실내실험에 의한 식생하도의 지형변동 특성 분석

Experimental Analysis of the Morphological Changes of the Vegetated Channels

장 창 래*

Jang, Chang-Lae

Abstract

This study examines the hydraulic characteristics, the channel changes, the behavior of bars, and bank stability by means of laboratory experiments. Three sets of laboratory experiments are conducted to elucidate the influence of riparian vegetation of the channels with erodible banks. Flow velocity is decreased in the vegetated zone, the mobility of lower channels is decreased. The double Fourier analysis of the bed waves shows that 1-1 mode (alternate bar) is dominant at the initial stage of the channel development. As time increases, 2-2 and 2-3 modes (central or multiple bars) are dominant due to the increased width to depth ratio. As the vegetation density is increased, the number of bars are increased, bank stability increases. The variation of sediment discharges is affected by vegetation density. The braided intensity is decreased with vegetation density. As the vegetation density is increased, the correlation coefficient of bed topography and bed relief index is increased.

Keywords : laboratory experiment, riparian vegetation, morphological changes, bars, double fourier analysis

요 지

본 연구에서는 실내실험을 통하여 식생의 변화에 따른 하도의 수리학적 특성, 저수로의 변화, 사주의 거동, 하안의 안정성 등을 정량적으로 파악하였다. 실내실험은 기존에 인공식생 대신에 수로에서 실제식생인 알팔파를 성장시켜서 수행하였다. 식생대에서는 유속이 매우 느리며, 저수로의 이동이 감소하였다. 2중 푸리에 해석 결과, 교호사주의 특성을 나타낸 1-1모드의 진폭이 지배적이지만, 시간이 증가하면서 복렬사주의 특성을 나타내는 2-2와 2-3모드의 진폭이 증가하였다. 식생에 의하여 저수로가 고착화 되어 하도의 안정성이 증가하고, 하도 내 사주의 이동속도는 감소하지만, 하상이 불규칙하게 변하면서, 사주의 수는 증가하였다. 식생의 밀도가 증감함에 따라 하안의 안정성은 증가하였다. 식생의 밀도가 증가함에 따라 유사 유출량과 유출량의 변동성이 감소하였다. 또한 망상화 강도는 감소하지만, 하도의 상관계수와 하상의 기복지수(BRI)는 증가하는 특성을 보여주었다.

핵심용어 : 실내실험, 하도식생, 지형변동, 사주, 2중 푸리에 해석

1. 서 론

하도의 식생은 흐름과 유사이송에 많은 영향을 주고 있으며, 하도의 지형변화에 중요한 역할을 한다. 하도의 식

생대에서 흐름에 대한 저항은 증가하고 유속이 감소하며, 흐름의 방향이 변화된다. 유속이 감소되면서, 식생대에서 유사들은 쉽게 포착되고 유사 입경이 분급된다(Tsujimoto, 1999). 하도의 식생에 의하여 흐름의 저항을 정량적으로

* 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

예측하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며, 식생에 의한 흐름의 저항은 식생의 크기, 식생의 강성, 식생이 물에 잠긴 정도, 식생의 밀도 등에 의하여 영향을 받는다(Kouwen and Li, 1980; Lopez and Garcia, 2001; Nepf and Vivoni, 2000, Defina and Bixio, 2005). 그러나 주수로와 식생대 사이에서 에너지 교환이 발생하며, 난류의 강도가 증가하고 흐름이 집중되어, 주수로에서 하도의 변화가 발생하고, 식생대에서는 유사가 퇴적된다(Tsujimoto, 1999; Lopez and Garcia, 2001; Nepf and Vivoni, 2000). 하도의 식생은 항력과 흐름의 저항을 증가시키고 하상에 작용하는 전단응력을 감소시켜서 유사의 이동이 감소하고, 유사의 퇴적이 증가되어 사주가 증가한다(Thorne, 1990). 식생대 하도의 지형변화는 매우 복잡하며, 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안침식과 저수로의 이동특성이 감소하고 하도의 안정성이 증가한다(Ikead and Izumi, 1990; Gran and Paola, 2001; Jang and Shimizu, 2007; Tal and Paola, 2010). 하안에 있는 식생은 조도를 증가시켜서 유속을 감소시키고, 국부적으로 경계층 두께(boundary layer thickness)를 증가시키며, 하안에서 전단응력을 감소시킨다(Thorne and Furbish, 1995; Gran and Paola, 2001). 흐름이 하안에 직접 충돌하여 수층부를 형성하지 못하므로 2차류가 형성되어 하상에서 세굴이 발생한다(Gran and Paola, 2001).

식생대에서 유속이 감소되고, 유사가 퇴적되어 사주가 증가하며, 유사의 입경이 가늘어지면서 하천환경이 변화된다(Kondolf and Wolman, 1993). 이렇게 변화된 하천환경은 저수로의 수가 감소되고, 하도의 역동성이 떨어진다는(Gran and Paola, 2001; Jang and Shimizu, 2007). 하도의 식생은 홍수의 변화와 상류에서 공급되는 유사량의 변화에 영향을 받으며, 하도의 지형을 변화시키는데 중요한 역할을 한다(Tsujimoto, 1999; Jang and Shimizu, 2010).

식생이 번성한 하도에서 홍수를 원활히 소통시키기 위하여 하도관리 측면에서 벌채 등을 하지만, 하천환경을 유지하려는 측면에서는 부정적인 면이 많다. 그러나 홍수소통을 원활히 하고 하천환경을 유지하기 위한 하도의 식생관리 기준이 아직 정립되어 있지 않으며, 이를 위해서는 하도의 식생에 의한 수리학적 특성과 하도의 지형 변화 관계를 명확하게 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 실내실험을 통하여 식생의 변화에 따른 균일사로 구성된 하도의 수리학적 특성, 저수로의 변화, 사주의 거동, 하안의 안정성 등을 정량적으로 파악하였다. 기존에 식생대에서 하도의 변화를 파악하기 위하여 주로 인공식생을 사용하였지만, 본 연구에서는 실내 실험수로에서 실제식

생(알팔파)을 성장시켜서 실험을 수행하여 그 특성을 분석하였다.

2. 실내실험

실내실험은 주문 제작된 길이 12m, 폭 2m인 가변형 경사 수로에서 수행하였다. 실험 수로는 평균입경이 0.76 mm이고, 표준편차가 1.5인 균일사로 10 cm의 두께로 균등하게 채웠다. 가변형 경사수로에서 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밑변이 80 cm, 깊이가 3 cm, 하안의 경사가 40도인 저수로를 만들었으며, 수로의 경사는 1/100로 설정하였다(Fig. 1). 고가수조 안에서 발생한 와류를 정류시키기 위하여, 수조안에 있는 스크린에 플라스틱 메쉬를 부착하여 흐름이 안정적인 상태를 유지하도록 하였다. 고가수조에서 모래로 채워진 이동상 경사 수로에 물이 유입될 때, 유입구에서 국부 세굴이 발생하므로, 고가수조의 물이 이동상 초기 수로로 물을 유도하고, 국부세굴을 방지하기 위하여 깊이가 0.6 m 이고, 폭이 0.8 m인 고정상 수로를 제작하여 설치하였으며, 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다.

하도의 지형은 각 실험 단계에서 상류로부터 2~12 m 구간에서 종방향으로 0.2 m, 횡방향으로는 0.05 m 간격으로 point gauge를 이용하여 측정되었다. 초기에 상류에서 2.95 l/s의 유량으로 일정하게 공급하였으며, 자세한 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

식생하도 실험을 위하여 하도에서 식생을 성장시키는 것이 중요하다. 초기하도에서 60분 동안 일정한 유량을 공급하여 망상하도(braided river)를 형성한 후에 수로에 유입되는 유량을 정지시킨다. 식생하도를 형성하기 위하여 알팔파(alfalfa seed) 씨앗을 균일하게 하도 전체에 뿌린다. 알팔파 식생의 밀도는 하도에 파종하기 전에 10 g 당 씨앗의

Fig. 1. Sketch of Experimental Setup

개수를 10회 정도 반복하여 세고, 평균한 후에 전체 무게를 측정하고, 씨앗 회사에서 제시한 발아율(70%)과 손실률(1%)을 고려하여 추정하였다. 그 후에 0.4 l/s의 유량을 약 2분정도 흐르게 하여 저수로에서 식생이 성장하지 않도록 하고, 알팔파가 자라는데 필요한 물을 공급한다. 이것은 자연하천에서 저수로에 식생이 성장하지 않은 현상을 재현하는 것과 같다. 씨앗은 사주, 하안, 그리고 홍수터에 뿌려져 있으며, 적은 유량으로 물이 흐를 때, 하상 위를 이동하여 흐르거나, 정제수역이 형성된 구간에서는 가라앉았다. 저수로를 따라 흐르는 씨앗은 사주나 하도의 양안에서 수위의 경계선을 따라 떠내려 와 있거나, 일부는 실험 수로 밖으로 흘러 내려갔다. 0.15 l/s의 유량을 2일에 한번정도 약 20분 동안 저수로에 흘려보내서 식생이 성장하는데 필요한 물을 공급하였으며, 이 유량은 저수로의 하상 및 형상변동에 거의 영향을 미치지 않는다. Fig. 2(a)는 알팔파를 파종하기 위하여 초기수로에서 재현된 망상하천

이며, Fig. 2(b)는 재현된 망상하천에서 알팔파 파종 후의 7일이 경과된 모습이다. 망상하천의 사주, 양안, 홍수터는 식생으로 덮여 있으며, 저수로에는 식생이 거의 없는 상태로 유지되고 있다. 실내 실험실은 알팔파가 자라는데 필요한 빛이 매우 제한되어 있으므로, 150 watts 전구를 10개 설치하여 식생이 자라는데 필요한 빛을 공급하였다. 실내 실험을 하기 위한 알팔파의 줄기 길이는 4.8 cm이고, 뿌리의 길이는 2.0 cm이며, 총 길이는 6.8 cm이었다. 잎은 평균 3~4장이었으며, 지름이 약 1 mm이었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도의 지형 변화

Figs. 3 and 4는 식생하도에서 하도의 변화 과정을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 식생하도의 변화를 실험하기 위하여 망상하도에서 성장한 알팔파의 모습을 보여주고 있

Table 1. Experimental Conditions

Run	Water discharge (L/s)	Bed slope (%)	Mean Dia. of Bed material (mm)	Initial Water Depth (m)	Vegetation Density (stems/cm ²)	Remarks
1	2.95	1/100	0.76	0.009	0.00	without vegetation
2	2.95	1/100	0.76	0.009	0.46	with vegetation
3	2.95	1/100	0.76	0.009	0.84	with vegetation

(a)

(b)

Fig. 2. Vegetated Channel for Run-3; (a) Reproduced Braided Channel before Seeding Alfalfa. Run Time was 60 Minutes. (b) Vegetated Channel after 7 Days of Seeding Alfalfa on the Braided Channel. Flow is from Top to Down

(a) T=60 min.

(b) T=90 min.

(c) T=120 min.

Fig. 3. Temporal Changes of Vegetated Channel for Run-3. Flow is from Top to Down

Fig. 4. Temporal Changes of Channels for Each Run. ▲ Indicates Scour Holes at the Confluence of the Lower Channels

다. 사주와 하도의 양안에 식생이 덮여 있으나, 저수로에서는 식생이 거의 없는 것을 보여주고 있다. 흐름이 형성될 때, 사주와 저수로에 있는 일부 식생은 흐름에 저항하지 못하고 국부 세굴에 의하여 뽑혀서 하류로 흘러내려가거나, 식생대에서 걸려서 흐름에 저항을 일으키고 흐름의 방향을 변경시킨다. 식생이 성장한 홍수터나 사주 부근에서는 유속이 매우 느리거나 정체수역이 되며, 이러한 원인은 식생이 흐름에 대하여 항력(drag force)을 일으켜서 저항을 증가시키기 때문이다(Kadlec, 1990; Nepf, 1999).

하도의 양안에서도 식생에 의한 흐름의 저항이 증가하기 때문에, 하안에 흐름이 직접 충돌하지 못하며, 하안 침식이 현저하게 감소되고 하안의 안정성이 증가한다. 또한 식생하도에서 하안의 안정성이 증가하는 것은 식생의 뿌리가 토립자를 엮어매어 흐름에 토립자의 이탈에 저항하기 때문이다(Millar and Quick, 1993).

식생이 없는 저수로에서는 흐름이 집중되어 하상이 저하되고 있다(Figs. 3(b) and 4(c)). 하상이 세굴 되는 구간에서는 하안의 경사가 증가하여 하안침식이 발생하고 있다(Figs. 3(b) and (c)). 이러한 특성은 하도의 양안에서 불규칙한 침식과 식생에 의하여 흐름의 방향이 급격하게 변하여 상대적으로 강한 2차류가 형성된다. 국부적으로 발생한 강한 2차류는 와류(vortex)를 형성시키면서 하상의 세굴과 퇴적을 일으켜서 하상이 불규칙하게 변하게 된다(Figs. 4(c) and 5).

흐름이 집중되어 유속이 빠른 저수로와 유속이 느린 식생대 사이에서 2차류가 발생하며, 저수로에서 지속적으로 하상이 저하된다. 저수로에서 하상고가 낮아질수록 흐름이 집중되어, 강한 흐름이 발생하면서, 수중부에서는 하안침식이 발생하여 저수로 사행이 증가한다(Figs. 3 and 4(c)).

Fig. 5. Bed Changes in the Lower Channel for Run-3. Flow is from Top to Down

저수로와 식생대 사이에서 유속이 저감되고 횡방향으로 에너지 교환이 발생하며 유사가 퇴적 된다(Fig. 5). 유사가 퇴적되면서 하상고가 상승하고, 식생대가 파괴되거나 식생이 형성되기 전에 형성된 저수로가 막히게 되어 통수능이 저감된다.

Fig. 6은 식생대에서 흐름의 앞면에 있는 부분은 유사가 퇴적되고 흐름의 뒷면에 있는 구간은 하상이 세굴 되는 특성을 보여주고 있다. 식생에서 흐름의 앞면은 식생대에서 흐름이 정체되어 유속이 느려지면서 유사가 퇴적되고, 흐름의 뒷면은 식생대를 통과하면서 유사가 포착되어 유사가 거의 없는 상태의 물이 식생에 의하여 흐름이 굽어지면서 발생한 강한 2차류에 의하여 와류가 형성되어 하상이 국부적으로 세굴되기 때문이다.

3.2 하도의 변화와 유사의 유출 특성

Fig. 7은 각각의 실험에 대하여 상류로부터 6m 지점에서 시간의 변화에 대한 횡단면의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 식생이 없는 하도에서 하폭의 변화를 보여주고 있으며, 시간이 증가함에 따라 지속적으로 하폭은 증가하고 있으나, 하상고는 높아지는 특성을 보여주고 있다. 하폭이 증가하면서 하안 침식에 의하여 유사가 유입되므로 하상고가 상승하며, 저수로의 불안정성이 증가하여 저수로의 이동이 활발하다. Fig. 7(b)는 Run-2의 실험결과를 보여주고 있다. 식생의 밀도가 0.46 stems/cm^2 로서, 시간이 증가하면서 하폭의 변화는 거의 없으나, 유사가 퇴적되는 부분은 하상고가 상승하고, 흐름이 집중되는 부분은 지속적으로 하상이 저하되는 특성을 보여주고 있다. Fig. 7(c)는 Run-3의 실험결과(밀도는 0.84 stems/cm^2 임)로서, Run-2와 유사한 결과를 보여주고 있다. 하상고가

Fig. 6. Aggradated Bed by Sedimentation in front of Vegetated Bars and Scoured Bed at the Lee of the Bars

Fig. 7. Temporal Changes of Cross Section at 6 m for Each Run

상승하는 부분은 식생이 번성한 사주에 해당되며, 식생대에서 유사의 포착에 의하여 지속적으로 상승하고, 저수로는 흐름의 집중에 의하여 하상이 저하되며, 사주의 이동이 고착화 되는 특성을 보여준다.

Fig. 8은 시간의 변화에 따른 평균 하폭의 변화를 보여주고 있다. 시간이 변화함에 따라 Run-1은 하폭이 지속적으로 증가하고 있으나, 식생이 없는 Run-2와 3에서는 하폭이 거의 일정하게 유지되고 있다. 특히, 식생의 밀도가 높은 Run-3은 식생의 밀도가 상대적으로 낮은 Run-2보다 하폭의 변화가 작다. 이것은 식생의 밀도가 증가함에 따라, 하안 침식이 감소하고 하안의 안정성이 증가하는 것을 의미한다.

하도의 변화를 파악하기 위하여 유사의 유출 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 실험이 진행되는 동안 실험수로의 하류단에서 매 5분 간격으로 유사를 수집하여, 유사량을 측정하였다. Fig. 9는 시간에 따른 유사의 유출량을 보여주고 있다. Run-1의 경우에, 유사의 유출량은 통수 후 30분까지 거의 일정하게 증가하였으나, 그 후에는 강한 변동을 보이면서 유사가 유출되는 것을 보여

Fig. 8. Averaged Channel Width with Time for Each Run

주고 있다. 통수 30분까지 유사의 유출량이 일정한 것은 초기에 저수로에서 일정하게 하안침식이 발생하기 때문이다. 그러나 30분 이후에 유사의 유출량이 강한 변동을 보이는 것은, 하안이 침식되고, 하폭이 증가하며, 세굴공이 변화하고, 저수로의 수가 증가하면서 하도에서 다양한 변화가 발생하기 때문이다.

Fig. 9. Sediment Discharge with Time for Each Run

Run-2와 3의 경우에, 통수 후 60분까지는 Run-1과 거의 유사한 특성을 보여주고 있으나, 식생이 성장하여 식생하도가 형성된 60분 후부터는 유출되는 유사량이 급격하게 감소되고 있다. 특히, 통수 후 90분에는 식생이 밀도가 높은 Run-3가 상대적으로 식생의 밀도가 낮은 Run-2보다 유출되는 유사량이 적다. 이러한 특징은 식생의 밀도가 증가함에 따라 흐름의 특성이 변하고, 식생대에서 유사의 포착이 증가하며, 사주와 저수로의 변화가 감소되어 하도의 역동성이 작아지기 때문으로 판단된다.

4. 식생의 변화에 의한 하상파와 저수로의 변화

복렬사주에 의하여 발달한 망상하천은 하상형상(河床形狀)이 복잡하며, 국부적으로 유속이 빠르고, 사주의 변화가 복잡하며, 하안침식에 의하여 하도에 미치는 영향이 매우 크다. 특히, 실험 및 수치계산에 의하여 하상형상의 특성을 분석할 때, 모드(mode)의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 하상형태가 복잡한 복렬사주를 대상으로 하여 판단할 경우에, 모드의 판단 기준은 명확하지 않아 사람마다 달리 해석하는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 복렬사주의 모드를 객관적으로 판단할 수 있는 2중 푸리에 해석에 의하여 실험 결과를 분석하였다.

실험 결과를 통하여 얻은 하상형상은 다양한 하상파(wave)를 선형화 하여 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 중횡단 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 파장

의 길이를 L, 횡단방향(n)에 관해서 유로의 1/2에 대한 자료를 양측에 반대방향으로 굴절시킬 때의 길이를 기준과 장 Y로 한다. 평균수심을 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.

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

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

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

Eq. (2) 중에서 계수 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} 를 역변환하여 나타내면 다음과 같다.

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

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

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

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

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

$$\alpha(i, j) = \begin{cases} \sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 짝수임} \\ \sqrt{c_{ij}^2 + d_{ij}^2} & \text{단, } j \text{는 홀수임} \end{cases} \quad (7)$$

하도의 지형변화에 정량적으로 분석하기 위하여 2중 푸리에 해석에 의한 하상파(wave)의 분포와 지배적인 성분(mode)의 변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. 1-1 모드는 1차 횡방향 모드로서 횡방향으로 1개의 사주가 형성된 교호사주(alternate bars)이고, 1-2 모드와 2-2 모드는 2차 횡방향 모드로서 횡방향으로 2개의 사주가 형성된 중

앙 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. 10은 Run-2에 대한 사주의 모드 별 진폭(amplitude) 특성을 보여주고 있다. 통수 후 60분에는 교호사주의 특성을 나타내는 1-1 모드의 진폭이 2.19로 가장 지배적이며, 중앙사주의 특성을 나타내는 2-2 모드의 진폭이 0.45이었으며, 2-3 모드의 진폭이 0.37이었다. 식생에 의하여 하도가 변하는 실험인 통수 후 90분에서는 1-1 모드의 진폭이 2.25로 가장 지배적이지만, 두 번째로 지배적인 것이 2-2모드로써, 0.55에 이르고 있다. 또한 2-3모드의 진폭은 0.44이었다. 통수 후 120분에는 1-1 모드의 진폭이 2.16이며, 두 번째로 지배적인 것이 2-2모드로써, 0.59에 이르고 있다. 2-3 모드의 진폭은 0.51이었으며, 시간이 증가함에 따라, 2-2 모드와 2-3 모드의 진폭이 증가하는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은 식생에 의하여 하상이 불규칙하게 변하면서, 사주의 수가 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 11은 Run-3에 대한 사주의 모드 별 진폭(amplitude) 특성을 보여주고 있다. 통수 후 60분에는 교호사주의 특성을 나타내는 1-1 모드의 진폭이 1.93으로 가장 지배적이며, 중앙사주의 특성을 나타내는 1-3 모드의 진폭이 0.82이었다. 식생에 의하여 하도가 변하는 실험인 통수 후

Fig. 10. Distribution of Sand Waves by Double Fourier Analysis for Run-2

Fig. 11. Distribution of Sand Waves by Double Fourier Analysis for Run-3

90분에서는 1-1 모드의 진폭이 1.81로 가장 지배적이지만, 두 번째로 지배적인 것이 1-3모드로써, 0.82이었다. 또한 1-2모드의 진폭은 0.42이었다. 통수 후 120분에는 1-1 모드의 진폭이 1.69이며, 두 번째로 지배적인 것이 1-3모드로써, 1.69에 이르고 있다. 2-3 모드의 진폭은 0.29이었다.

Fig. 12는 Run-2와 3에 대하여 식생의 밀도가 변함에 따라 하상과의 지배적인 진폭 특성을 보여주고 있다. 식생의 밀도가 0.46 stems/cm²인 Run-2에서 1-1 모드인 교호사주가 지배적이고, 2-2 모드가 두 번째로 지배적인 특성을 보여주고 있다. 식생의 밀도가 0.84 stems/cm²인 Run-3에서 1-1 모드인 교호사주가 지배적이고, 1-3 모드가 두 번째로 지배적인 특성을 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라, 교호사주인 1-1 모드는 감소하고, 한 단면에서 3개의 사주가 형성되는 1-3 모드가 지배적인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 식생의 밀도가 증가함에 따라 한 단면에서 횡방향으로 3개의 모드가 나타나는 것은 저수로에서 하상의 기복(bed relief)이 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 13은 통수 후 120 min이 지난 후에서 각각의 실험에 대하여 식생의 밀도 변화에 따른 하도의 망상화 강도(braiding intensity, BI)를 보여주고 있다. 하도의 망상화 강도는 망상하천에서 하도망의 복잡한 정도를 나타내며, 하도망에서 저수로의 수를 나타내었다(Egozi and Ashmore, 2008). 망상화 강도는 하도의 종방향으로 2m에서 10m 구간에서 1m 간격으로 하도의 횡단면에서 저수로의 수를 평균하여 산정하였다. 식생이 없는 Run-1에서는 BI는 3.0이며, 식생의 밀도가 0.48 stems/cm²인 Run-2에서는 2.78이었다. 식생의 밀도가 0.78 stems/cm²인 Run-3에서는 2.55이었으며, 식생의 밀도가 증가하면서, BI는 감소하는 특성을 보여주고 있다. BI가 감소하는 것은 저수로의 이동이나 변화가 감소하고, 기존에 형성된 하도가 고착화되거나 퇴화하는 것을 의미한다.

시간의 변화에 의한 하도의 안정성을 파악하기 위해서

는 각 시간단계별 하도의 지형변화에 대한 상관성을 파악하는 것이 중요하다. 하도의 상관계수가 크면, 하도의 이동과 변화가 작고 하도의 안정성이 높은 것을 의미하며(Gran and Paola, 2001), 다음과 같이 정의된다(Jang and Shimizu, 2007).

$$r = \frac{cov(z_1, z_2)}{\sqrt{var(z_1)var(z_2)}} \quad (8)$$

$$cov(z_1, z_2) = \frac{1}{n} \sum (z_{1i} - \bar{z}_1)(z_{2i} - \bar{z}_2) \quad (9)$$

$$var(z) = \frac{1}{n-1} \sum (z_i - \bar{z})^2 \quad (10)$$

여기서, r 은 각 단면에서 시계열 하상 자료 z_1 과 z_2 사이의 상관계수이며, 상관계수 r 이 1에 접근하면 하도의 안정성이 증가하며, 하도의 변화가 발생하지 않는 것을 의미한다. 그러나 상관계수 r 이 0에 접근하면, 하도의 안정성이 감소하고, 하도의 다양한 변화가 발생하며 하도의 역동성이 증가하는 것을 의미한다. z_1 과 z_2 는 각 시간단계별 하상고의 자료이며, $\bar{z}_1$ 은 시간 1에서 평균 하상고이고, $\bar{z}_2$ 는 시간 2에서 평균 하상고이다. $cov(z_1, z_2)$ 는 z_1 과 z_2 의 공분산이며, $var(z_1)$ 과 $var(z_2)$ 는 z_1 과 z_2 의 분산이다.

Fig. 13은 식생의 밀도에 따른 하도변화의 상관계수를 보여주고 있다. 식생이 없는 Run-1에서 상관계수는 0.69이고, 식생이 많은 Run-3에서 상관계수는 0.86이며, 식생의 밀도가 증가함에 따라 상관계수가 증가하고, 하도의 이동과 변화가 작으며 하도의 안정성이 증가하는 것을 보여주고 있다.

식생의 변화에 따른 하상고의 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 무차원 하상 기복지수(bed relief index, BRI)를 각 단면에 대하여 산정하였다. 하상 기복지수는 평균 하상고에 대한 각 단면의 표준편차를 나타내며, 다음 식으로 정의된다(Hoey and Sutherland, 1991).

(a) Run-2

(b) Run-3

Fig. 12. Dominant Amplitude of Modes with Time for Each Run

$$BRI = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{(z_i^2 + z_{i+1}^2)}{2} \right]^{0.5} [x_{i+1} - x_i] \right) / (x_n - x_i) \quad (11)$$

여기서, x_i 는 하도의 한 횡단면에서 좌안에서 우안의 거리이며, z_i 는 x_i 지점에서 하상고이다. x_n 은 우안까지의

Fig. 13. Braiding Intensity is Plotted Against Vegetation Density

Fig. 14. Correlation Coefficient of Bed Topography is Plotted Against Vegetation Density

Fig. 15. Bed Relief Index is Plotted Against Vegetation Density

거리이다.

Fig. 15는 식생밀도의 변화에 대한 하상 기복지수를 보여주고 있다. 하상의 기복지수가 큰 것은 평균하상고에서 하폭의 변화가 큰 것을 의미한다. 식생이 없는 Run-1에서는 1.38이며, 식생의 밀도가 0.46 stems/cm²인 Run-2에서는 1.43이고, 식생의 밀도가 0.46 stems/cm²인 Run-3에서는 1.45이다. 따라서 식생의 밀도가 증가함에 따라 하상고의 변화가 큰 것을 의미하며, Fig. 6에서 보여준 단면 변화의 특성과 잘 일치한다.

5. 결 론

본 연구에서는 하도의 식생이 하도내 형성된 사주의 변화와 이동, 저수로의 변화, 하도의 안정성 등을 실제식생인 알팔파(alfalfa)를 이용하여 실내실험을 수행하여 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 식생대에서는 유속이 매우 느리며, 식생에 의하여 흐름이 방향이 변하여, 수층부가 형성되어 하안침식이 발생하며, 저수로의 이동이 고착화 되었다.
- 2) 2중 퓨리에 해석 결과, 교호사주의 특성을 나타낸 1-1모드의 진폭이 지배적이지만, 시간이 증가하면서 복렬사주의 특성을 나타내는 2-2와 2-3모드의 진폭이 증가하였다.
- 3) 식생에 의하여 저수고의 이동의 고착화 되고, 하도내 사주의 이동이 느려지고, 하상의 형상이 불규칙하게 변하면서, 사주의 수가 증가한다. 식생의 밀도가 증가함에 따라 하안의 안정성이 증가한다.
- 4) 식생이 없는 하도에서는 사주가 증가하여 하안이 침식되고, 저수로의 수가 증가하거나 세굴공의 변화와 이동에 의하여 하도의 역동성이 크게 증가하여 유사의 유출량이 강한 변동성을 보여주었다.
- 5) 식생하도에서는 식생의 밀도가 증가함에 따라 흐름의 특성이 변하고, 식생대에서 유사의 포착이 증가하고, 사주 및 저수로의 변화가 감소되어 하도의 역동성이 둔화되기 때문에 유사의 유출량이 감소되고 변동성이 작은 특성을 보여 주었다.
- 6) 식생의 밀도가 증가하면서 망상화 강도(BI)는 감소하지만, 하도의 상관계수와 하상의 기복지수(BRI)는 증가하는 특성을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국

연구재단의 기초연구사업(2012-0002697) 및 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신 C06)에 의하여 수행되었습니다.

References

- Defina, A., and Bixio, A.C. (2005). "Mean flow and turbulence in vegetated open channel flow." *Water Resour. Res.*, Vol. 41, W07006.
- Egozi, R., and Ashmore, P. (2008). "Defining and measuring braiding intensity." *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 33, pp. 2121-2138, doi:10.1002/esp.1658
- Gran, K., and Paola, C. (2001). "Riparian vegetation controls on braided stream dynamics." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No. 12, pp. 3275-3283.
- Hasegawa, K. (1984). Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers, PhD Dissertation, Hokkaido University, Japan (in Japanese).
- Hoey, T. B., and Sutherland, A.J. (1991). "Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: A laboratory study." *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 16, pp. 447-462.
- Ikeda, S., and Izumi, N. (1990). "Width and depth of self-formed straight gravel rivers with bank vegetation." *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 10, pp. 2353-2364.
- Jang, C.-L. (2013). "Dynamic characteristics of multiple bars in the channels with erodible banks." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 1, pp. 25-34.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2007). "Vegetation effects on the morphological behavior of alluvial channels." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 6, pp. 763-772.
- Jang, C.-L., and Shimizu, Y. (2010). "Numerical simulation of sand bars downstream of Andong Dam." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 4B, pp. 379-388.
- Kadlec, R.H. (1990). "Overland flow in wetland: vegetation resistance." *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 5, pp. 691-706.
- Kondolf, G.M., and Wolman, M.G. (1993). "The sizes of salmonid spawning gravels." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, pp. 2275-2285.
- Kouwen, N., and Li, R.-M. (1980). "Biomechanics of vegetative channel linings." *J. Hydraul. Div.*, ASCE, Vol. 106, pp. 1085-1103.
- Lopez, M., and Garcia, M. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open channel flow through non-emergent vegetation." *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol. 127, pp. 392-402.
- Millar, R.G., and Quick, M.C. (1993). "Effect of bank of vegetation on channel pattern in bedload rivers." *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 1343-1363.
- Murray, A.B., and Paola, C. (2003). "Modelling the effect of vegetation on channel pattern in bedload rivers." *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 28, pp. 131-143.
- Nepf, H.M. (1999). "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 2, pp. 479-489.
- Nepf, H.M., and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structures in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105(C12), No. 28, pp. 547-557.
- Tal, M., and Paola, C. (2010). "Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments." *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 35, pp. 1014-1028. DOI:10.1002/esp.1908
- Thorne, C.R. (1990). Effects of vegetation on riverbank erosion and stability in vegetation and erosion, edited by Thornes, J.B., John Wiley, New York, 125-144.
- 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.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial processes in streams with vegetation." *J. Hydraul. Res.*, Vol. 106, No. 6, pp. 789-803.

논문번호: 13-045	접수: 2013.05.10
수정일자: 2013.06.17/07.08	심사완료: 2013.07.08