



Experimental analysis of meandering channel development processes with floodplain vegetation

Jang, Chang-Lae^{a*}

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

Paper number: 23-089

Received: 29 October 2023; Revised: 24 November 2023; Accepted: 24 November 2023

Abstract

This study investigates the impact of riparian vegetation in the floodplain on channel stability, changes in bend curvature, and meandering channel migration. In channels with riparian vegetation, over time, meander width remains relatively constant, but selective bank erosion leads to meander development and downstream movement. During this process, bank erosion and changes in the riverbed are not significant, and the channel maintains relatively constant conditions with reduced sediment discharge and minimal variability. As the density of vegetation increases, bank erosion rates decrease. The erosion rates along the riverbanks increase with the density of vegetation on the floodplain, thus affecting the development of meanders. This factor notably contributes to enhancing riverbank stability and influencing channel changes through floodplain vegetation. Bank erosion rates and dimensionless bend curvature are greatest when there is no riparian vegetation but decrease in conditions with vegetation. Furthermore, the relationship between lateral migration rate and dimensionless bend curvature is similar to that of bank erosion rates. Therefore, riparian vegetation enhances channel stability, influencing bank erosion, meander curvature, and meander migration.

Keywords: Vegetation, Bank erosion, Meandering, Bend curvature, Meander migration

홍수터 식생에 의한 저수로 사행 발달과정 실험적 분석

장창래^{a*}

^a국립한국교통대학교 건설환경도시교통공학부 사회기반공학전공 교수

요 지

본 연구에서는 실내실험을 수행하여 홍수터 식생에 의한 하안의 안정성, 만곡부의 곡률 변화, 사행의 발달과 이동을 정량적으로 분석하였다. 홍수터에 식생이 있는 하도는 시간이 증가하면서 사행의 하폭이 일정하게 유지하지만, 선택적인 하안침식에 의해 사행이 발달하고 하류로 이동하였다. 이러한 과정에서 하안침식과 사주의 변화가 크지 않으며, 저수로가 일정하게 유지되면서 유사유출량은 감소하고 변동성이 거의 없이 일정하게 유지되고 있다. 식생의 밀도가 증가함에 따라, 하안침식률이 감소하였다. 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안침식률이 감소하였고, 사행의 발달에 영향을 주었다. 이는 홍수터 식생이 하안의 안정성을 증가시키고, 하도의 평면변화에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나임을 의미한다. 하안침식률과 무차원 곡률반경은 홍수터에 식생이 없는 조건에서 가장 크고, 식생이 있는 조건에서는 작다. 또한 상대 측방이동률과 무차원 곡률반경도 하안침식률과의 관계가 유사하는 특성을 보였다. 따라서 홍수터 식생은 하도의 안정성을 증가시켜서 하안침식과 사행의 발달뿐만 아니라, 사행의 곡률 변화와 이동에 영향을 준다.

핵심용어: 하도식생, 하안침식, 사행, 사행곡률, 사행 이동

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

1. 서론

사행하천은 주변에서 흔한 하천의 지형이지만, 사행하천을 지속시키는데 필요한 조건은 아직 분명하게 밝혀지지 않았다. 일반적으로 사행하천은 사행의 만곡부가 측방행으로 이동하고 사행의 진폭이 증가해서 사행도가 큰 특징이 있다. 사행하천의 만곡부는 하안침식이 발생하고 이동하면서 발달하거나 사멸하는 과정을 거친다(Camporeale *et al.*, 2005). 사행은 하상 경사, 하상토 입경크기, 하안의 안정성, 그리고 유사의 공급에 영향을 받는다.

하천의 사행이 유지되기 위해서는 만곡부의 내측과 외측이 일정한 비율로 이동해야 하며, 만곡부 내측에서 퇴적과 만곡부 외측에서 침식이 거의 같은 속도로 유지하는 과정이 필요하다. 그럼에도 불구하고, 지금까지 이러한 물리적 과정은 거의 밝혀지지 않았다. 하안침식은 만곡부의 이동에 중요하며(Kleinhans, 2010), 이는 하안의 안정성 혹은 강도(strength)에 의해 영향을 받는다. 사행하천에서 만곡부 이동률(bend migration rate)은 만곡부의 사행이 클수록 증가한다. 점착성 재료로 구성된 홍수터가 있는 하천은 사행하천으로 발달하지만, 비점착성 재료로 구성된 홍수터로 구성된 하천은 하폭이 증가하면서 망상하천으로 발달하게 된다(van Dijk *et al.*, 2013; Ielpi, *et al.*, 2022). 홍수터 식생은 하안의 안정성을 증가시키고 하폭 대 수심의 비를 작게 유지하는 중요한 역할을 한다. Braudrick *et al.* (2009)은 대형수로를 이용한 실내실험을 수행하여 홍수터 식생에 의한 사행하천의 발달 과정을 분석하였다. 상류에서 유입되는 부유사는 식생이 있는 홍수터에 퇴적되고, 하안의 안정성이 증가되어, 저수로의 사행이 유지되었다. 시간이 증가되면서 사행하천은 발달하고 만곡부의 사행은 증가하였다. 더욱이 홍수터 식생이 하안의 안정성을 증가시켜서 저수로에서 사행을 지속시키는 것으로 파악되었다. Zhu *et al.* (2022)은 남북아메리카 대륙의 주요 사행하천을 대상으로 경작지, 초지, 삼림에 의한 홍수터 안정성과 사행도(sinuosity)에 미치는 영향을 분석하고, 그 특성에 따라 사행하천을 분류하였다. 그들은 초지에서 사행하천의 사행도는 크지만, 하상경사가 완만하며, 층상 하안으로 구성되었다. 삼림 지대에서 사행하천보다 만곡부의 이동률이 작다는 것을 파악했다. Kleinhans *et al.* (2018)은 수치모형을 이용하여 흐름의 저항, 유사의 이동, 점토와 실트 등 점착성 유사의 식생대에서의 퇴적, 식생의 성장과 소멸 등을 고려한 홍수터 안정성을 고려한 사행하천의 발달과정을 분석하였다. 그러나 이들 모형은 시간축적을 100년이상으로 설정하고, 하안침식과 퇴적도의 알고리즘이 단순화되어 있어서 물리적 특성을 명확하게

반영하기에는 한계가 있다. 또한 이들 연구는 실제 식생을 적용하여 하안의 안정성뿐만 아니라 하안침식에 의해 사주에 작용하는 강제효과(forcing effect)를 고려하여 만곡부의 거동을 입증할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 대형 수로에서 실제 식생인 알팔파를 성장시켜서, 홍수터 식생에 의한 하안의 안정성, 만곡부의 곡률 변화와 사행의 발달 과정, 그리고 하도변화를 정량적으로 해석하고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

본 실험은 주문 제작된 수로인 길이 12 m, 폭 2 m인 가변형 경사수로에서 수행하였다(Fig. 1(a)). 본 실험을 위해 복단면 이동상수로가 필요하며, 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 유도하였다. 사행하천을 발달시키기 위해서 초기에 상류에 교란을 발생시키는 것이 중요하다(van Dijk *et al.*, 2012). 따라서 실험 초기에 저수로에서 사행을 발달시키기 위하여, 가변형 경사수로 유입구에 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. 유사 유입량은 예비실험을 수행하여 미리 정량적으로 산정하였으며, 수동으로 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. 실내실험에 사용된 유사의 평균입경은 0.8 mm 이다. 스티로폼로 일정한 크기의 추적자를 만든 후, 촬영할 측정할 구간에 50 mm × 50 mm 격자를 만들어서 수면에서 5 cm 정도 높이로 설치한 후, 디지털 카메라로 촬영하였다. 촬영한 정사영상의 왜곡도를 보정하고, 추적자의 자취를 측정하였다. 그 후, 카메라의 셔터 속도를 고려하여 표면유속을 산정하고, 유속을 분석하였다.

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 만든 후(Fig. 1(a)), 홍수터 식생하도를 형성하기 위하여 알팔파 씨앗(alfalfa seed)을 균일하게 홍수터 전체에 Table 1의 조건에 따라 뿌린다. Run-1은 홍

수터에 식생이 없는 조건이며, Run-2와 Run-3는 각각 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,

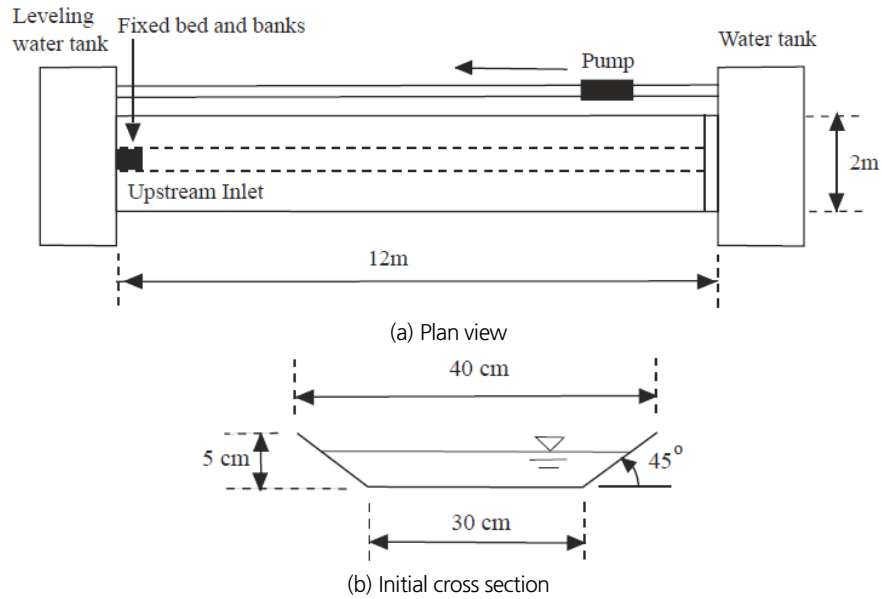


Fig. 1. Sketch of experimental setup (Jang, 2022)

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)	Run Time (minutes)	Remarks
Run-1	2.5	1/200	0.87	0.8	0.0	360	w/o
Run-2	2.5	1/200	0.87	0.8	0.3	900	w/veg
Run-3	2.5	1/200	0.87	0.8	0.6	400	w/veg



(a)



(b)

Fig. 2. Vegetated channel for Run-3; (a) the initial channel before seeding alfalfa. Run time was 60 minutes. (b) vegetated channel after 7 days of seeding alfalfa in the channel with floodplain. Flow is from top to down

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 알팔파 파종 후의 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 자라는 데 필요한 빛을 공급하였다. 실내실험을 하기 위한 알팔파의 줄기 길이는 4.8 cm 이고, 뿌리의 길이는 2.0 cm이며, 총 길이는 6.8 cm이었다. 잎은 평균 3~4장이었으며, 지름이 약 1 mm 이었다(Jang, 2013).

본 실험에서 Run-1과 2는 하도변화에 의해 하안침식이 진행되어 저수로가수로 측벽에 도달하기 전까지 계속되었다. 그러나 Run-3은 홍수터 식생밀도가 높아서 저수로 변화가 크지 않고 안정되어, 저수로가수로 측벽에 도달하지 않았지만, 저수로 변화가 거의 없을 때까지 진행되었다.

3. 실험결과

3.1 하도의 지형변화

하도식생은 하안의 안정성을 증가시키고, 하천의 지형변화에 영향을 준다. 하안의 안정성이 크지 않으면, 하안침식의 침식률이 높아, 직류하천에서 망상하천으로 발달하며, 홍수터 식생에 의해 하안의 안정성이 높으면, 하안침식을 낮고 자유사행이 발달하지 않는다. 따라서 사행의 발달과 지형변화의 상호관계를 이해하기 위해서는 하안의 안정성을 파악하는 것이 중요하다(Jang and Shimizu, 2005; Zhu *et al.*, 2022).

본 실험에서 초기 직류하천에서 하안침식이 발생하고 하

폭이 증가하면서 하상에서 교호사주가 발달하였다. 교호사주는 하류로 이동하면서 좌우로 번갈아가며 선택적으로 수충부를 형성하고, 하안침식을 일으킨다. Fig. 3은 Run-2에 대하여 시간의 변화에 대한 사행의 발달과정을 보여주고 있다. 상류에서 유입되는 유사는 식생이 있는 사주 상부에 퇴적되고, 저수로의 사행이 유지되었다. 시간이 증가되면서 사행하천은 발달하고(Fig. 3(a)), 780 min 이후에도 만곡부의 사행은 증가하였다(Fig. 3(b)). 사행의 발달과정에 영향을 주는 것은 하폭 대수심이 작고 사행이 유지되는 하천의 존재, 하안의 구성재료와 식생에 의한 하안의 안정성, 사주의 거동, 만곡부 곡률변화를 등이다(van Dijk *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2022).

3.2 저수로 사행의 발달과정

Fig. 4는 홍수터에서 식생의 밀도에 따른 대한 저수로의 변화 과정을 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서 보여주고 있는 것처럼, 홍수터에 식생이 없는 Run-1 조건에서 초기 직류하도에서 하안침식으로 하폭이 증가하고, 120분 후에 저수로에서 교호사주가 발달하였다. 시간이 증가하면서 사주는 하류로 이동하였다. 이때, 사주에 의해 유선이 굽어지면서 하안에서 흐름이 집중되면서 수충부가 형성된다. 이로 인하여 240분 후에 하상과 하안이 침식되며, 하도의 평면형상은 직류하천에서 사행도가 작은 사행하천으로 발달하였다. 이러한 하도변화 과정은 식생이 없는 하도를 대상으로 실험적 연구(Fujita and Muramoto, 1982)와 이론적 연구(Colombini *et al.*, 1987), 그리고 홍수터 식생을 고려한 교호사주의 거동을 수치실험을 통한 연구(Jang and Shimizu, 2005) 등과 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 360분 후에 저수로 하폭은 구간별로 선택적으로 증가하고 사행의 만곡부가 발달하며, 8 m 지점에서 chute-



(a) T = 540 min



(b) T = 780 min

Fig. 3. Temporal change of the channel for Run-2. Flow is from top to down

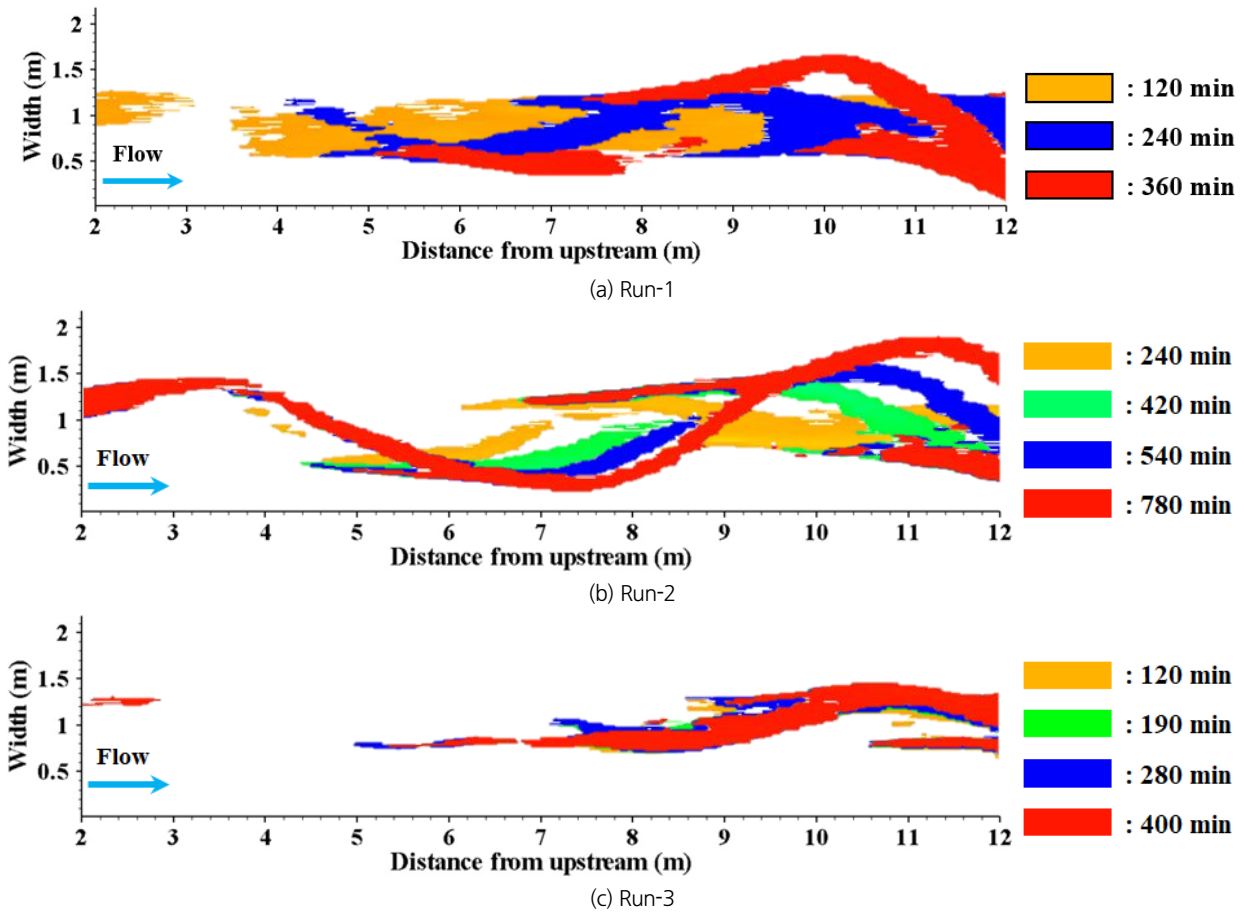


Fig. 4. Lower channel migration for each run. These colors are lower channels with each time indicated in legends

cutoff가 발달하였다.

Fig. 4(b)는 홍수터에 식생이 있는 Run-2의 조건에서 사행의 발달과정을 보여주고 있다. 초기 직류하도에서 사행의 발달과정은 Run-1에서 나타난 과정에 따라 저수로 및 사행이 발달하였다. 240분 후에 하안이 침식되며, 하도의 평면형상은 직류하천에서 사행도가 작은 사행하천으로 발달하였다. 420분 후에 저수로 하폭은 구간별로 선택적으로 증가하고 사행의 만곡부가 발달하며, 4 m 지점에서 좌안으로 만곡부가 이동하였다. 540분 후에는 저수로 폭이 일정하게 유지되면서, 7.5 m 지점과 10.5 m 지점에서 만곡부 사행이 크게 발달하고 수층부가 형성되면서 하류로 이동하였다. 사행의 만곡부는 7.5 m 지점에서 하류로 이동한 것보다 10.5 m 지점에서 하류로 이동하였다. 이러한 과정은 780분 후에도 지속되었다, 특히 9.5 m 지점에서 상류에서 유입되어 흐른 유량이 합류 되는 과정이 보여주고 있다.

Fig. 4(c)는 홍수터에 식생의 밀도가 높은 Run-3의 조건에서 사행의 발달과정을 보여주고 있다. 초기 직류하도에서 사

행의 발달과정은 Run-1에서 나타난 과정에 따라 저수로 및 사행이 발달하였다. 120분 후에 하안이 침식되며, 하도의 평면형상은 직류하천에서 사행도가 작은 사행하천으로 발달하였다. 400분 후에도 120분에 발달한 사행과정이 일정하게 유지되며 변화가 거의 발생하지 않았다.

3.3 유사의 유출특성

Fig. 5는 시간의 변화에 대한 유사 유출량을 보여주고 있다. 유사 유출량은 상류에서 유입되는 유사량의 변화, 사주의 이동이나 하안침식과 하도의 변화에 의해 영향을 받으며, 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 있다. 특히, 120분과 300분에서 유사유출량이 가장 많으며, 이는 하안침식과 사주의 변화가 활발하게 일어나기 때문이다. 300분 이후부터는 감소하는 특성을 보인다. Run-2도 Run-1과 같이 유사 유출량은 규칙적인 변동성을 보이지만,

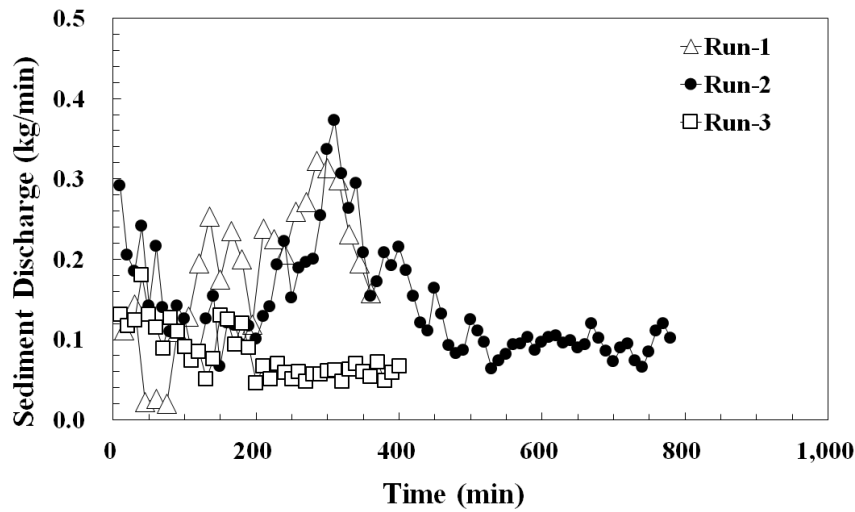


Fig. 5. Sediment discharge with time for each run

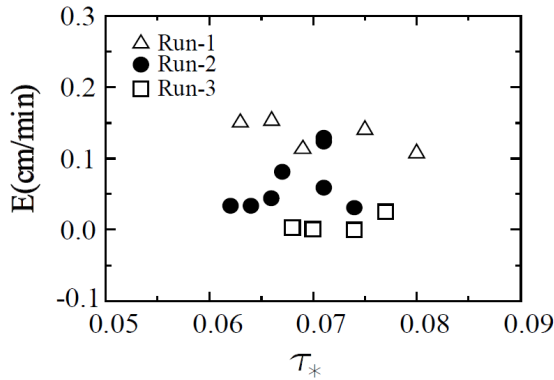


Fig. 6. Bank erosion rate with dimensionless tractive force for each run

300분 이후부터는 증가하는 경향을 보인다. 특히, 420분 이후부터 유사유출량은 적고 변동성이 거의 없이 일정하게 유지되고 있다. 이는 하안침식과 사주의 변화가 크지 않으며, 저수로가 일정하게 유지되면서 변하는 것을 의미한다. Run-3에서 유사 유출량은 전체적으로 증가하거나 감소하지 않고 규칙적인 변동성을 보인다. 이와 같이 유사 유출량이 규칙적인 변동성을 보이는 것은 하폭의 변화가 일정하며(Fig. 6), 저수로에서 하도의 변화가 크지 않고, 저수로에서 발달한 사주가 일정한 크기와 형상을 유지하며 유출되기 때문이다(Hoey and Sutherland, 1991). 그리고 사행하천의 만곡부 외측이 측방향 혹은 흐름방향으로 이동할 때, 만곡부 외측에서 하안이 침식되고 하천에서 사행도가 증가하며, 흐름에 의한 유사이동이 감소하고 유사가 저수로에 지속적으로 유입된다(van Dijk et al., 2012).

4. 실험 고찰 및 분석

4.1 홍수터 식생에 의한 하안의 안정성

사행의 발달과정에 영향을 주는 것은 하안침식률(bank erosion rate), 사주의 거동, 만곡부 곡률변화를 등이며(van Dijk et al., 2012; Zhu et al., 2022), 본 실험을 수행하여 이를 정량적으로 분석하였다. 하안침식률(E)은 초기 하폭에 대한 해당 시간의 하폭 변화의 비로 정의된다.

$$E = \frac{w_{t+1} - w_t}{dt} = \frac{dw}{dt} \tag{1}$$

여기서 w_{t+1} 는 $t+1$ 시간에 하폭(w)이고, w_t 는 t 시간에 하폭이다. dw 은 하폭의 변화이며, dt 는 시간의 변화이다.

Fig. 6은 무차원소류력(dimensionless tractive force)에 대한 하안침식률을 보여주고 있다. 무차원소류력(τ_*)은 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{hi}{sd} \tag{2}$$

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.

홍수터에 식생이 없는 Run-1에서 하안침식률은 0.15 cm/min이고, 하안침식률은 무차원소류력이 증가하여도 거의 일정하게 유지된다. 즉, 하폭이 증가하고 수심이 감소하여 무차원소류력이 감소하지만, 사주가 성장하여 흐름이 사주의 반

대쪽 하안에 수층부를 형성하고 하안침식 발생하기 때문이다. 홍수터 식생 밀도가 상대적으로 낮은 Run-2에서 하안침식률은 무차원소류력이 0.07일 때, 하안침식률이 가장 크며, 이는 사행의 만곡부에서 하안침식이 활발하게 발생하기 때문으로 판단된다. 식생밀도가 높은 Run-3에서 하안침식률은 무차원소류력이 0.075까지 일정하게 유지되지만, 그 이후부터 하안침식률은 약간 높다. 즉, 초기에 무차원소류력은 크고 하안침식률은 크지만, 시간이 증가하면서 하폭과 하안침식률이 일정한 것을 의미한다.

전체적으로 하안침식률은 식생이 없는 Run-1이 가장 크고, 식생의 밀도가 높은 Run-3가 가장 낮다. 이는 식생의 밀도가 증가함에 따라, 하안침식률이 감소하는 것을 의미한다. 왜냐하면, 식생은 하안 재료를 뿌리로 엮어서 침식에 저항하고 하안 안정성을 강화시킨다(Jang and Shimizu, 2005; Ielpi *et al.*, 2022). 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).

4.2 홍수터 식생에 의한 사행의 발달

Fig. 7은 시간의 변화에 대한 사행도(sinouity)를 보여주고 있다. 하천의 형태는 일반적으로 하천을 구성하는 하도의 수(단일하천(single channel) 혹은 다중하천(multi channel))와 사행도(sinouity) 등 2가지 특성으로 설명한다. 단일하천은 직류하천, 사행하천, 망상하천(braided) 이며(Leopold and Wolman, 1957), 다중하천은 다지하천(anastomosing channel)이다. 단일하천에서 사행하천은 일반적이며, 어느 일정한 구간에서 직류하천이라고 하더라도 하도 단면에서 가장 깊은 곳을 연결한 최심선(talweg)은 하도 내에서 사행을 이룬다. 단

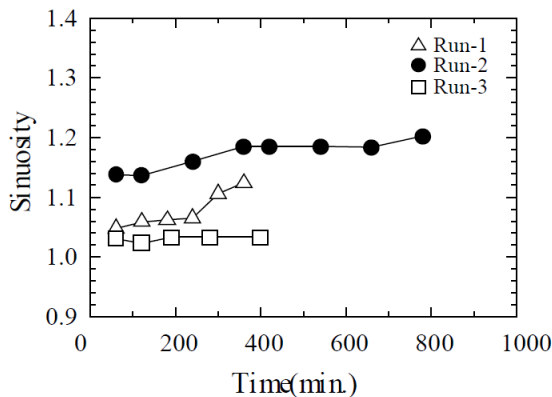


Fig. 7. Sinouity with time for each run

일하천에서 하천의 사행 정도를 나타내는 사행도(S)는 최심선의 길이(하도만곡의 길이)와 하천의 직선길이의 비로 정의되며 다음과 같다.

$$S = \frac{\text{하도 최심선의 길이}}{\text{하도 직선길이}} \quad (3)$$

여기서, 하도 직선길이는 전체하도의 직선길이를 의미하며, 상류와 하류 두 지점의 직선거리로 구한다.

사행도가 1.0에서 1.05 이면 직류하천이고, 1.06에서 1.3 사이면 사행도 작은 사행하천이다. 그리고 1.31에서 3.0이면 사행하천이라고 한다(Schumm, 1985). 사행하천의 형태는 하상경사, 하안을 구성하는 재료와 안정성, 그리고 사행의 이동과 변화에 의해 결정된다.

홍수터에 식생이 없는 Run-1에서, 사행도는 초기에 1.06으로 유지하다가 240분 이후에 1.1로 증가하였다. 실험 초기에 사주가 발달하고 선택적으로 침식이 발생하면서 사주와 하안에 작용하는 강제효과에 의해 사행이 발달하기 때문이다. 시간이 증가하면서, 사주의 이동속도는 감소하고 사행도는 증가한다(Fig. 4(a)). 이러한 특성은 van Dijk *et al.* (2012)의 실험연구에서도 확인되었다. Run-2에서 실험 초기에 하안침식과 측방향이동이 활발하지 않지만, 시간이 증가하면서 사주가 발달하고 하안침식에 의해 사행이 발달하면서 사행도는 360분까지 1.18로 증가한다. 그 후 680분까지 일정하게 유지하다가 780분에 1.19로 다시 증가한다. Run-3은 사행도가 1.03으로 사행도가 일정하게 유지되었다. 이는 홍수터에 식생밀도가 높아서 하안침식률이 많지 않고(Fig. 6), 저수로의 이동이 크지 않기 때문으로 판단된다.

4.3 만곡부 곡류 변화와 사행의 이동

Fig. 8은 하안침식률(E)과 무차원 곡률반경의 관계를 보여주고 있다. 무차원 곡률반경은 곡률반경(R)과 하폭(w)의 비인 R/w 로 나타내며, 하천에서 하안침식을 분석하고 예측하는데 유용하다(Julien, 2002). 홍수터에 식생이 없는 Run-1에서 $20 < \frac{R}{w} < 30$ 에서 0.1 cm/min 이상으로 하안침식률이 가장 높다. 홍수터에 식생이 적은 Run-2에서 $15 < \frac{R}{w} < 20$ 에서 하안침식률은 0.3 cm/min에서 0.8 cm/min이다. 홍수터에 식생이 많은 Run-3에서 $6.7 < \frac{R}{w} < 10$ 에서 하안침식률은 0.01 cm/min이며 하안침식이 거의 발생하지 않았다. 홍수터에 식생이 없는 Run-1은 홍수터에 식생이 많은 Run-3에 비하여 하안침식률이 많으며, 반대로 하안의 안정성은 가장 낮은 것

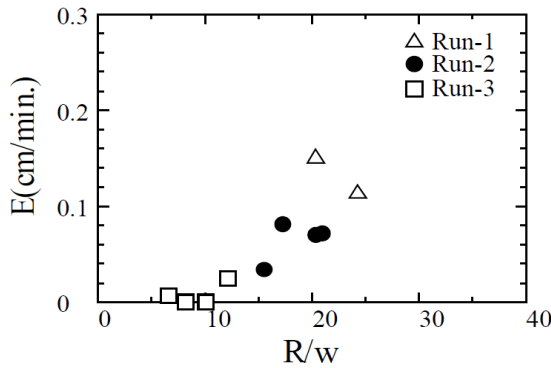


Fig. 8. Bank erosion rate with dimensionless radius of curvature

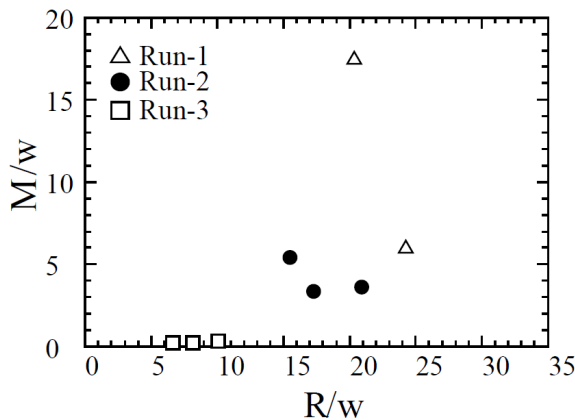


Fig. 9. Bank erosion rate with dimensionless radius of curvature

로 판단된다(Jang and Shimizu, 2005; Vargas-Luna *et al.*, 2019; Jang, 2022).

Fig. 9는 상대 측방이동률(M/w)과 무차원 곡률반경과의 관계를 보여주고 있다. 상대 측방이동률(M/w)은 측방이동률(M)과 하폭(w)의 비이다. Run-1에서 $20 < \frac{R}{w} < 30$ 에서 상대 측방이동률은 6.0에서 17.5로써 가장 높다. 홍수터에 식생이 적은 Run-2에서 $15 < \frac{R}{w} < 20$ 에서 상대 측방이동률은 3.6에서 5.4이다. 홍수터에 식생이 많은 Run-3에서 $6.7 < \frac{R}{w} < 10$ 에서 상대 측방이동률은 0.2에서 0.3이며, 만곡부에서 측방이동이 거의 발생하지 않았다. 본 실험에서 홍수터 식생에 의한 사행하천의 발달은 $15 < \frac{R}{w} < 20$ 에서 상대 측방이동률은 3.6에서 5.4인 조건에서 발달한다. 그러나 Run-1에서 상대 측방이동률이 크거나, Run-3와 같이 상대 측방이동률이 작으며, 사행하천이 발달하지 못하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 식생밀도의 변화에 의한 하안의 안정성 변화, 하안침식과 무차원소류력의 관계, 사행의 만곡부 변화와 이동을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 홍수터에 식생이 있는 하도에서는 시간이 지남에 따라 사행의 하폭이 일정하게 유지되지만, 선택적인 하안침식에 의해 사행이 발전하고 하류 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 하안침식과 사주의 변화가 크지 않았으며, 저수로는 일정하게 유지되면서 유사유출량이 감소하고 변동성이 거의 없이 일정하게 유지되었다. 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안침식률이 감소하였다.
- 2) 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안침식률이 감소하였고, 사행의 발달에 영향을 주었다. 이는 홍수터 식생이 하안의 안정성을 증가시키고, 하도의 평면변화에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나임을 의미한다.
- 3) 홍수터에 식생이 없는 조건에서 하안침식률과 무차원 곡률 반경이 가장 크게 나타났고, 식생이 있는 조건에서는 작게 나타났다. 또한 상대 측방이동률과 무차원 곡률반경도 하안침식률과의 관계가 유사하는 특성을 보였다. 홍수터 식생은 하도의 안정성을 증가시켜서 하안침식과 사행의 곡률에 영향을 준다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2021R111A3048276)과 2023년 한국교통대학교 산학협력단 지원을 받아 수행하였습니다. 실험을 수행하는데 많은 도움을 준 한국교통대학교 하천수리연구실 학생들에게 감사를 표합니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Braudrick, C.A., Dietrich, W.E., Leverich, G.T., and Sklar, L.S., (2009). "Experimental evidence for the conditions necessary

- to sustain meandering in coarse bedded rivers." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, No. 40, pp. 16936-16941. doi: 10.1073/pnas.0909417106.
- Camporeale, C., Perona, P., Porporato, A., and Ridolfi, L. (2005). "On the long-term behavior of meandering rivers." *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 12, W12403. doi: 10.1029/2005WR004109.
- Colombini, M., Seminara, G., and Tubino, M. (1987). "Finite-amplitude alternate bars." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 181, pp. 213-232.
- Defina, A. (2003). "Numerical experiments on bar growth." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 4, 1092.
- Fujita, Y., and Muramoto, Y. (1982). "Experimental study on stream channel processes in alluvial rivers." *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 35, No. 314, pp. 55-86.
- 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.
- Ielpi, A., Lapotre, M.G., Gibling, M.R., and Boyce, K. (2022). "The impact of vegetation on meandering rivers." *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 3, pp. 165-178. doi: 10.1038/s43017-021-00249-6.
- 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. (2022). "Experimental analysis on the morphologic changes and adaption of the channels to floodplain vegetation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 10 (2022). pp. 801-810. doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.10.801
- 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.
- Julien, P.Y. (2002). *River engineering*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 187-190.
- Kleinhans, M.G. (2010). "Sorting out river channel patterns." *Prog. Phys. Geogr.*, 34, 287-326, doi: 10.1177/0309133310365300.
- Kleinhans, M.G., de Vries, B.M.L., Braat, L., and Van Oorschot, M. (2018). "Living landscapes: Muddy and vegetated floodplain effects on fluvial pattern in an incised river." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 43, No. 14, pp. 2948-2963. doi: 10.1002/esp.4437.
- Leopold, L.B., and Wolman, M.G. (1957). *River channel patterns: Braided, meandering, and straight*. US Geological Survey Professional Paper 282-B, US Geological Survey, Washington, D.C., U.S.
- Schumm, S.A. (1985). "Patterns of alluvial rivers." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 13, pp. 5-27.
- Thorne, C.D., and Furbish, D.J. (1995). "Influences of coarse bank roughness on flow within a sharply curved river bend." *Geomorphology*, Vol. 12, pp. 241-257.
- van Dijk, W.M., Teske, R., van de Lageweg, W.I., and Kleinhans, M.G. (2013). "Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 11, pp. 7558-7574. doi: 10.1002/2013WR013574.
- van Dijk, W.M., van de Lageweg, W.I., and Kleinhans, M.G. (2012). "Experimental meandering river with chute cutoffs." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, F03023. doi: 10.1029/2011JF002314.
- 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, pp. 1981-1995. doi: 10.1029/2018JF004878.
- Zhu, L., Chen, D., Hassan, M.A., and Venditti, J.G. (2022). "The influence of riparian vegetation on the sinuosity and lateral stability of meandering channels." *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, No. 2, e2021GL096346. doi: 10.1029/2021GL096346.