



Experimental study on the sediment sorting processes of the bed surface by geomorphic changes in the vegetated channels

Jang, Chang-Lae^{a*}

^aDept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 380-702, Korea

Paper number: 15-081

Received: 5 October 2015; Revised: 12 November 2015 / 26 November 2015; Accepted: 26 November 2015

Abstract

This study investigates the development of lower channels and sediment sorting processes in the vegetated channels with the mixed sediment. The sediment discharges fluctuate with time and decrease with vegetation density. The bed changes with irregular patterns, and the sediment particles in the vegetated zone at the surface of bed are fine. The dimensionless geometric mean decreases with vegetation density. The fine sediment particles are trapped by vegetation, and the bed between main stream and vegetated zone increases. Moreover, the particle sizes are distributed irregularly near the zone. The hiding functions decrease with dimensionless particle size. However, the functions increase with vegetation density, which is confirmed by decreasing sediment discharge with vegetation. The lower channel is stable and the migration decreases in the condition of 0.5 stems/cm . However, the migration of the lower channel in the condition of 0.7 stems/cm^2 increases due to the increased sinuosity and new generated channels in the sedimentated vegetation zone.

Keywords: Vegetation, geomorphic change, mixed bed materials, sediment sorting, hiding effects

실내실험에 의한 혼합사 식생하도의 지형변화와 하상토 분급 특성 연구

장창래^{a*}

^a한국교통대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 식생에 의한 하도 변화와 하상토 분급특성을 파악하였다. 유사 유출 특성은 불규칙하며, 식생 밀도가 증가함에 따라 유출되는 유사량은 감소하였다. 하상고는 불규칙하게 변하며, 하상토 표층에서 유사 입경은 작아졌다. 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 무차원 중앙입경의 비는 감소하였다. 식생대에서 유사 포착되거나, 식생대와 주흐름 사이에 경계층 흐름이 발생하여 유사 퇴적되며, 식생대에서 흐름의 방향이 변화되어 표층에서 하상토 입도는 불규칙하게 분포하였다. 무차원 하상토 입경이 감소함에 따라, 차폐효과는 일정하게 감소하였다. 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 차폐효과가 증가하며, 이것은 실험 수로 하류단에서 유사 유출량이 감소하는 것과 일치한다. 식생 밀도가 0.5 stems/cm^2 에서 저수로 이동은 감소하고 안정적인 특성을 보여주었으나, 0.7 stems/cm^2 에서 저수로 이동은 증가하였다. 이것은 식생 밀도가 증가하면서 저수로 사행도가 증가하고, 식생대에서 유사 퇴적되어 새로운 저수로가 형성되었기 때문이다.

핵심용어: 하도식생, 지형변화, 혼합사, 유사분급, 차폐효과

1. 서 론

하도 식생은 흐름, 유사이송, 하도 지형변화에 중요한 역할

을 하고 있다. 하도 식생대에서 흐름에 대한 저항은 증가하고 유속은 감소하며, 흐름의 방향이 변화된다. 식생대에서 유사 포착되고 하상토 입경이 분급된다(Tsujimoto, 1999). 주수로와 식생대 사이에서 에너지 교환이 일어나며, 난류 강도가 증가하고 흐름이 집중되어, 주수로에서 하도 변화가 발생하고, 홍수터나 식생대에서 유사 퇴적된다(Tsujimoto,

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

1999; Lopez and Garcia, 2001; Nepf and Vivoni, 2000). 또한 유사가 퇴적되면서 사주가 증가하기도 한다(Thorne, 1990).

일반적으로 식생이 없는 혼합사로 구성된 하도에서 홍수 시에 유량이 증가하면서 입경이 작은 유사는 부유되어 이동하지만, 유량이 감소하면 굵은 입자 사이에 포착되어 퇴적된다. 하상고가 상승하면 하상토의 입경이 가늘어지고, 하상고가 저하되면 하상토의 입경이 굵어진다. 그러나 전단응력이 작아서 유사 이동량이 적은 경우에, 표층 입경은 기층 입경보다 굵어지며, 하류로 갈수록 하상토 입경이 작아지는 하류 세립화(downstream fining) 현상이 나타난다(Paola and Seal, 1995). 그러나 식생하도에서 흐름과 저수로의 변화에 의하여 유사의 분급 특성은 매우 복잡하다.

하도 식생은 조도를 증가시켜서 유속을 감소시키고, 국부적으로 경계층(boundary layer thickness)을 증가시키며, 하안에서 전단응력이 감소한다(Thorne and Furbish, 1995; Gran and Paola, 2001). 또한 하안침식과 저수로 이동은 감소하고 하도 안정성은 증가한다(Ikead and Izumi, 1990; Gran and Paola, 2001; Jang and Shimizu, 2007; Tal and Paola, 2010). 식생대에서 유속이 감소되고, 유사가 퇴적되어 사주가 증가하며, 유사 입경이 작아지면서 하천환경이 변화된다(Kondolf and Wolman, 1993). 이렇게 변화된 하천환경에서 저수로 수는 감소하고, 하도 역동성은 작아진다(Gran and Paola, 2001; Jang and Shimizu, 2007). 이와 같이 하도 식생은 하천의 지형변화와 유사 분급, 서식처 형성에 중요한 역할을 하고 있으며, 식생이 하도변화에 미치는 영향을 정확하게 파악하는 것은 하천공학적으로 중요하다. 그러나 국내외에서 이에 대한 연구가 부족하며, 기존에 수행된 연구는 혼합사로 구성된 식생하천에서 유사 분급과 하도 지형변화를 파악하는데 많은 한계가 있다. 따라서 본 연구는 실내실험을 통하여 식생의 밀도 변화에 대한 하도의 지형변화와 하상토 입도분급 특성을 정량적으로 분석하고 그 특성을 파악하였다. 기존에는 식생에 의한 하도 변화를 파악하기 위하여 주로 인공식생을 사용하였지만, 본 연구에서는 실내 실험수로에서 실제식생(알팔파)을 성장시켜서 실험을 수행하여 분석하였다. 본 연구는 식생에 의한 하도의 변화, 유사 유출량의 특성, 하상토의 입도분포와 분급 특성, 저수로의 안정화를 분석한 내용으로 구성되어 있다.

2. 실내실험

실내실험은 주문 제작된 수로인 길이 12m, 폭 2m 수로에서

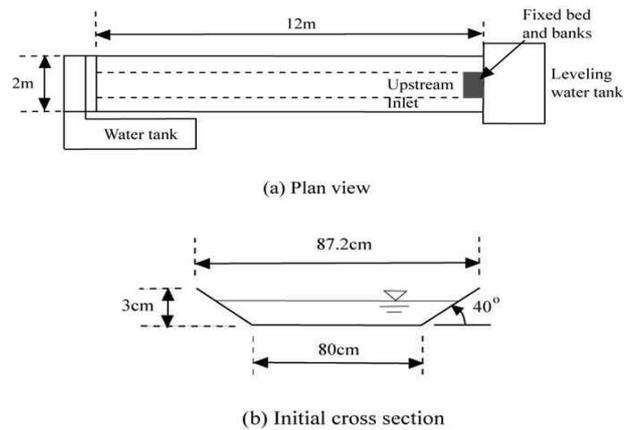


Fig. 1. Sketch of Experimental Setup

수행하였다(Fig. 1(a)). 가변형 경사수로에서 실험을 위한 초기 수로는 자체 제작한 모래 포설기를 이용하여, 밀변이 80cm, 깊이가 3cm, 하안 경사가 40도인 저수로를 만들었으며(Fig. 1(b)), 수로 경사는 1/80로 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, 유입구에서 국부세굴이 발생하지 않도록 길이가 0.6m이고, 폭이 0.8m인 고정상 수로를 목재로 제작하고 수밀성을 확보하여 설치하였다(Fig. 1(a)). 또한 고정상 하상과 이동상 하상 경계에서 국부세굴을 방지하기 위하여, 상류 유입구에서 일정하게 유사를 공급하였다. 하도 지형은 각 실험 단계에서 상류로부터 2~12m 구간에서 종방향으로 0.2m, 횡방향으로는 0.01m 간격으로 레이저 profiler를 이용하여 측정하였다. 실험을 위한 수리학적 조건은 Table 1에 자세히 나타내었다. 본 실험을 위하여 적용된 수리학적 조건은 유사가 부유되지 않고 소류사 상태로 이동하며, 복렬사주가 발생할 조건이다. 실내실험에 사용된 혼합사는 누가입경 분포에서 통과중량 50%에 해당하는 D50은 0.85mm이다. 하상토 입도분포의 표준편차가 3.03으로 완전 혼합사 특성을 나타내며, 하상토 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. 식생하도 실험을 위하여 하도에서 식생을 성장시키는 것이 중요하다. 초기하도에서 60분 동안 일정한 유량을 공급하여 망상하도(braided channel)를 형성한 후에 수로에 유입되는 유량을 정지시켰다. 식생하도를 형성하기 위하여 알팔파(alfalfa seed) 씨앗을 손으로 균일하게 뿌린다. 이때 식생의 밀도는 씨앗의 무게와 수를 미리 측정하여, 전체 개수를 추정하였다. 그 후에 0.4 l/s의 유량을 약 2분정도 흐르게 하여 저수로에서 식생이 성장하지 않도록 하

Table 1. Experimental Conditions

Run	Water discharge (L/s)	Initial Water Depth (m)	Bed Slope (%)	Froude Number (Fr)	Mean Dia. of Bed material (mm)	Std. Dev. of Bed material	Vegetation density (stems/cm ²)	Remarks
1	5.83	0.0156	1/80	1.03	1.48	3.03	0.0	w/o
2	6.30	0.0164	1/80	1.20	1.48	3.03	0.5	w/veg
3	6.30	0.0164	1/80	1.20	1.48	3.03	0.7	w/veg

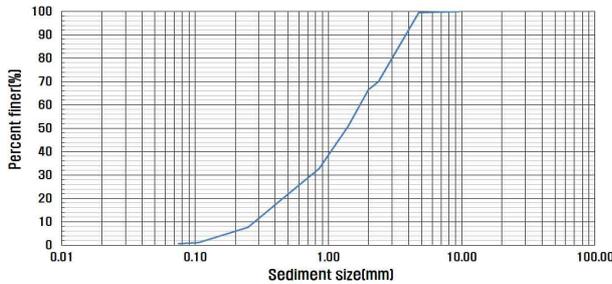


Fig. 2. Grain Size Distribution used to Laboratory Experiments

고, 알팔파가 자라는데 필요한 물을 공급하였다. 이것은 자연 하천 저수로에서 식생이 성장하지 않은 현상을 재현하는 것과 같다(Jang, 2013). 표층에서 하상토 변화를 파악하기 위하여 시료를 채취하였으며, 가로 10 cm, 세로 20 cm, 높이 30 cm인 하상토 표층 채취기를 제작하여 사용하였다. 하상토는 실험이 완전히 종료된 후에 흐름 방향으로 0.2 m, 흐름의 횡방향으로 0.2 m 간격을 두고 교란되지 않도록 주의하여 채취하였다(Jang, 2014).

3. 실험결과 및 분석

3.1 하도 지형변화

혼합사로 구성된 하도에서 식생에 의한 하도변화와 하상토 분급특성을 파악하기 위하여 실내실험을 수행하였으며, 시간의 변화에 따른 하도 변화 과정을 Figs. 3과 4에 나타내었다. Run-2에 대한 하도 변화 과정은 Fig. 3에서 보여주고 있다. 실험 초기 90분 후에는 하폭이 증가하면서, 식생으로 덮힌 중앙사주(central bar)에서 흐름이 분리되었다. 저수로에서 하상고는 저하되고, 하상토 입경이 굵어진다(Fig. 3(a)). 식생대에서 흐름에 대한 저항은 크며, 유속은 감소하였다. 시간이 증가하면서 하폭은 증가하고, 사주와 홍수터에서 발달한 식생 주변에서 입경이 가는 입자는 퇴적되었다(Fig. 3(b)). 그러나 흐름이 집중되는 저수로에서 하상토 입경은 크다. 시간이 지나면서 식생대에서 유사가 퇴적되며, 새로운 흐름이 형성

되었다. 저수로는 고착화되며, 저수로 형상이 고정되었다(Fig. 3(c)). 또한 저수로 사행도는 증가하고 흐름이 굵어지면서 2차류가 발생하여 좌안과 우안에서 수층부가 형성되어 하안침식이 증가하였다(Fig. 3(c)). 특히, 망상하천에서 수층부에서 발생한 와류는 이차류 흐름에 중요한 원인이 된다(Gran and Paola, 2001).

Fig. 4는 Run-3에 대한 하도의 변화 과정을 보여주고 있다. 시간이 증가하면서 저수로 하폭은 증가하고, 저수로에 흐름이 집중되면서 하상이 세굴된다(Figs. 4(a)와 (b)). 식생대에서 유속은 감소하고, 저수로와 식생대 사이에서 흐름의 경계층이 형성된다. 경계층이 형성되는 식생대에서 유속이 감소하면서 입경이 작은 토사는 퇴적되며, 하상고가 상승한다. 그러나 저수로에 흐름이 집중되면서 하상이 저하되고 하상토 입경이 굵어진다. 흐름이 지속되면서 하안이 침식되고, 저수로 폭이 증가하면서 유사 이동이 활발해지며, 상류에서 공급되는 유사에 의하여 하상고가 상승한다(Fig. 4(c)). 저수로에서 식생대에 공급되는 유사량은 하상고를 상승시키고 식생대를 파괴하며 새로운 저수로를 형성하는데 영향을 준다.

Figs. 5와 6은 시간의 변화에 따른 하도 변화 특성을 보여주고 있다. Fig. 5는 식생 밀도가 상대적으로 작은 Run-2에 대한 하도 변화를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라 저수로에서 하상이 저하되며, 6 m 지점은 상류에서 유입된 유사가 퇴적되는 특성을 보여주고 있다(Figs. 5 (d)와 (e)). 하상고가 상승하면서 흐름이 좌우로 분열되고 새로운 하도가 생성된다. 기존에 형성된 저수로에 흐름이 집중되면서 상류 8 m와 9 m 지점에서 하상이 세굴 되었다.

Fig. 6은 식생 밀도가 상대적으로 높은 Run-3 (0.7 stems/cm)에 대한 하도 변화 과정을 보여주고 있다. 시간이 증가하면서 상류에서 저수로 폭이 증가하고, 9 m 지점에서 사행도가 증가하였다. 이러한 원인은 식생이 흐름의 방향을 변화시키고, 저수로에 흐름을 집중시키기 때문이다(Jang and Shimizu, 2007). 식생 밀도가 증가하면 사행도가 증가한다. 식생이 파괴되어 저수로 폭이 증가하면 유사 이동은 활발해진다. 하류에 있는 식생대에서 퇴적이 발생하고, 새로운 저수로가 형성된다(Figs. 6 (d)와 (e)).

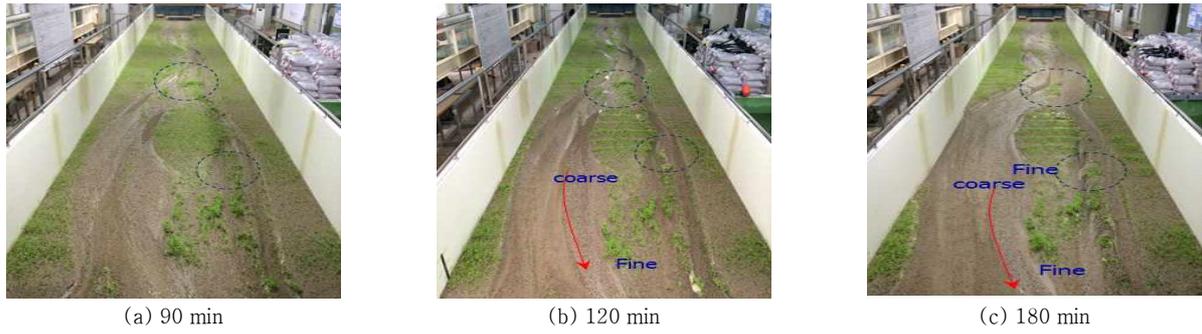


Fig. 3. Temporal Changes of a Vegetated Channel for Run-2

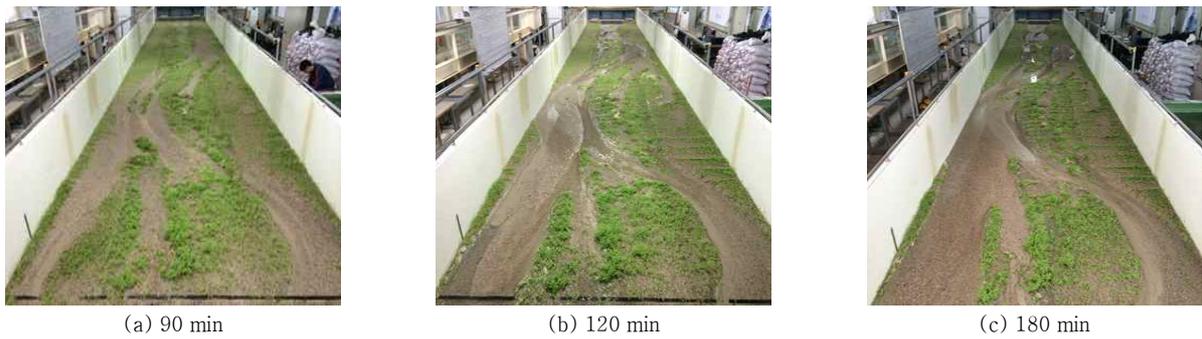


Fig. 4. Temporal Changes of a Vegetated Channel for Run-3

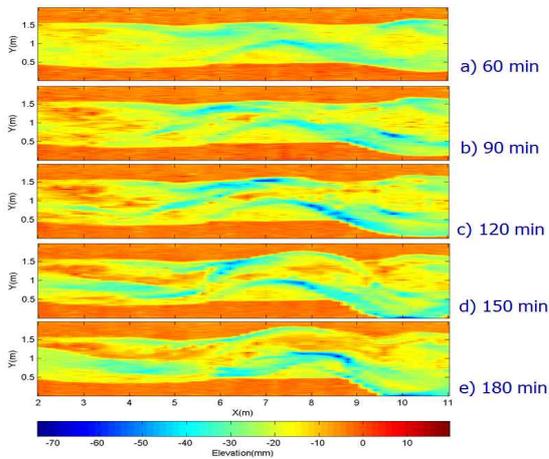


Fig. 5. Geomorphic Changes for Run-2

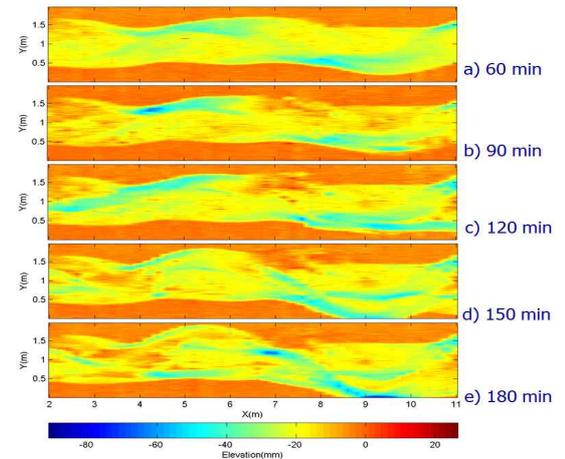


Fig. 6. Geomorphic Changes for Run-3

3.2 유사 유출량 특성

Fig. 7은 실험수로 하류단에서 시간에 대한 유출되는 유사량 특성을 보여주고 있다. 유사 유출량은 저수로와 시주의 변화에 의하여 영향을 받으며, 그 특성을 파악하는 것은 하도 변화 과정을 이해하는데 중요하다. 유사량은 15분마다 수집하여 건조시킨 후에 무게를 측정하였다. 식생이 없는 Run-1은 유사 유출량이 많으며, 불규칙한 특성을 보여주고 있다. 이것은 저수로 이동이 매우 활발한 것을 의미한다. 그러나 식생이

있는 Run-2는 유사 유출량이 적으며 상대적으로 일정한 주기를 보여주고 있다. 식생 밀도가 높은 Run-3은 Run-2에서 유출되는 유사량보다 적으며, 일정한 주기를 나타내고 있다. 식생은 유사를 포착하기 때문에 식생하도에서 유출되는 유사량은 식생이 없는 하도에서보다 적게 유출되는 특성을 보여준다.

3.3 하상토 입도분포 특성

혼합사로 구성된 식생하도에서 하상토 입도분포 특성은

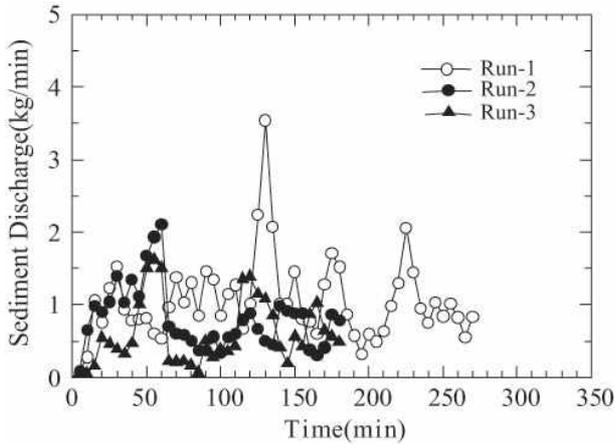


Fig. 7. Sediment Discharge with Time for Each Run

복잡하다. 식생대에서 흐름 특성은 유사의 거동과 하상토 입도 분급을 일으키는데 매우 중요하다. 초기 하도에서 저수로에 흐름이 집중되면서 유사 이동이 활발하고, 저수로에서 성장한 식생은 뿌리가 뽑히고 하류로 내려간다. 뿌리가 뽑힌 식생은 하류로 이동하면서 식생대에서 걸리고 흐름이 정체되며 흐름 방향이 변하게 된다. 저수로에서 하상토 입경은 굵어지며, 식생대에서 하상토 입경은 작아진다. 특히, 식생대와 저수로 흐름 사이에서 경계층 흐름이 형성되면서 식생대 부근에서 유사가 퇴적되거나, 사주의 선단에서 흐름이 정체되어 유속이 감소되면서 유사가 퇴적 된다(Figs. 8과 9). 이러한 특성은 식생이 없는 하도에서 나타나는 하상토 분급 특성과 다르다. 일반적으로 식생이 없는 혼합사로 형성된 하도에서 중앙사주 앞부분(선단부)은 경사가 급하고, 유속이 빠른 여울이 형성되면서, 입경이 작은 입자가 이동한다(Wilcock and McAdrdel, 1993). 또한 입경이 굵은 입자는 하류로 이동하지 않으며, 하상표층에서 하상토 입경은 굵어지게 된다.

식생 하도에서 하상토 입도 분포는 국부적으로 불규칙한 특성을 보여주고 있다(Figs. 8과 9). Fig. 9에서 b)의 2) 지점은 흐름이 집중되는 저수로에서 하상토가 굵어지는 특성을 보여주고 있다. 그러나 3) 지점은 유사 이동이 활발한 하류에서 저수로의 하상토 입경은 상대적으로 가는 특성을 보여주고 있다. 이러한 특성은 식생이 없는 혼합사 하도에서 유사 이동량이 많은 경우에 표층입경이 작아지는 유사의 분급현상과 일치한다(Parker et al., 1982; Listle et al., 1993; Jang, 2014).

Fig. 8의 1) 지점과 3) 지점, Fig. 9의 1) 지점은 하상고가 높지만, 하상토가 굵은 특성을 보여주고 있다. 이것은 식생대에서 유속이 느리고, 유사 이동이 거의 없으며, 식생이 성장하기 이전에 형성된 것이다. 그러나 Fig. 8의 2) 지점은 하상고가 상승하면서 하상토가 퇴적되어 하상토 입경이 작아지고 있다.

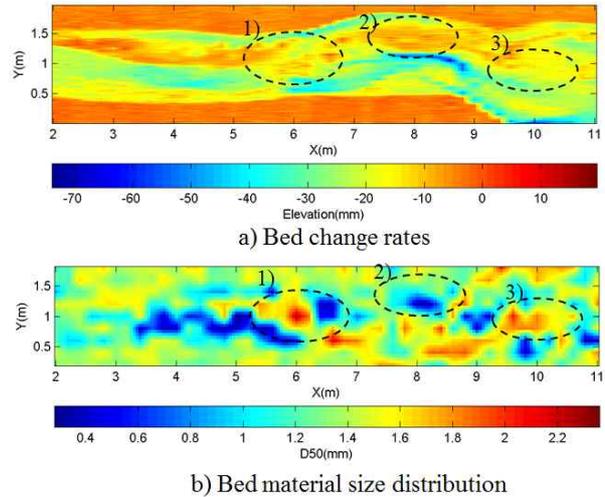


Fig. 8. Bed Change Rates and Bed Material Size Distribution for Run-2

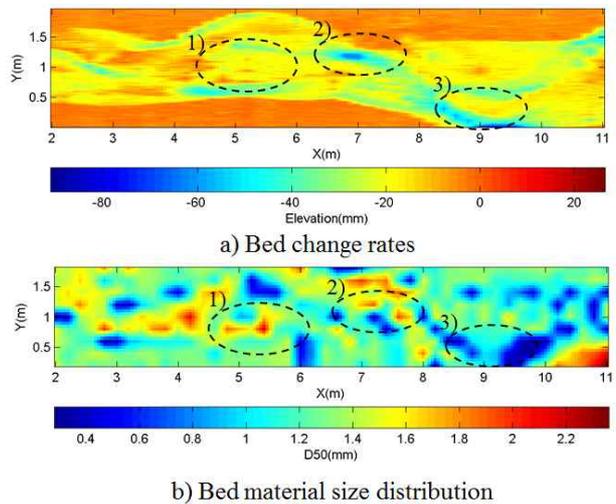


Fig. 9. Bed Change Rates and Bed Material Size Distribution for Run-3

4. 식생에 의한 표층에서 유사 분급 특성과 저수로 안정성

Fig. 10은 식생 밀도 변화에 대한 하상 표층에서 무차원 중앙입경의 변화를 보여주고 있다. 여기서 무차원 중앙입경은 초기 하상표층의 중앙입경(50_{ni})에 대한 하상표층의 중앙입경($d50_{ave}$) 비로 정의한다. 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 무차원 중앙입경의 비는 감소하는 특성을 보여주고 있다. 이것은 식생 밀도가 증감함에 따라 식생대에서 하상고가 상승하고 하상토 입경이 감소하면서 하상 표층이 세립화 되는 것을 의미한다.

Fig. 11은 하상고 변화에 따른 무차원 입경의 변화를 보여주고 있으며, 하상토는 Run-1에서 보여주는 것처럼, 하상고

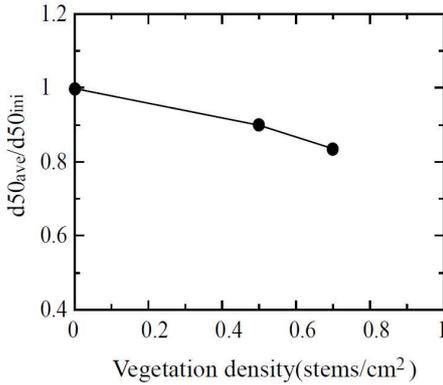


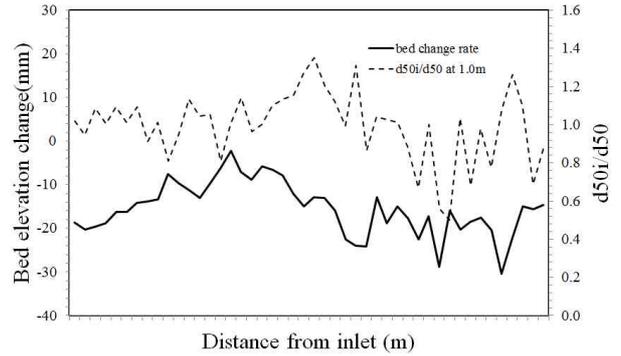
Fig. 10. Dimensionless Median Size Distribution of Bed Materials with Vegetation Density

가 저하되는 지점이나 그 직하류에서 굽어지는 것을 알 수 있다. 특히, 하상경사가 급한 경우에 중앙사주 앞부분에서 강한 전단력과 2차류에 의하여 저수로 합류점 하상 저면에서 수면으로 급격하게 상승하는 흐름이 발생하며, 유사이송이 활발하여 합류점 하류에서 하상토 입경은 작았다. 그러나 하상경사가 상대적으로 완만한 지점에서는 중앙사주 후면에서 발생한 합류점에서 무차원 입경이 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 식생하도(Run-2와 Run-3)에서 하상고 변화와 하상토 입경의 변화가 일치하지 않는 구간이 발생한다. 특히, Run-2의 6 m 지점과 9 m 지점에서 하상토 입경이 작아지며, Run-3의 4 m 지점에서 하상토 입경은 굽어지고, 6.5 m 지점과 8 m 지점에서 가늘어지는 특성을 보여준다. 이러한 특성은 Figs. 8과 9에서 잘 보여주고 있다. 이 원인은 식생에 의하여 유사가 포착되거나 식생대와 주흐름 사이에 경계층 흐름이 발생하고, 식생대에서 흐름의 방향이 변화되어 표층에서 유사의 입도분포가 불규칙하게 발생하는 것으로 판단된다.

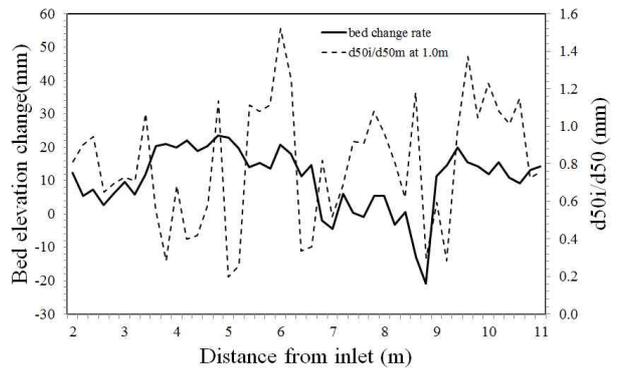
혼합사로 구성된 하상에서 소류사 이송과 표층에서 하상토 입도변화를 정량적으로 파악하기 위하여 Wilcock and Crowe (2003) 공식을 적용하였다(Viparelli et al., 2011). 단위 폭당 총 소류사 이송량은 개별 입자의 이송량 q_{bi} 의 합으로 정의된다. $p_i (= q_{bi}/q_{bT})$ 는 i 번째 입자의 범위에서 소류사 비율이다. 개별 입자에 대한 단위 폭당 소류사 이송량 q_{bi} 은 다음 식으로 계산된다.

$$q_{bi} = \frac{u_*^3}{g} F_i W_i^* \tag{1}$$

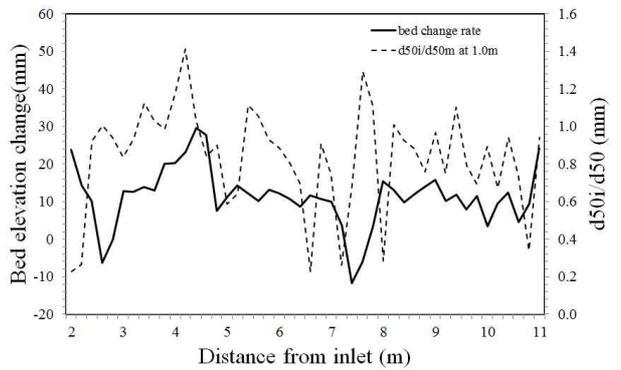
여기서 R 은 수중에서 유사 비중이며, $(\rho_s - \rho)/\rho$ 로 정의된다. ρ_s 는 유사 밀도이며, ρ 는 물의 밀도이다. F_i 는 표



(a) Run-1



(b) Run-2



(c) Run-3

Fig. 11. Dimensionless Median Size Distribution of Bed Materials with Vegetation Density

층에서 i 번째 입경의 비율이다. u_* 는 전단속도(shear velocity)이고, $u_* = RgD_{sg}\tau_{sg}^*$ 으로 정의된다. W_i^* 는 무차원 매개변수이며, 개별 입자의 소류사 이송률이다. D_{sg} 는 표층에서 하상토의 기하평균이고, τ_{sg}^* 는 Shields 매개변수이며, 유사 이동 특성을 나타낸다. 흐름이 등류상태에서, Shield 매개변수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g^* = \frac{HS}{D_{sg}} \quad (2)$$

개별 입자의 소류사 이송률 W_i 은 매개변수 ϕ_i 의 함수로 계산된다.

$$\phi_i = \left(\frac{\tau_{sg}^*}{\tau_{ssrg}^*} \frac{D_i}{D_{sg}} \right)^{-b} \quad (3)$$

$$W_i^* = G(\phi) \quad (4)$$

여기서 D_i 는 i 번째 입자의 입경이고, τ_{ssrg}^* 는 Shield 매개변수의 기준값 혹은 대조값(reference value)이며, 소류사가 이송하는 층(active layer)에서 모래의 비율로 계산된다.

$$\tau_{ssrg}^* = 0.021 + 0.015 \exp(-20F_s) \quad (5)$$

지수 b 는 주어진 입자의 지름(D_i)와 표층에서 기하평균(D_{sg})의 비율에 대한 함수이며, 다음과 같다.

$$b = \frac{0.67}{1 + \exp(1.5 - D_i/D_{sg})} \quad (6)$$

함수 $G(\phi_i)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$G(\phi_i) = \begin{cases} 0.002\phi_i^{7.5}, & \phi_i < 1.35, \\ 14 \left(1 - \frac{0.894}{\phi_i^{0.5}} \right)^{4.5}, & \phi_i \geq 1.35 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 12는 Eq. (3)에서 제시한 관계를 이용하여 하상표층에서 차폐효과를 파악하였다. 차폐효과는 하상 표층에서 하상 토 입도 변화에 의해 유사 거동에 영향을 준다. 하상 표층에서 하상토가 굵어지면 무차원 소류력이 작아져서 유사 이송량이 감소하고, 하상토 표층 입경이 작아지면 무차원 소류력이 커져서 유사 이송량이 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 무차원 하상토 입경이 감소함에 따라, 차폐효과가 일정하게 감소하는 특성을 보여주고 있다. 또한 식생 밀도가 증가함에 따라, 무차원 소류력의 비가 증가하며, 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 차폐효과가 증가하는 것을 의미한다. 또한 식생 밀도가 증가함에 따라, 식생대에서 하상토가 이동하지 못하는 것을 의미하며, Fig. 7에서 보여주고 있는 것처럼, 식생 밀도가 증가함에 따라 유사 유출량이 감소하는 것과 일

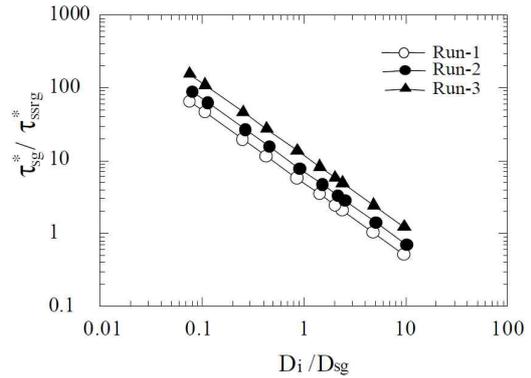


Fig. 12. Dimensionless Geometric Mean Size Distribution (D_i/D_{sg}) of Bed Materials with Hiding Function

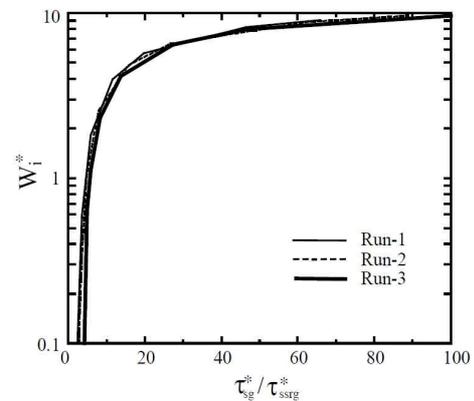


Fig. 13. Transport Function Plotted as a Function of $\tau_{sg}^*/\tau_{ssrg}^*$

치한다. Fig. 13은 유사이송 함수와 차폐효과의 관계를 보여주고 있다. 무차원 소류력의 비가 30보다 작은 경우에 유사이송 함수는 증가하지만, 30 이상이 되면, 유사이송 함수의 증가율이 크지 않다.

각 실험 결과에 대하여 시간의 변화에 대한 하도 변화를 정량적으로 파악하고 저수로 이동 특성을 파악하기 위하여, 모든 횡단면에 대한 시계열 자료를 통계 처리하여 지형변화의 상관관계를 분석하였다(Jang and Shimizu, 2007).

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

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

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

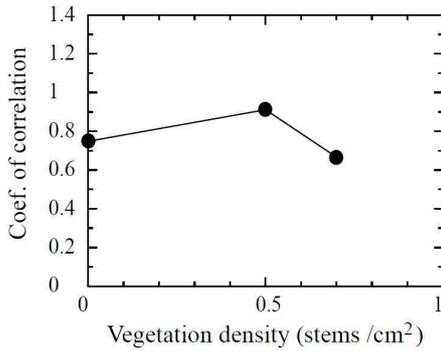


Fig. 14. Correlation Coefficient of Bed Topography is Plotted Against Vegetation Density

여기서 은 시계열 자료 단면 z 과 z_2 에 대하여 하상고 변화에 대한 상관성을 나타내는 상관계수(correlation coefficient)이다. 상관계수 r 이 1에 가까워지면, 저수로 이동이 작으며, 안정적인 것을 의미한다. 그러나 상관계수 r 이 0에 가까워지면, 저수로 이동이 활발하며, 불안정한 것을 의미한다. z_1 과 z_2 는 각 시간 단계별 하상고 자료이다. z_1 은 시간 1에서 평균 하상고이며, \bar{z}_2 은 시간 2에서 평균 하상고이다. $cov(z_1, z_2)$ 는 z_1 과 z_2 에 대한 공분산이고, $var(z_1)$ 과 $var(z_2)$ 는 z_1 과 z_2 에 대한 분산이다. Fig. 14는 식생의 밀도 변화에 따른 상관계수를 보여주고 있다. 상관계수는 0.5 $stems/cm^2$ 까지 증가하고 있으나, 0.7 $stems/cm^2$ 에서는 감소하는 특성을 보여주고 있다. 식생이 증가하면서 0.5 $stems/cm^2$ 까지는 저수로 이동이 감소하고 안정적인 특성을 보여주고 있으나, 0.7 $stems/cm^2$ 에서는 저수로 이동이 활발한 것으로 나타났다. 이것은 식생의 밀도가 증가하면서 저수로 사행도가 크게 증가하고, 식생대에서 유사가 퇴적되어 새로운 저수로가 형성되었기 때문으로 판단된다 (Tal and Paola, 2000). 그러나 식생 밀도와 저수로 이동 한계에 대해서는 다양한 실험조건에 대한 연구가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 식생에 의한 하도 변화와 유사 분급특성을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 유사 유출 특성은 불규칙하며, 식생 밀도가 증가함에 따라 유출되는 유사량은 감소하였다. 하상고의 변화가 불규칙하며, 하상도 표층에서 유사의 입경이 작아졌다.
- 2) 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 무차원 중앙입경

의 비는 감소하였다. 식생에 의하여 유사가 포착되거나, 식생대와 주흐름 사이에서 경계층 흐름이 발생하여 유사가 퇴적되며, 식생대에서 흐름의 방향이 변화되어 표층에서 하상도 입도분포는 불규칙하였다.

- 3) 무차원 하상도 입경이 감소함에 따라, 차폐효과는 일정하게 감소하였다. 식생 밀도가 증가함에 따라 하상 표층에서 차폐효과가 증가하며, 실험 수로 하류단에서 유사 유출량이 감소하는 것과 일치한다. 이것은 식생대에서 상대적으로 하상도 입경이 가는 유사가 퇴적되어 하상표층에서 하상도 입경이 작아지기 때문이다.
- 4) 식생의 밀도가 0.5 $stems/cm^2$ 인 실험수로에서 저수로 이동은 감소하고 안정적인 특성을 보여주고 있으나, 0.7 $stems/cm^2$ 인 수로에서는 저수로 이동이 활발하였다. 이것은 식생 밀도가 증가하면서 저수로 사행도가 크게 증가하고, 식생대에서 유사가 퇴적되어 새로운 저수로가 형성되었기 때문이다.

본 연구는 식생대에서 소류사 이동, 유사 분급, 하도 변화를 분석하였으나, 보다 다양한 실험 조건에 대한 연구가 필요하며, 식생대에서 부유사를 고려한 실험 및 정교한 수치모의 연구가 필요하다. 또한 식생 밀도와 저수로의 이동 한계를 파악하는데 한계가 있으며, 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 한국교통대학교의 해외파견연구교수지원금을 받아 수행한 연구임

References

- Gran, K., and Paola, C. (2001). "Riparian vegetation controls on braided stream dynamics." *Water Resour. Res.*, Vol. 37m No. 12, 3275-3283.
- 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, 2353-2364.
- Jang, C.-L. (2014). "Experimental study on the sediment sorting processes of the bed surface by geomorphic changes in the alluvial channels with mixed grain size." *J. Korea Water Resour. Assoc.* Vol. 47, No. 12:1213-1225.
- 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.

- Kondolf, G.M., and Wolman, M.G. (1993). "The sizes of salmonid spawning gravels." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, 2275-2285.
- Lisle, T. E., Iseya, F., and Ikeda, H. (1993), "Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: A flume experiment", *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No.11, 3623-3629, doi:10.1029/93WR01673.
- 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.
- Nepf, H.M., and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structures in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No.C12, 28, pp. 547-557.
- Parker, G. (1990), "Surface-based bedload transport relation for gravel rivers", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 4, 417-436.
- Parker, G., Klingeman, P. C., and McLean, D. L. (1982), "Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams", *J. Hydraul. Eng., ASCE*, Vol. 108, No.HY4, pp.544-571.
- Parker, G., and Klingeman, P. C. (1982), "On why gravel bed streams are paved", *Water Resour. Res.*, Vol. 18, No. 5, 1409-1423, doi:10.1029/WR018i005p01409.
- 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.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.
- 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, pp.125-144.
- Tsujimoto, T. (1999). "Fluvial processes in streams with vegetation." *J. Hydraul. Res.* Vol. 106, No. 6, pp. 789-803.
- Viparelli, E., Gaeuman, D., Wilcock, P., and Parker, G. (2011), "A model to predict the evolution of a gravel bed river under an imposed cyclic hydrograph and its application to the Trinity River", *Water Resour. Res.*, Vol. 47, doi:10.1029/2010WR009164,2011.
- Wilcock, P.R., and Crowe, J.C. (2003). "Surface-based transport model for mixed-size sediment." *J. Hydraul. Eng., ASCE*, Vol. 129, No. 20, pp. 120-128, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120).
- Wilcock, P.R., and McArdel, B.W. (1993). "Surface-Based Fractional Transport Rates: Mobilization Thresholds and Partial Transport of a Sand-Gravel Sediment." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 4, pp. 1297-1312.