of the channel with erodible banks, Ph.D. dissertation,

- Hokkaido University, Japan.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2005). "Numerical simulation of the behavior of alternate bars with different bank strengths." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 43, No. 6, pp. 595-611.
- Kuroki, M., and Kishi, T. (1984). "Regime criteria on bars and braids in alluvial straight channels." *Proc. JSCE*, 342, pp. 87-96.
- Mosely, M.P. (1976). "An experimental study of channel confluences" *J. Geol.*, 84, pp. 535-562.
- Park, B.J., Shin, J.I., and Jung, K.S. (2005). "The evaluation of river naturalness of biological habitat restoration: I. Proposal of evaluation method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 1, pp. 37-48 (in Korean).
- 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.
- Repetto, M., and Tubino, M. (1999). "Transition from migration alternate bars to steady central bars in channels with variable width" *International Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics. Genova, Italy, September 6-10.*
- Repetto, M., Tubino, M., and Paola, C. (2002). "Planimetric instability of channels with variable width." *J. Fluid Mech.*, 457, pp. 79-109.
- Seminara, G., and Tubino, M. (1989). Alternate bar and meandering: Free, forced and mixed interactions, in *River Meandering, Water Res. Monogr.*, Vol. 12, edited by S. Ikeda and G. Parker, AGU, Washington, D.C., pp. 267-320.

논문번호: 12-078	접수: 2012.07.06
수정일자: 2012.09.04/09.17	심사완료: 2012.09.17