



Experimental analysis on the morphologic changes and adaption of the channels to floodplain vegetation

Jang, Chang-Lae^{a*}

^aProfessor, Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea

Paper number: 22-055

Received: 25 August 2022; Revised: 27 September 2022; Accepted: 28 September 2022

Abstract

This study investigates the evolution processes of alternate bars in the channel with bank stability by vegetation by laboratory experiment. Laboratory experiments are conducted to elucidate the behavior of alternate bars by the influence of riparian vegetation on the rivers with erodible banks. To control bank stability of the channel, the actual vegetation, alfalfa, is grown by adjusting the density of alfalfa on the flood plain. As the vegetation density increases in the flood plain, the bank erosion rates and the channel widening rates decrease and the bank stability increases. The alternate bars migrate slow downstream over time. Moreover, the bars in a channel with strong banks migrate rapidly, which is related with the aspect ratio, that is, width to depth ratio. The bar wavelength decrease with vegetation density. Our laboratory experiments show that the behavior of bars differ according to bank strength.

Keywords: Vegetation, Bank strength, Alternate bar, Bar migration speed, Bar wavelength

홍수터 식생에 의한 하도의 지형변화와 적응과정 실험적 분석

장창래^{a*}

^a한국교통대학교 건설환경도시교통공학부 교수

요 지

본 연구에서는 홍수터 식생에 의한 하안의 안정성을 고려하여 하도에서 사주의 거동과 하도의 지형변화 적응과정을 실내실험을 수행하여 분석하였다. 초기 직류하도에서 하안침식이 발생하고 하폭이 증가한다. 하폭 대 수심의 비가 증가한 후에, 교호사주가 발달하고, 하류로 이동한다. 시간이 증가함에 따라, 사주의 이동속도는 감소하고 사주의 파장은 증가한다. 홍수터에서 식생 밀도가 증가함에 따라, 하안침식율은 감소한다. 그러나 사주의 이동속도는 증가한다. 이는 하안의 안정성 변화가 사주의 이동속도에 영향을 주기 때문이다. 하폭이 증가하고 수심이 감소하면서 무차원 소류력인 Shield Number는 증가하며, 사주의 이동속도도 증가한다. 이는 또한 이동하는 교호사주와 선택적 침식에 의해 발생한 불규칙한 하안 사이에 작용하는 강제효과 때문에 하안의 안정성이 작은 하도에서 사주의 이동속도는 감소한다. 시간이 증가함에 따라 사주의 파장은 증가한다. 사주의 파장이 증가하면서 사주의 이동속도는 감소한다.

핵심용어: 하도식생, 하안의 안정성, 교호사주, 사주의 이동속도, 사주의 파장

1. 서 론

하천 지형은 흐름, 유사이송, 그리고 식생과의 상호 작용에 의해 형성되며, 다양한 형태로 발달한다. 특히, 하도식생은 흐

름에 대한 저항을 증가시켜서 유속을 감소시킨다. 더욱이, 국부적으로 경계층(boundary layer thickness)을 증가시키고, 수위를 증가시켜서 홍수범람을 일으킨다(Gran and Paola, 2001). 또한 식생하도에서 하안침식과 저수로 이동특성은 감소하고 하도 안정성은 증가한다(Jang and Shimizu, 2007; Tal and Paola, 2007). 식생대에서 유속이 감소되고, 유사가 퇴적되어 하안과 사주가 증가하며(Nepf, 2012), 유사 입경이 작아

*Corresponding Author. Tel: +82-43-841-518
E-mail: cljang@ut.ac.kr (Jang, Chang-Lae)

지면서 하천환경이 변화된다(Kondolf and Wolman, 1993). 이렇게 변화된 하천환경은 저수로 수가 감소되고, 하도 역동성이 작아진다(Gran and Paola, 2001; Jang and Shimizu, 2007).

식생대에서 유사는 쉽게 포착되고 하상도 입경이 분급된다(Tsujimoto, 1999). 주수로와 식생대 사이에서 에너지 교환이 발생하며, 난류의 강도가 증가되고 흐름이 집중되어, 주수로에서 하도 변화가 발생하고, 홍수터나 식생대에서 유사가 퇴적된다(Tsujimoto, 1999; Lopez and Garcia, 2001; Nepf and Vivoni, 2000). 이는 결과적으로 하상과 하폭에 변화를 주어 하천의 지형변화를 일으킨다(Jang and Shimizu, 2005; Eaton and Giles, 2009; Crosato and Samir Saleh, 2011). 특히, 기후 변화와 댐의 조절방류로 인한 유황의 변화에 의해, 식생이 활착하고 번성하면서 저수로가 분열되어 다지하천으로 변화되는 등 하도의 지형 변화뿐만 아니라, 홍수소통에 지장을 주고, 하천환경 및 경관적 가치가 저하된다(Choi *et al.*, 2004; Jang and Shimizu, 2010; Kim and Kim, 2019; Lee and Kim, 2021).

하천의 지형변화에 영향을 주는 사주는 하폭 대 수심의 비에 의해 결정된다. 하폭 대 수심의 비가 작으면 교호사주가 발달하고, 하폭 대 수심의 비가 크면 복렬사주가 발달한다. 이는 흐름의 방향으로 이동하며 수층부를 형성하여 하안침식을 일으키고 하도의 지형변화를 일으킨다. 사주나 홍수터에서 성장하는 식생은 하안의 안정성에 영향을 주어 하도의 지형변화에 영향을 준다. Jang and Shimizu (2005, 2007)는 식생, 하상, 그리고 하안 안정성의 상호작용을 고려하여 사주의 거동과 하천의 지형변화 과정을 실험 및 수치모의로 연구하였다. 홍수터에서 있는 식생은 하안침식을 감소시키고, 하안의 안정성을 증가시킨다. 이는 식생이 없는 하천에 비해 하폭 대 수심의 비를 감소시켜 하천의 지형변화에 영향을 준다. 따라서 하도식생에 의해 하천의 지형이 어떻게 변하는지를 정량적으로 파악하기 위하여 사주나 홍수터에 있는 식생이 하천의 발달 과정에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는 것은 중요하다. 이는 또한 홍수터 식생관리, 댐건설, 취수나 유황을 변화시키고 식생에 영향을 주는 하천 정비 등 인위적 교란에 의한 영향을 평가하는데 중요하다.

최근에 식생을 강성 실린더로 처리하고 수치모의를 수행하여 식생에 의한 유사의 거동과 하천의 지형변화 과정을 파악하기 위한 연구를 수행하고 있으나(Vargas-Luna *et al.*, 2015), 실제 식생의 거동을 고려한 하도변화를 파악하는데 한계가 있다. 또한 이 분야 선구적으로 개발된 몇몇 2차원 수치모형은 하안침식과 퇴적을 개별적으로 고려하여 하천의 지형변화를 모의하는데 좋은 성과를 보여주었다(Asahi *et al.*, 2013; Bertoldi *et al.*, 2014; Bywater-Reyes *et al.*, 2018; Jang and Shimizu, 2007). 그러나 이들 모형은 하안침식과 퇴적 모의

알고리즘이 단순화되어 있어서 물리적 특성을 명확하게 반영하기에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, Jang and Shimizu (2005)는 선구적으로 정교한 수치모형을 적용하여 실제 식생으로 재현할 수 없는 미세한 하안의 안정성에 대한 교호사주의 변화 과정을 분석하였다. 교호사주는 하안의 안정성이 증가할수록 이동속도가 빠르고, 사주의 파장이 짧은 특성을 보여주었다. 그러나 본 연구는 실제 식생을 적용하여 하안의 안정성뿐만 아니라 하안침식에 의해 사주에 작용하는 강제효과(forcing effect)를 고려하여 사주의 거동을 입증할 필요가 있다. Vargas-Luna *et al.* (2019)는 인공식생을 이용한 실내실험을 수행하여 식생이 하안침식, 하천의 형태와 선형, 사주의 변화에 미치는 영향을 파악하였으나, 식생의 뿌리 등에 의한 하안의 안정성과 하도의 변화관계를 설명하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해서 실제 식생인 알팔파를 이용하여 실내실험을 수행하고, 홍수터 식생에 의한 강화된 하안의 안정성에 의해 저수로에서 교호사주의 거동과 하도의 변화 과정을 정량적으로 파악하였다. 또한 Jang and Shimizu (2005)가 수치실험으로 제시한 연구 결과와 비교하여 분석하였다.

2. 실내실험

실내실험은 길이 12 m, 폭 2 m로 주문 제작된 수로에서 수행하였다(Fig. 1(a)). 가변형 경사수로에서 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밑변이 0.3 m 이고, 깊이가 0.05 m 이며, 하안의 횡단측면 경사가 45도인 저수로를 만들었으며(Fig. 1(b)), 수로 경사는 1/200로 설정하였다. 고가수조 안에서 발생한 와류를 정류시키기 위하여, 수조 안에 있는 스크린에 플라스틱 격자망을 부착하였다. 고가수조에서 모래로 채워진 이동상 경사수로에 물이 유입될 때, 유입구에서 국부세굴이 발생하므로, 고가수조의 물을 이동상 초기 수로로 유도하고, 초기 교호사주 발달을 일으키며 유입구에서 국부세굴이 발생하지 않도록 사행각이 10도인 1 파장인 고정상 사행수로를 아크릴판으로 제작하여 설치하였다(Fig. 1(a)). 또한 고정상 하상과 이동상 하상 경계에서 국부세굴을 방지하기 위하여, 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다. 하상고의 변화와 하도 지형의 발달 과정은 각 실험 단계에서 상류로부터 2~11 m 구간에서 종방향으로 0.2 m, 횡방향으로는 0.01 m 간격으로 레이저 profiler를 이용하여 측정하였다. 실험을 위한 자세한 수리학적 조건은 Table 1에 나타내었다. 실내 실험에 사용된 유사의 평균입경은 0.8 mm 이다. 실험수로의 표면유속은 입자의 흐름을 디지털카메라로 촬영하고, 이를

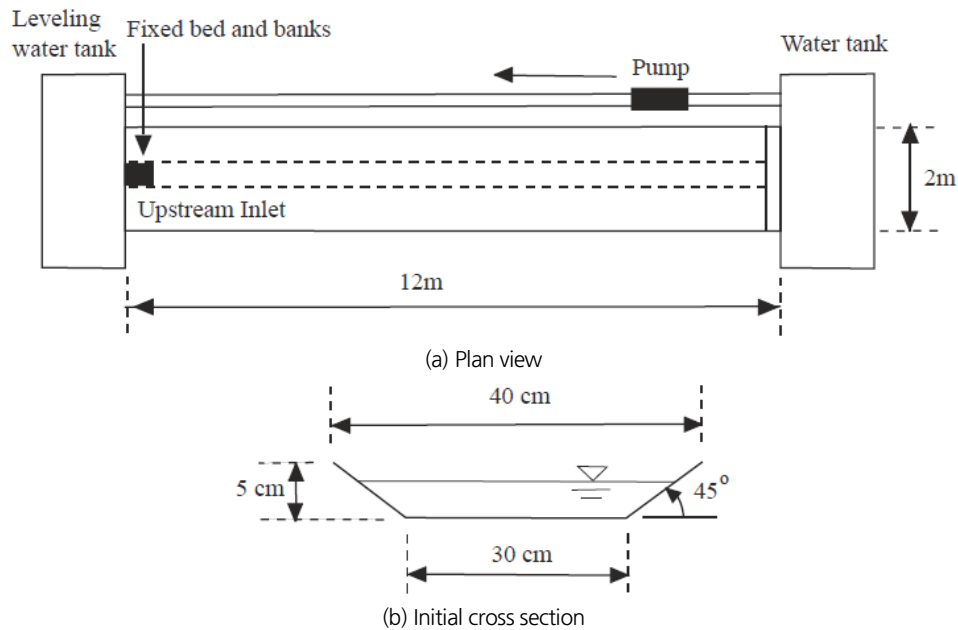


Fig. 1. Sketch of experimental setup

Table 1. Experimental conditions

Case	Water discharge (L/s)	Bed Slope (%)	Froude Number (Fr)	Mean Dia. of Bed material (mm)	Vegetation density (stems/cm ²)	Remarks
Run-1	2.5	1/200	0.87	0.8	0.0	w/o
Run-2	2.5	1/200	0.87	0.8	0.4	w/veg
Run-3	2.5	1/200	0.87	0.8	0.8	w/veg

분석하여 측정하였다.

저수로에서 교호사주가 발달하기 위한 수리학적 조건과 초기하도는 Crosato and Mosselman (2009)이 제시한 공식을 적용하여 계획하였으며, 등류 조건에서 적용할 수 있는 공식은 다음과 같다.

$$m^2 = 0.17g \frac{(b-3) B^3 i}{\sqrt{\Delta D_{50}} CQ} \tag{1}$$

여기서, m 은 사주의 모드(mode), g 는 중력가속도(m/s^2)이다. B 는 하폭(m)이고, i 는 하상경사이다. Δ 는 하상토의 수중 밀도(1.65)이다. D_{50} 은 하상토의 통과중량 50%에 해당하는 입경(m)이고, C 는 Chezy 계수로 나타내는 흐름의 저항($m^{1/2}/s$)이며, Q 는 유량(m^3/s)이다. b 는 유속의 함수로 나타내는 유사량 공식의 비선형도이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = Mu^b \tag{2}$$

여기서, q_s 는 단위 폭당 체적 유사량(m^2/s)이고, M 은 계수이며, u 는 유속(m/s)이다. b 는 모래하천에서 4 이고, 자갈하천에서 10이다(Crosato and Mosselman, 2009). 일반적으로 규모가 작은 균일사로 이루어진 모래하천은 초기 유사의 운동 조건에서 전형적인 자갈하천의 이동 특성을 가지고 있다(Vargas-Luna *et al.*, 2019). 따라서 본 연구에서는 교호사주가 발생할 수 있는 조건을 설계하는데 $b=10$ 을 설정하였다.

실험이 진행되는 동안, 수로 하류단에서 유출되는 유사량을 매 10분마다 유사포집망을 이용하여 수집하고 유출 유사량을 측정하여 상류단에서 공급되는 유사량과 비교하였다.

식생하도 실험을 위하여 홍수터에서 식생을 성장시키는 것이 중요하다. 초기 저수로를 Fig. 1(a)와 같이 형성한 후, 홍수터 식생하도를 형성하기 위하여 알팔파(alfalfa seed) 씨앗을 균일하게 홍수터 전체에 Table 1의 조건에 따라 뿌린다. Run-1은 홍수터에 식생이 없는 조건이며, Run-2와 Run-3는 각각



(a) Initial channel before seeding alfalfa



(b) Vegetated channel after 7 days of seeding alfalfa in the channel with floodplain

Fig. 2. Experimental channel with floodplain vegetation for Run-3. Flow is from top to down

Table 1에 제시된 식생의 밀도에 맞도록 씨앗의 양을 조절한다. 알팔파 식생의 밀도는 하도에 파종하기 전에 10 g 당 씨앗의 개수를 10회 정도 반복하여 세고, 평균한 후에 전체 무게를 측정하고, 씨앗 회사에서 제시한 발아율(70%)과 손실율(1%)을 고려하여 추정하였다(Jang, 2013). Fig. 2(a)는 알팔파를 파종하기 위하여 초기수로이며, Fig. 2(b)는 홍수터에 알팔파를 파종한 후 7일이 경과된 모습이다. 홍수터는 식생으로 덮여 있으며, 저수로에는 식생이 없는 상태로 유지되고 있다. 실내 실험실은 알팔파가 성장하는데 필요한 빛이 제한되어 있으므로, 150 watts 전구를 10개 설치하여 식생이 자라는데 필요한 빛을 공급하였다. 실내실험을 하기 위한 알팔파의 줄기 길이는 4.8 cm이고, 뿌리의 길이는 2.0 cm이며, 총 길이는 6.8 cm이었다. 잎은 평균 3~4장이었으며, 자름이 약 1 mm 이었다(Jang, 2013).

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도 지형변화

하도식생은 하안의 안정성을 증가시키고, 사주의 거동과 하천의 지형변화에 영향을 준다. 따라서 교호사주의 거동과 지형변화의 상호관계를 이해하기 위해서는 하안의 안정성을 파악하는 것이 중요하다(Jang and Shimizu, 2005).

Fujita and Muramoto (1982)는 대형수로를 이용한 실내 실험을 수행하여 수리학적 조건의 변화에 의한 교호사주의 거동과 하도의 지형변화 과정을 분석하였다. 초기 직류하천에서 하안침식이 발생하고 하폭이 증가하면서 하상에서 교호사주가 발달한다. 교호사주는 하류로 이동하면서 좌우로 번갈아가며 선택적으로 수충부를 형성하고, 하안침식을 일으킨다. 하

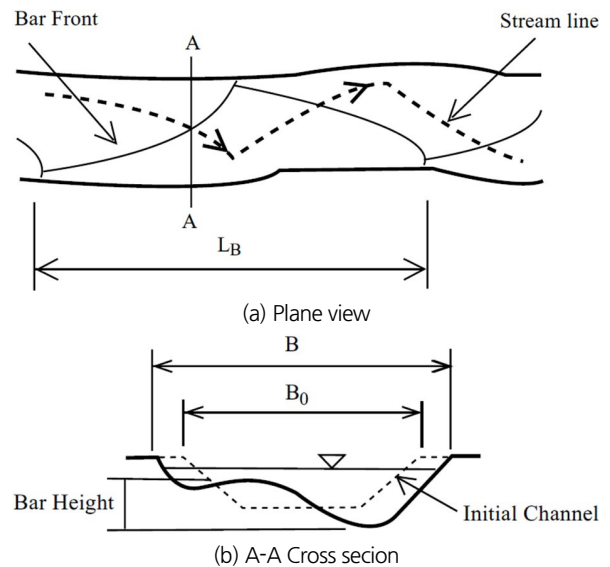


Fig. 3. Sketch used to define an alternate bar with erodible banks (Jang and Shimizu, 2007)

폭이 넓어지고 수심이 상대적으로 얕아서 하폭 대 수심의 비가 증가하면, 교호사주가 망상하천으로 변하는 등 수리학적 조건에 의하여 사주의 형상이 결정된다. 본 연구에서는 식생 밀도의 변화에 의한 하안침식과 하안의 안정성 변화, 교호사주의 이동속도와 무차원한계소류력의 관계, 교호사주 파장과의 관계를 실험을 통하여 분석하였다. 침식성 하안이 있는 하도에서 교호사주의 정의는 Fig. 3과 같다.

Fig. 4는 Run-3에 대한 하도의 시간적 변화 과정을 보여주고 있다. 하도의 홍수터는 식생(alfalfa)으로 덮여 있으며, 교호사주는 저수로에서 발달되었다. 실험 및 수치계산에 의하여 하상에서 발달한 사주의 형상 특성을 분석할 때, 사주의 모드(mode)를 분석하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 교

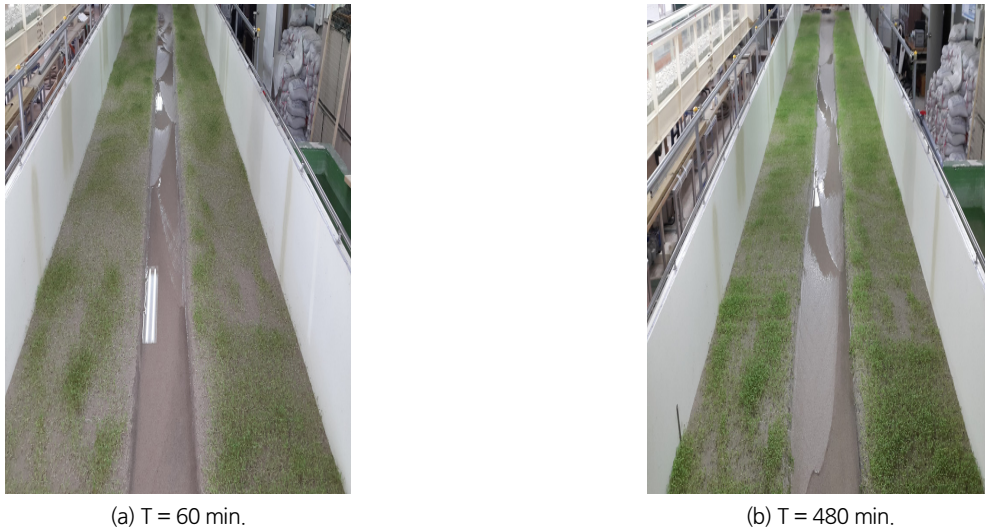


Fig. 4. Temporal change of the channel for Run-3. Flow is from top to down

호사주의 모드를 객관적으로 판단할 수 있는 2중 푸리에 해석에 의하여 실험 결과를 분석하였다. 실험 결과를 통하여 얻은 하상 형상을 다양한 하상파(wave)를 선형화하여 2중 푸리에 해석을 하여 표현하는 것이 가능하다. 2중 푸리에 해석을 통하여 얻은 각 파의 진폭 성분을 분석하여 모드 특성을 이해하게 된다. 2중 푸리에 변환을 할 때에 종횡단 방향에 1 파장의 자료를 계산하며, 횡단방향에서는 유로의 반파장 자료를 반대방향으로 굴절시키고, 하폭을 B라면 2B까지 자료가 있다고 가정하여 계산을 한다(Hasegawa, 1984; Jang, 2013).

해석을 하는 하상 형상의 흐름 방향(s)에 대한 1 파장의 길이를 L, 횡단방향(n)에 관해서 유로의 1/2에 대한 자료를 양측에 반대방향으로 굴절시킬 때의 길이를 기준파장 Y로 한다. 평균 수심을 H라 하고, 하상고와 평균 하상고의 차를 $\tilde{\eta}$ (중력이 작용하는 방향을 +로 함)라 하고, $\tilde{\eta}$ 를 H로 나눈 무차원 하상고 η 로 하상형상을 나타낸 계산식은 다음과 같다(Hasegawa, 1984). i 는 물이 흘러 내려가는 방향의 계산점이고, j 는 횡단방향의 계산점이다. 하상고를 2중 다항식으로 표시하면 다음과 같다.

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

Eq. (1)을 2중 푸리에 급수 전개를 위하여 흐름방향(s)에 대하여 2M으로 분할하고, 횡단방향(n)에 대하여 2K로 분할하여 나타내면 다음과 같다.

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

Eq. (4) 중에서 계수 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} 를 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 를 다음 진폭 성분을 구하는 식으로 대입한다.

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

하도의 지형변화에 정량적으로 분석하기 위하여 2중 푸리에 해석에 의한 하상 파(wave)의 분포와 지배적인 성분(mode)의 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. 1-1 모드는 1차 횡방향 모드로써 횡방향으로 1개의 사주가 형성된 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 모드와 2-2 모드는 2차 횡방향 모드로써 횡방향으로 2개의 사주가 형성된 중앙 사주(central bars)를 나타낸다. 1-3 모드와 2-3 모드는 한 단면에서 횡방향으로 3개의 사주가 형성된 것(triple bars)을 나타낸다(Jang, 2013).

Fig. 5는 식생의 밀도가 변함에 따라 시간의 변화에 따른 하상파의 지배적인 무차원 진폭(1-1 모드) 특성을 보여주고 있다. 무차원 진폭은 각 실험조건 하에서 식생의 밀도가 큰 Run-3가 Run-1과 Run-2보다 큰 것을 보여주고 있다. 홍수터에 식생이 없는 Run-1에서 240 min까지 무차원 진폭이 일정하게 유지되지만, 300 min 부터는 진폭이 감소한다. 이는 시간이 증가하

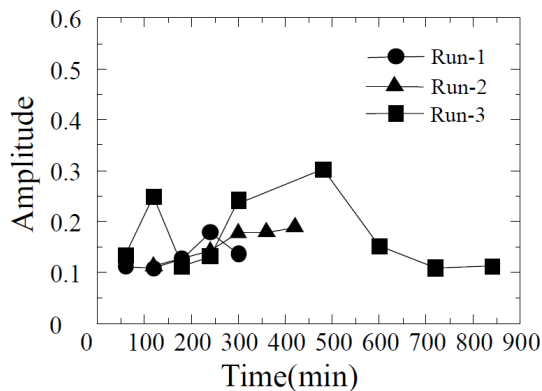


Fig. 5. Dominant amplitude of modes with time for each run

면서 하폭이 증가하면 사주의 파고가 감소하기 때문이다. Run-2에서 진폭은 300 min 까지 증가하지만, 그 이후부터 일정하게 유지하고 있다. 식생의 밀도가 상대적으로 높은 Run-3에서 진폭은 500 min까지 증가와 감소를 반복하며 우상향하지만, 그 이후부터 0.1까지 감소한다.

Fig. 6은 Run-2조건에서 시간의 변화에 대한 사주의 이동과 하도의 변화 과정을 보여주고 있다. 초기 직류하도에서 하안 침식으로 하폭이 증가하고, 120분 후에서 저수로에서 교호사주가 발달하였다. 시간이 증가하면서 사주는 하류로 이동한다. 이때, 사주에 의해 유선이 굽어지면서 하안에서 흐름이 집중되면서 수층부가 형성된다. 이로 인하여 하상과 하안이 침식되며, 하도의 평면형상은 직류하천에서 사행도가 작은 사행하천으로 발달하였다. 이러한 과정은 식생이 없는 하도를 대상으로 실험적 연구(Fujita and Muramoto, 1982), 이론적 연구(Colombini et al., 1987)뿐만 아니라, 홍수터 식생을 고려한 교호사주의 거동을 수치실험을 통한 연구(Jang and Shimizu, 2005) 로 입증되었다.

Fig. 7은 시간의 변화에 대한 하안침식율을 보여주고 있다. 하안침식율은 초기 하폭에 대한 해당 시간의 하폭 변화의 비로 정의된다. 홍수터에 식생이 없는 Run-1에서 시간이 증가함에 따라 하안 침식율이 크게 증가한다. 그러나 홍수터 식생 밀도가 상대적으로 낮은 Run-2에서 하안침식율은 Run-1보다 작다. 식생밀도가 상대적으로 높은 Run-3에서 하안침식율은 200 min까지 일정하게 증가하지만, 그 이후부터 하안침식율은 거의 일정하게 유지되고 있다. 이는 식생의 밀도가 증가함에 따라, 하안침식율이 감소하는 것을 의미한다. 왜냐하면, 식

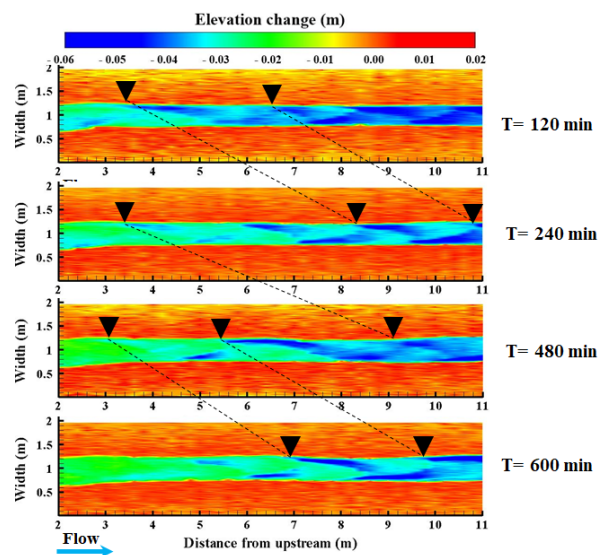


Fig. 6. Bar migration in the channel for Run-2. The black triangles indication the bar front in the left bank and flow is left to right

생의 뿌리는 하안 재료를 뿌리로 엮어서 침식에 저항하고 하안 안정성을 강화시킨다(Jang and Shimizu, 2005). 또한 하안 부근에서 흐름에 대한 저항을 증가시키고, 이는 하안 주변에서 흐름에 영향을 준다. 더욱이 식생에 의한 하안의 조도는 하안 주변의 유속을 감소시키고, 이차류의 형성과 강도에 영향을 준다. 이는 전단응력을 감소시키고, 하안의 안정성을 증가시킨다(Thorne and Furbish, 1995).

Fig. 8은 시간의 변화에 대한 유사 유출량을 보여주고 있다. 유사 유출량은 상류에서 유입되는 유사량의 변화, 사주의 이동이나 하안침식과 하도의 변화에 의해 영향을 받으므로, 유사 유출량의 변화와 그 특성을 파악하는 것이 중요하다(Defina, 2003). 홍수터에 식생이 없는 Run-1의 경우, 시간의 변화에 따라 유사 유출량의 증가와 감소가 규칙적인 변동성을 보이고 있으며, 300분 이후부터는 감소하는 특성을 보인다. Run-2도 Run-1과 같이 유사 유출량은 규칙적인 변동성을 보이지만, 300분 이후부터는 증가하는 경향을 보인다. Run-3에서 유사 유출량은 전체적으로 증가하거나 감소하지 않고 규칙적인 변동성을 보인다. 이와 같이 유사 유출량이 규칙적인 변동성을 보이는 것은 하안침식이 크지 않거나, 하폭의 변화가 일정하며(Fig. 7), 저수로에서 발달한 교호사주가 일정한 크기와 형상을 유지하며 유출되기 때문이다(Hoey and Sutherland,

1991).

직류하천에서 하폭의 변화나 수리구조물에 의해 사주를 압박해서 이동을 방해하는 강제효과가 없으면, 교호사주의 이동 특성은 하폭 대수심의 비나 무차원전단응력에 영향을 받는다. 사주의 이동속도가 감소하면 사주의 선단부에 의해 흐름의 방향이 변하여 수층부가 형성되고 하안침식량이 증가하고 하폭이 변하게 된다. 또한 하천의 곡률이 증가하여 하천의 지형이 변하게 된다(Bertoldi and Tubino, 2005). Fig. 9는 시간의 변화에 따른 사주의 이동속도를 보여주고 있다. 사주의 이동속도는 시간이 증가함에 따라 감소하고 있다. 그러나 Run-3은 480 min 이후부터 사주의 이동속도가 일정하게 유지되고 있다. 이는 홍수터 식생에 의해서 하안의 안정성이 증가하였으며, 하폭이 일정하게 유지되어 하폭 대수심의 변화가 거의 변화가 없기 때문에 판단된다. 사주의 이동속도는 Run-1이 가장 느리고, 식생의 밀도가 상대적으로 높은 Run-3가 가장 빠른 특성을 보여주고 있다. 즉, 홍수터 식생의 밀도가 증가함에 따라 사주의 이동속도는 증가하며, 이는 Jang and Shimizu (2005)의 수치모의 연구와 일치한다. Fig. 8은 또한 사주의 이동속도는 하안의 안정성에 의한 영향을 받는 것을 나타낸다.

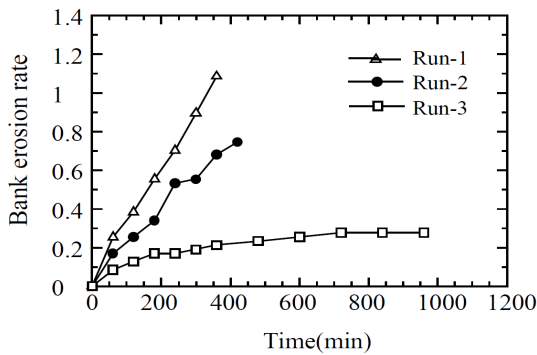


Fig. 7. Bank erosion rate with time for each run

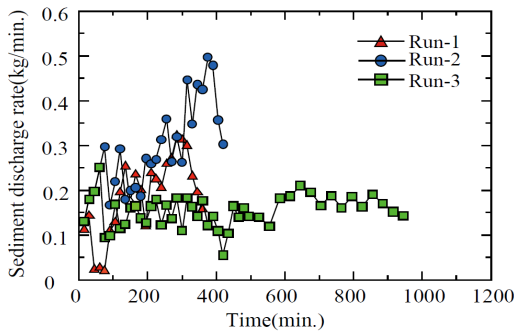


Fig. 8. Sediment discharge with time for each run

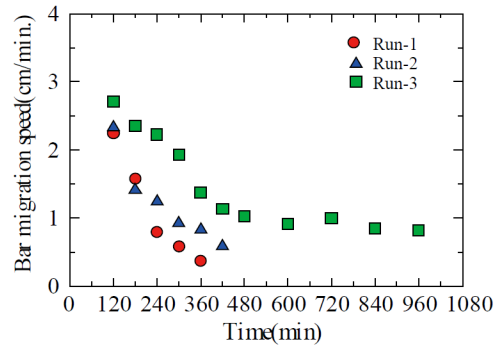


Fig. 9. Bar migration speed with time for each run

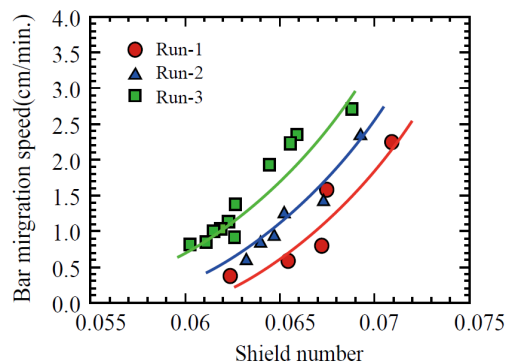


Fig. 10. Bar migration speed is plotted against shield number for each run

사주의 거동을 파악하기 위하여 소류사의 이동을 나타내는 매개변수인 무차원전단응력(Shield Number)과 사주의 이동속도를 분석하였으며(Fig. 10), 무차원전단응력은 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{hi}{sd} \tag{10}$$

여기서 γ 는 물의 단위중량이고, γ_s 는 유사의 단위중량이다. d 는 하상토의 입경크기이고, τ_o 는 하상전단응력이다. i 는 에너지 경사이고 h 는 수심이다. 그리고 s 는 유사의 수중비중이다.

Shield Number가 증가함에 따라 사주의 이동속도는 증가한다(Fig. 10). 더욱이, 사주의 이동속도는 Run-3에서 가장 큰 값을 보여준다. 이것은 이동하는 교호사주와 하안에 작용하는 약한 강제효과, 상대적으로 깊은 수심에 의한 하상에 작용하는 전단응력, 그리고 하안침식이 작기 때문에 발생하는 하폭의 작은 변화에 의하여, 식생의 밀도가 큰 하도에서 하안의 안정성이 크고 사주는 빠르게 이동하는 것을 의미한다. Bertoldi and Tubino (2005)는 실내실험을 통하여 사주의 이동속도에 대한 하천의 평면변화에 영향을 주는 하안침식률의 비에 의해 결정되는 강제효과를 설명하였다. 사주의 이동속도에 대한 하안침식률의 비가 상대적으로 작을 때, 하도 평면의 불규칙하여 발생한 강제효과가 강하게 작용한다. 반대로, 사주의 이동속도에 대한 하안침식률의 비가 상대적으로 클 때, 강제효과는 상대적으로 작다.

Fig. 11은 사주의 파장에 대한 사주의 이동속도 변화를 보여주고 있으며, 사주의 파장이 증가하면 사주의 이동속도는 감소한다. Fujita and Muramoto (1982)의 실험연구는 이러한 특성을 보여주고 있다. 더욱이, Seminara and Tubino (1989)는

초기 직류하도에서 하안침식과 사주의 발달과정을 이론적으로 설명하였으며, 하안침식에 의해 하폭이 증가하면 사주의 이동속도는 감소하고, 이는 사주의 파장의 변화에 영향을 주며, 사주의 파장이 증가한다. 따라서 본 실험 결과는 Seminara and Tubino (1989)의 이론적인 예측 결과와 잘 일치한다. 또한 Jang and Shimizu (2005)의 수치모의 결과와도 잘 일치한다. 홍수터에 식생이 있으면, 사주의 파장이 증가한다. 그러나 식생밀도의 변화에 의한 파장의 차이는 크지 않다.

4. 결론

본 연구에서는 홍수터 식생에 의하여 하안의 안정성이 변화되었을 때, 하도에서 교호사주의 거동을 실내실험을 수행하여 분석하였다. 실내실험은 길이 12 m, 폭 2 m로 주문 제작된 수로에서 밀변이 0.3 m 이고, 깊이가 0.05 m 이고, 하안의 횡단측면 경사가 45도인 복단면 저수로로 만들었으며, 수로 경사는 1/200로 설정하였다. 수리학적 조건은 저수로에서 교호사주가 발생할 수 있도록 설정하였다. 홍수터에서 실제 식생인 알팔파를 성장시켰으며, 식생밀도는 씨앗 포설량으로 조절하였다. 식생의 밀도가 증가하였을 때, 하안침식률은 감소하였다. 시간이 증가함에 따라, 사주의 이동속도는 감소하였다. 이는 시간이 증가함에 따라 사주와 하도의 변화과정에서 비선형성이 증가하기 때문이다. 초기 직류하도에서 하안침식이 발생하고 하폭이 증가하면, 수심이 감소한다. 하폭대 수심의 비가 사주를 발달할 수 있는 한계값까지 증가하면, 교호사주가 발달하고, 시간이 증가하면서 하류로 이동한다.

식생의 밀도가 증가함에 따라 사주의 이동속도는 증가한다. 이는 하안의 안정성에 사주의 이동속도에 영향을 주기 때문이다. 무차원소류력인 Shield Number가 증가하면서 사주의 이동속도가 증가한다. 교호사주와 하안 사이에 작용하는 강제효과 때문에 하안의 안정성이 큰 하도에서 사주의 이동속도가 빠르다. 즉, 하안의 안정성이 증가하면, 하안침식률이 감소하고, 하폭대 수심의 비는 감소하여 하상전단응력이 증가하며 사주의 이동속도가 빠르다. 시간이 증가함에 따라 사주의 파장은 증가한다. 그리고 홍수터에 식생이 있으면, 사주의 파장이 증가한다. 사주의 파장이 증가하면서 사주의 이동속도는 감소한다. 하폭이 증가하며, 사주의 이동속도는 감소하고 사주의 파장은 증가한다. 홍수터 식생은 하도의 안정성을 증가시켜서 하안침식과 하폭 변화에 영향을 주며, 사주의 이동과 파장에 영향을 준다.

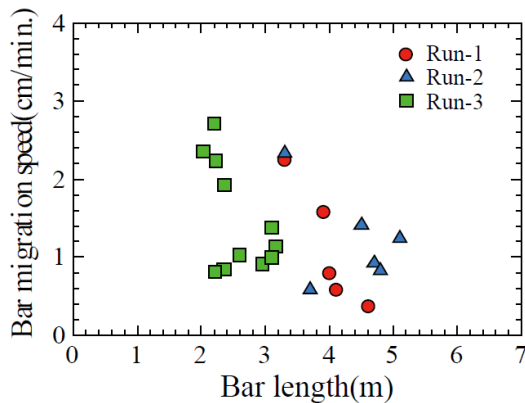


Fig. 11. Migration speed versus wavelength of bars. The trend lines are almost identical

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R111A3048276).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Asahi, K., Shimizu, Y., Nelson, J., and Parker, G. (2013). "Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks." *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, Vol. 118, pp. 2208-2229.
- Bertoldi, W., and Tubino, M. (2005). "Bed and bank evolution of bifurcation channels." *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 7, W07001. doi: 10.1029/2004WR003333.
- Bertoldi, W., Siviglia, A., Tettamanti, S., Toffolon, M., Vetsch, D., and Francalanci, S. (2014). "Modeling vegetation controls on fluvial morphological trajectories." *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, No. 20, pp. 7167-7175. doi: 10.1002/2014GL061666.
- Bywater-Reyes, S., Diehl, R.M., and Wilcox, A.C. (2018). "The influence of a vegetated bar on channel-bend flow dynamics." *Earth Surface Dynamics*, Vol. 6, pp. 487-503. doi: 10.5194/esurf-6-487-2018.
- Choi, S.U., Yoon, B.M., Woo, H., and Cho, K.H. (2004). "Effect of flow-regime change due to damming on the river morphology and vegetation cover in the downstream river reach: A case of Hapchon dam on the Hwang River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 1, pp. 55-66.
- Colombini, M., Seminara, G., and Tubino, M. (1987). "Finite-amplitude alternate bars." *Journal of Fluid Mechanics*, 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 Resources Research*, Vol. 45, No. 3, W03424. doi: 10.1029/2008WR007242.
- Crosato, A., and Samir Saleh, M. (2011). "Numerical study on the effects of floodplain vegetation on river planform style." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 36, No. 6, pp. 711-720. doi: 10.1002/esp.2088.
- Defina, A. (2003). "Numerical experiments on bar growth." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 4, 1092.
- Eaton, B.C., and Giles, T.R. (2009). "Assessing the effect of vegetation-related bank strength on channel morphology and stability in gravel-bed streams using numerical models." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, No. 5, pp. 712-724. doi: 10.1002/esp.1768.
- Fujita, Y., and Muramoto, Y. (1982). "Experimental study on stream channel processes in alluvial rivers." *Bulletins - Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.*, Vol. 35, No. 314, pp. 55-86.
- Gran, K., and Paola, C. (2001). "Riparian vegetation controls on braided stream dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 12, pp. 3275-3283.
- Hasegawa, K. (1984). *Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers*, Ph.D. Dissertation, Hokkaido University, Japan.
- Hoey, T.B., and Sutherland, A.J. (1991). "Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: A laboratory study." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 16, pp. 447-462.
- Jang, C.-L. (2013). "Experimental analysis of the morphological changes of the vegetated channels." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 9, pp. 909-919.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2005). "Numerical simulations of the behavior of alternate bars with different bank strengths." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, No. 6, pp. 595-611.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2007). "Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, No. 6, pp. 763-772.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2010). "Numerical simulation of sand bars downstream of Andong Dam." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 30, No. 4B, pp. 379-388.
- Kim, W., and Kim, S. (2019). "Analysis of the riparian vegetation expansion in middle size rivers in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. S-2, pp. 875-885.
- Kondolf, G.M., and Wolman, M.G. (1993). "The sizes of salmonid spawning gravels." *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 2275-2285.
- Lee, T.H., and Kim, S.H. (2021). "Analysis of changes in cross section and flow rate due to vegetation establishment in Naeseong stream." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 3, pp. 203-215.
- Lopez, M., and Garcia, M. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open channel flow through non-emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, pp. 392-402.
- Nepf, H.M. (2012). "Hydrodynamics of vegetated channels." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 50, No. 3, pp. 262-279. doi: 10.1080/00221686.2012.696559.
- Nepf, H.M., and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structures in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. C12, pp. 28547-28557.
- Seminara, G., and Tubino, M. (1989). "On the process of meander formation." *Fourth International Symposium on River Sedimentation*, Beijing, China.
- Tal, M., and Paola, C. (2007). "Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation." *Geology*,

- Vol. 35, No. 4, pp. 347-350. doi: 10.1130/G23260A.1.
- Thorne, S.D., and Furbish, D.J. (1995). "Influences of coarse bank roughness on flow within a sharply curved river bend." *Geomorphology*, Vol. 12, No. 3, pp. 241-257. doi: 10.1016/0169-555X(95)00007-R.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial processes in streams with vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 106, No. 6, pp. 789-803.
- Vargas-Luna, A., Crosato, A., and Uijttewaal, W.S.J. (2015). "Effects of vegetation on flow and sediment transport: Comparative analyses and validation of predicting models." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, No. 2, pp. 157-176. doi: 10.1002/esp.3633.
- Vargas-Luna, A., Duró, G., Crosato, A., and Uijttewaal, W. (2019). "Morphological adaptation of river channels to vegetation establishment: A laboratory study." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 124, No.7, pp. 1981-1995. doi: 10.1029/2018JF004878.