

하천식생에 의한 유사퇴적의 실험적 고찰

이삼희¹⁾, ○옥기영²⁾, 강찬수³⁾, 이진원⁴⁾

1. 서론

하천식생은 하도를 구성하는 중요한 요소로서 치수안전도 및 하도내 자연환경에 미치는 영향이 지대하다. 하천식생에 의해 야기되는 하상의 퇴적과 세굴은 하도관리에서 중요할 뿐만 아니라, 하천생태계에서 기본이 되는 하천식생의 천이과정에 중대한 영향을 미친다. 이에 따라, 지금까지 하도를 구성하는 중요한 요소로서 주로 하상재료나 하도형태(하천지형)만을 대상으로 하여 흐름과 하상변동 등 하천에서의 각종 수리량을 해석해 왔으나, 앞으로는 하도안정에 대한 정확한 수리학적 해석과 하천생태계의 정량적 평가를 위하여 하천식생을 하도의 주요한 구성요소로 고려해야 한다.

본 연구에서는 하천식생을 고려한 하천계획 및 관리가 이루어질 수 있도록 하천식생에 의한 정량적인 수리특성(특히 유사퇴적현상)을 파악하기 위해, 하도내 미지형의 변화를 수리학적 차원에서 식생을 고려하여 분석 및 검토하였다. 본 연구성과는 결국 지금까지 정량적으로 규명할 수 없었던 하도내에서 비롯되는 홍수해의 원인 규명과 하도내 자연환경에 대한 영향평가에 있어 귀중한 기초 자료로써 가치를 지니게 될 것이다.

2. 시설의 개요 및 실험조건

2.1 수로의 형상

본 실험은 가변경사 사각형(矩形) 철제수로인 '유사공급수로'에서 실시하였다. 수로의 제원은 그림 1과 같이 길이가 20m, 수로폭이 0.6m, 그리고 수로높이가 0.7m이다. 재질이 강철판인 수로와 비교적 유사한 조도조건하에 모의식생의 부착이 가능하도록 합판을 실험 주구간에 설치하였다. 실험 주구간의 하상에 그림 1에서 보는 바와 같이 수로 중간부인 7.6m-10m구간(무식생구간), 그리고 10m-12.4m구간(식생설치구간)로 나누어 조도조건을 거의 비슷하게 하기 위해 두께 3mm의 두장의 얇은 합판을 차례로 부착하여 고정하였다.

2.2 공급유사 조건

하천식생에 의한 유사의 퇴적양태를 파악하기 위한 실험에서는 wash load, 부유사, 소류사별로 나누어 수리특성을 파악하는 것이 필요하나, 순환수로 및 침사지 설치 및 수로길이, 기존 관측장비 등 정확한 유사퇴적 현상을 파악하기에는 여러가지 제약조건이 있어, 기존 수로의 제약조건하에 실험가능한 준소류상태를 상정하여 모형사를 선정하였다. 공급유사는 60번체를 통과한 평균 0.42mm 이하의 유사를 사용하였는데, 평균입경은 0.3mm으로 비교적 균일사에 해당한다. 유사공급량은 1분

1), 4) 한국건설기술연구원 선임연구원

2), 3) 한국건설기술연구원 연구원

당 0.45kg을 초기퇴적현상을 파악하기 위해 1시간 동안 27kg을 공급하였다. 실제 하상경사가 1/200 정도의 하도에서는 하상재료가 일반적으로 32~64mm인 very coarse gravel 이상이 주하상재료(main bed-load)임에도 불구하고 0.3mm의 부하상재료를 채택한 것은 조사대상하천에서 달뿌리풀 주변에 대개 0.3mm의 유사 즉 부하상재료(sub bed-load)가 퇴적한 현상을 파악하기 위한 것이다.

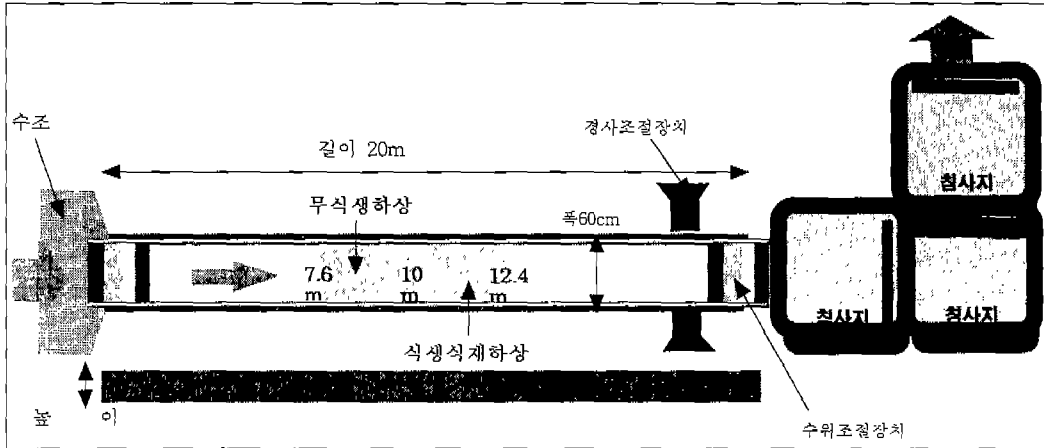


그림1. 실험장치 및 식생설치 구간도

2.3 모의식생 조건

우리나라 자연하천의 중·상류구간에서 현장조사한 달뿌리풀의 식생밀도와 형태적 특성조사를 기반으로 하여 모의 달뿌리풀을 제작하였다. 수리모형실험에서 홍수시를 상정하여 식재의 수몰형태와 비수몰형태를 나누어 상정할 수 있으나, 실험수로의 제약상 기본적으로 비수몰형태를 대상으로 하였다. 이에 따라, 수로내의 수위를 약 40cm내외로 하였으며, 제작한 모의식생은 줄기의 길이가 40cm, 두께가 0.5cm인 재료를 사용하였다. 일은 자연상태의 달뿌리풀의 조건에 맞게 아래로부터 40cm까지 6개를 크기에 맞게 어긋나게(호생) 붙였다.

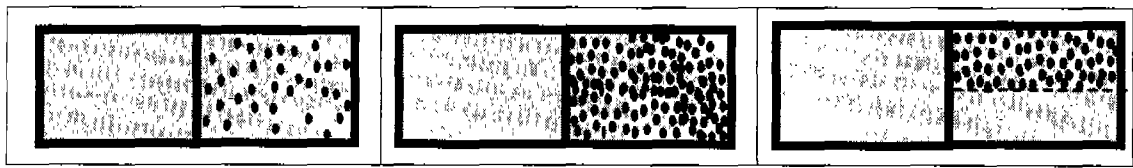
2.4 실험조건 설정

본 실험에서는 거의 동일한 수리량 조건하에서 하도내의 식생 배치형태와 밀도에 따른 유사의 퇴적현상을 비교 연구하고자 그림 2와 같은 3가지 경우(case-1, case-2, case-3)를 설정하여 실험을 실시하였다. 각 실험에서 적용한 기본 수리량(9.5m 지점기준)은 표 1과 같다. 여기서 식생밀도 1배는 현장조사에 대한 달뿌리풀의 평균밀도(160주/1.44m²)와 같게 설정한 것이며, 식생밀도 3배는 평균밀도의 3배(480주/1.44m²)를 의미한다. 식재의 배치는 수로 횡단면 방향으로 전체에 걸쳐 식생이 분포(full)하는 경우와 수로의 한쪽 절반인 좌안부에만 분포(left half)하는 경우를 설정해 실험하여 비교하였다.

홍수시 실제 달뿌리풀이 대개 높이의 1/4까지 전도되는 것으로 알려져 있어, 실험에서 설정한 높이는 수몰상태에서 수위가 수몰식생위에 놓여 있다고 가정할 수 있다. 이 경우 투과계수가 3배정도 작아질 것으로 추정하면, 3배 식생밀도는 식생의 수몰상태의 수리모형실험 상태라고 할 수 있다. 따라서, case-2의 3배 식생밀도에 대한 실험은 결국 case-1의 1배 식생밀도가 수몰되어 수위가 식생상단부에 놓여 있다는 상태라고 이해할 수 있다.

표 1. 각 실험에서의 수리조건 (하상경사 : 1/200)

	평균유속 (m/s)	수심 (m)	유량 (m ³ /s)	단면적 (m ²)	동수반경 (m)	마찰속도 (cm/s)
case-1	0.206	0.443	0.055	0.266	0.179	9.36
case-2	0.239	0.425	0.061	0.255	0.176	9.29
case-3	0.221	0.438	0.058	0.263	0.178	9.34



식생밀도 1배, 식생배치 full
< case-1 >

식생밀도 3배, 식생배치 full
< case-2 >

식생밀도 3배, 식생배치 half
< case-3 >

그림 2. 각 실험의 수로내 식생배치 형태

3. 실험결과

3.1 유속변화

유속측정은 유사공급 이전에 좌안수로(left)·중심수로(middle)·우안수로(right)별로 비식생역인 9.5m지점, 식생상부경계역인 10m지점, 식생역 중심부인 11m지점, 식생 하류영역인 12m지점에서 실시하였다. 그리고 각 지점별마다 바닥에서 1.5cm정도 높이, 바닥에서 20%수심, 80%수심별로 3곳의 유속을 측정하였다. 표 2는 각 3가지 경우의 실험에서 관측한 유속을 수심별 평균유속으로 정리하여 비교한 것이다.

표 2. 수리모형실험에서의 평균유속

·형태	관측위치	관측지점			
		비식생역 9.5m 지점	식생역		
			10m 지점	11m 지점	12m 지점
case-1	left	0.194	0.177	0.239	0.260
	middle	0.194	0.185	0.190	0.212
	right	0.194	0.201	0.250	0.198
case-2	left	0.228	0.213	0.417	0.307
	middle	0.228	0.220	0.326	0.235
	right	0.228	0.196	0.354	0.324
case-3	left(식생역)	0.221	0.165	0.130	0.056
	right(비식생역)	0.221	0.196	0.377	0.412

3.2 유사퇴적결과

3가지 경우의 실험에서 1시간 동안 27kg의 유사를 공급한 후에 퇴적유사의 모양과 깊이는 10x10 cm 그리드를 만들어서 실측하였다. 결과는 식생역과 비식생역을 포함한 구간(7.6-12.4m)과 식생역구간(10-12.4m)으로 구분하여 분석하였다.(그림3, 표 3)

표 3. 식생에 의한 유사퇴적실험 조건 및 실험결과(퇴적량)

구간	전체구간			식생역 구간		
	7.4 ~ 13m			10 ~ 12.4m		
수로길이	7.4 ~ 13m			10 ~ 12.4m		
실험종류	case-1	case-2	case-3	case 1-1	case 2-1	case 3-1
식생밀도	1배	3배	3배	1배	3배	3배
식생배치	full	full	half	full	full	half
유사퇴적체적	19,617 cm ³	9,805 cm ³	17,432 cm ³	9,003 cm ³	1,261 cm ³	7,590 cm ³
유사퇴적면적	2.34 m ²	1.63 m ²	2.35 m ²	1.38 m ²	0.87 m ²	1.42 m ²

4. 실험에 대한 비교고찰

4.1 각 실험결과에의 고찰

1) case-1

비식생영역에서의 흐름이 모의식생역의 상류경계부인 10m지점에 이르러서는 식생영역내로 접근하는 흐름이 급격히 난류상태를 나타낸다. 더불어 모의식생역에서는 종단거리별 수심별 유속에서 추정되는 하강류의 흐름이 양안으로 발달하여 하상의 전단응력이 증가하여 퇴적현상이 생기기 어렵게 되었음을 알 수 있고, 상대적으로 유속이 느린 중심수로부에 퇴적이 발달하였다. 그리고, 식생역의 안쪽으로 토사가 유송되어 퇴적되면서 유사 농도는 줄어 식생역 중하류부쪽으론 퇴적양도

줄어 들었다. 홍수소통단면적이 작은 식생역보다 홍수소통단면적이 큰 식생역 말단부의 배후에서는 유속이 작게 되어 유사의 퇴적현상이 연속해서 일어났다. 결국, 실험 case-1의 경우에 있어 하천유사의 퇴적과 세굴에 대한 현상은 하천중단방향에 대한 유사의 농도와 유속(난류현상에 의한 유속변화 포함)에 크게 지배 받는다는 것을 보여주고 있다. 여기서, 식생역에서 1방향의 흐름에 의한 유사의 종방향 퇴적심에 따른 유사퇴적의 정량적 평가에 대한 가능성을 제시한다고 볼 수 있다.

2) case-2

비식생역 9-9.5m구간에서 퇴적현상이 일어나지 않는 것은 0.23m/s 이상 유속에서는 유사가 부유상태로 되었기 때문이다. 그리고, 비식생역의 9.5-10m구간에서는 좌안과 우안부에 퇴적이 일어났는데, 이는 식생역 유입부에서는 식생에 의한 배수영향으로 유속이 줄어든 것으로 나타났다. 그러나, 식생역(10m-12.4m)에서는 유사퇴적이 거의 일어나지 않았으며, 식생역의 하류역 경계부인 12m지점에서 중심수로에 극소량의 퇴적현상이 발생했다. 이는 실험 case-1과 비교해 볼 때, case-2의 식생역에서의 유속은 현저하게 빨라졌음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 현상은 식생밀도가 3배로 커진 만큼 홍수소통단면적이 커져서 결과적으로 유속이 빨라졌기 때문인 것으로 나타났다.

그리고 식생역이 끝나는 지점 12.5m부터의 좌안과 우안가까이 2열로 집중적인 퇴적이 일어난 것은 식생역이 끝나는 곳에서부터는 홍수소통단면적이 급속히 늘어나면서 유속이 급속히 떨어지고, 유사이동능력이 감소하면서 퇴적이 집중적으로 이루어졌다고 판단된다.

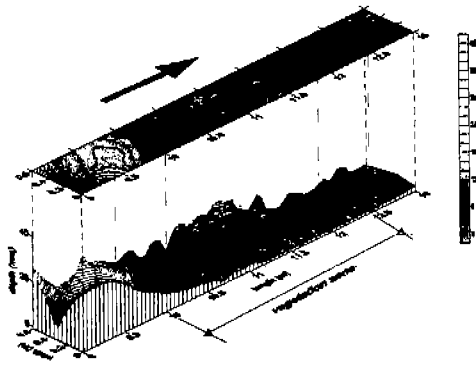
3) case-3

실험수로의 한 측면에 식생역이 존재하는 실험 case-3의 경우, 하천식생역에서 소류사의 거동을 살펴보면, 식생역 상류단 10m지점부근에서는 식생영역으로 접근하는 흐름이 식생에 의하여 난류현상이 크게 발생하여 10m지점 전후와 비교해 상대적인 하상세굴 경향이 생겼다. 흐름이 식생영역으로 유하함에 따라, 식생역에서 유속이 감소하는 반면에 비식생역의 유속은 증대하였다. 이에 따라, 식생역에서는 바닥면의 전단응력이 크게 감소하고 유사가 크게 퇴적하였다. 반면에, 비식생역에서는 식생이 없는 경우에 비해 토사의 이동량이 증가함에 따라 식생역보다는 퇴적량이 매우 적게 나타났다. 그리고, 식생역과 비식생역의 경계역(횡적으로 0.3m지점)부터 식생역바로 내측으로 유사의 집중적인 퇴적이 일어났다. 이는 소류력이 강한 비식생역에서 약한 식생역에의 소류사가 유입한 것으로 나타나고 있다. 그리고, 식생역의 안쪽으로 토사가 유송되는 도중에 토사의 한계가 생기면서, 식생설치구간(10-12.5m)내에서 식생역과 비식생역의 경계역(횡적으로 0.3m지점)에서 퇴적현상이 종방향으로 불연속 띠모양을 형성하였다. 식생역의 말단부의 배후에서는 유속이 작아 뚜렷한 토사의 퇴적현상이 일어나지 않은 것은 상류퇴적으로 인한 유사의 농도가 크게 감소되었기 때문으로 여겨진다.

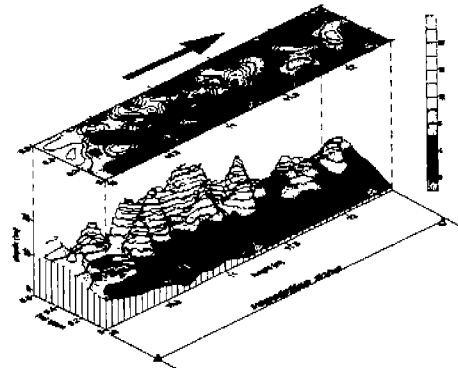
4.2 종합 비교고찰

실험 case-1과 실험 case-2에서는 수로 전체에 식생이 존재하는 경우 식생밀도의 차이에 따른 유사퇴적양상을 비교하였다. 소류거동에 영향을 미치는 어느 정도의 수리량 차이가 발생하여 정확한 정량적 비교는 어렵게 되었지만, 식생의 밀도가 늘어나는 만큼 식생역내의 유속은 빨라지면서 바닥의 전단응력이 늘어나 식생역 앞구간에 위치하는 비식생역보다는 상대적으로 퇴적되기가 어려운 양상을 보였다. 한편, 식생역이 끝나는 후반부에서는 중단방향의 공급되는 유사농도에 영향을 받는 사실이 입증되었다. 즉, 하천식생이 비수몰형태인 경우, 식생밀도에 의거 흐름에 변화가 두드러져 분명한 퇴적양상을 달리하였다. 여기서, 식생밀도가 식생자신의 입지조건을 제한할 수도 있음을 의미한다고 여겨진다.

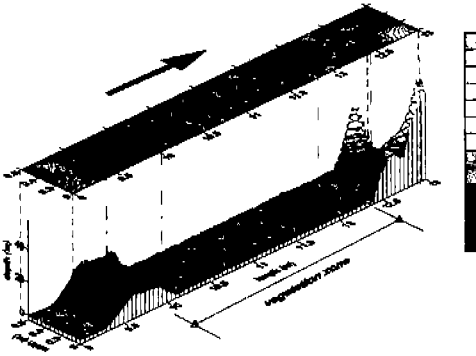
실험 case-2와 실험 case-3에서는 동일한 식생밀도하에서 식생배치 형태에 따른 퇴적양상을 비교하였다. 실험 case-2에서 보는 바와 같이 하천식생이 수로 전면에서 위치하는 경우에는 흐름의 소통단면적을 축소시켜 하상의 전단응력이 커져 결국 세굴양상을 보인다. 그리고, 실험 case-2에서



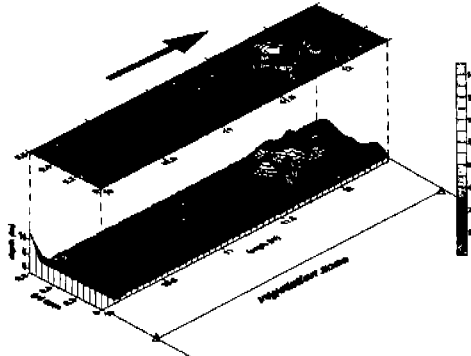
<CASE-1>



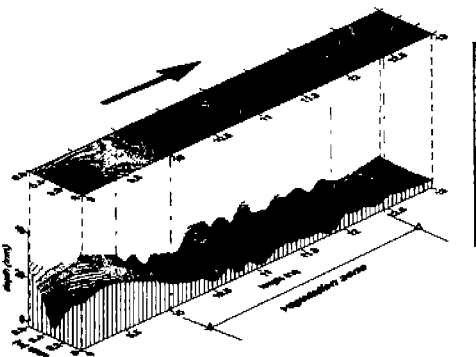
<CASE 1-1>



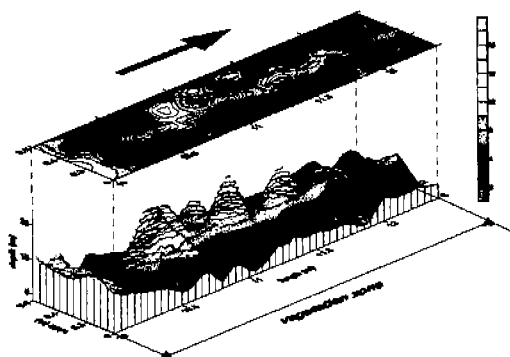
< CASE-2 >



< CASE 2-1 >



< CASE-3 >



< CASE 3-1 >

그림 3. 하도식생에 의한 유사퇴적 실험 결과 (왼쪽은 전체구간, 오른쪽은 식생역 구간임)

유속이 느린다고 가정하면, 식생밀도의 조건은 다르지만 실험 case-1과 같이 종단방향의 유사농도에 영향을 받아 식생역내 전반부에 유사 집중퇴적하는 양상을 보일 것으로 여겨진다. 그러나, 실험 case-3과 같은 형태의 수로에서는 식생설치구간(10-12.5m)내에서 식생설치수로(좌안)에 실험 case-1 혹은 실험 case-2와는 다른 퇴적양상을 보였다. 즉 식생역과 비식생역의 경계역(횡적으로 0.3m지점)에서 퇴적현상이 종방향으로 불연속 띠모양을 형성하였다. 여기서, 실험 case-3의 경우는 퇴적양상을 해석할 때는 종방향의 유사농도뿐만 아니라, 횡방향의 유사공급 및 농도도 반드시 검토되어야 함을 의미한다고 볼 수 있다.

그리고, 홍수시 실제 달뿌리풀이 대개 높이의 1/4까지 전도되며, 투과계수가 개략적으로 1/3배정도가 되는 것으로 알려져 있어, 실험 case-2는 실험 case-1의 수몰형태가 되어 수위가 식생상단부에 높여 있다는 상태라고 이해할 수 있다. 여기서, 투과계수가 작아지면 그 만큼 소통되기 어렵다는 것을 의미한다. 그러나, 홍수위가 식생 상단부근에 위치하는 '수몰상태'하에서 주어진 유량을 소통시키야 할 경우에는, 투과계수가 작아지면 그만큼 소통단면적이 줄어들어 유속은 빨라지게 된다. 따라서, 실험 case-1과 같이 비수몰형태의 식생이 수몰되면 식생밀도가 증가하여 결국 홍수소통단면적이 감소하여 하천식생역에서는 그만큼 전단응력이 커져 비수몰형태보다 퇴적하기 어려운 양상임을 뜻한다고 해석할 수 있다. 그러나, 실험 case-3과 같이 투과계수가 큰 수로로 투과계수가 거의 무한대인 수로가 동시에 존재하거나, 식생이 수몰하여 수심대(H) 식생고(K)의 비 H/K가 어느 정도 크게 되면, 실질적으로 식생이 존재하지 않은 수로나 식생역 윗부분에 유속이 빨라지고, 투과계수가 커진 식생내에서는 홍수소통이 어려워져 퇴적현상이 두드러질 것으로 실험 case-3에서 어느 정도 유추가 가능하다.

5. 결론

하천식생에 의한 유사퇴적 현상을 수리학적으로 규명하기 위하여, 하상경사 1/200인 자갈하천을 상정하고, 자갈하천에서 대표적으로 생육하는 달뿌리풀을 실험대상 식생종으로 선정하여 실험을 실시하였다. 실험수로내에 모달뿌리풀에 해당하는 모의식생을 식재한 후, 평균일경 0.3mm의 소류사를 총 1시간동안 27kg을 균등하게 공급한 결과, 거의 동일한 수리량 조건하에서 식생의 밀도와 배치에 따라 흐름의 변화와 퇴적/세굴 양상이 분명히 다르게 나타났다. 여기서, 퇴적 및 세굴이 하천식생의 분포 특성에도 영향을 미치므로 하천식생과 하도변화는 상호 밀접한 관계가 있을 것으로 평가할 수 있었다.

참고문헌

- 한국건설기술연구원, 1999, 하천식생에 의한 수리특성 예측모형개발.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft, 1987, *Hydraulische Probleme Beim Naturnahen Gewässerausbau*, Forschungs Bericht.
- Itakura, T. and T. Kishi, 1980, "Open channel flow with suspended sediments", *Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 106, HY8, 1325-1343.
- Tsujimoto, T. and Y. Shimizu, 1994, "Flow and suspended sediment in a compound channel with vegetation", *Proc. 1st Int. sym. Habitat Hydraulics, Trondheim, Norway*, pp.357-371.
- 辻本哲郎, 北村忠紀, 1996, "植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植生域の擴大過程. 土木學會水工學論文集", 第40卷, pp.1003-1008.
- 李參熙, 藤田光一, 塚原隆夫, 渡辺敏, 山本晃一, 望月達也, 1998, "礫床河川の橋樑化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割", *土木學會水工學論文集*, 第42卷, pp.433-438