

식생영역에서 입자성 유기물과 유사이송의 퇴적과정 및 모델링 Deposition Mechanism and Modeling of Particulate Organic Matter and Suspended Sediment in Riparian Vegetation

전호성*, 이우동**, 김규호***, 홍일****

Ho Seong Jeon, Woo Dong Lee, Kyu Ho Kim, Il Hong

요 지

홍수완화의 관점에서 강을 관리하기 위하여 수자원의 이용과 생태계보전, 하천흐름과 형태학적 변화들에 대하여 충분히 이해하고 합리적으로 설명하는 것이 필요하다. 최근에 수변지역에서 발달된 식생은 홍수시에 감속영역과 생물들의 피난처를 제공하는 것 이외에 횡단방향의 혼합작용을 활성화하여 유사와 식물의 씨앗 및 입자성 유기물(POM)을 포착하는 기능을 하고 특히 흐름과 유사이송 및 하도 지형변화에 큰 영향을 주기 때문에 중요하다. 입자성 유기물(POM)은 하천생태계를 지탱하는 에너지원으로서 다양한 형태로 존재하고 미생물의 분해를 받아 무기화된 식생의 번무와 물질순환의 시발점이 되기도 하지만 현재까지 식생영역 내에서 그 공급과정에 관련이 있는 운동기구에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 식생영역의 유사퇴적 및 분급작용, 입자성 유기물의 포착을 일으키는 원인과 흐름의 특징 중 식생영역 내에서 흐름방향으로 감속에 주목하여 수리 모형실험을 실시하였고 수변식생에서 부유사와 POM의 퇴적과정에 대하여 검토 및 모델링을 실시하였다.

수리 모형실험 결과 CPOM과 FPOM 모두 유사의 퇴적없이 그 자체로는 퇴적이 되지 않았고 수변식생의 종방향 이송의 경우 식생에 의해 퇴적된 부유사가 사련 형태로 형성이 되어 CPOM이 사련의 배후에서 캡처 되었다. 또한 두가지 샘플 움직임의 상호작용은 사련의 과고와 과장의 전과속도를 감소시켰다. 식생지역에서 횡방향 분산의 경우에 대해서는 각각의 유사 크기에 대한 퇴적물의 능선은 식생의 경계를 따라 형성되었고 운동의 범위는 유사 퇴적의 능선에 의해 촉진되어 횡방향으로 확산하며 확장되었다.

이러한 결과를 바탕으로 제한된 경험적인 지식보다 오히려 실험을 통하여 식생을 동반하는 장소에서 유사와 POM의 거동특성 차이 및 간섭작용을 명확히 한 후 현장에서 관측된 현상과 비교 검증이 필요하다고 사료되며 추후에 운동기구를 모델링 및 업그레이드 해 나가는 것이 앞으로의 하천생태계 예측평가에 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 식생, 부유사, 입자성 유기물

1. 서론

하도내 식생영역은 홍수시에 감속을 제공하고 횡단방향의 혼합작용을 활발히 하여 유사 또는 입상유기물(POM)의 포착대역 기능을 한다. POM은 하상생태계를 지탱하는 에너지 원(吉村, 2006)으로서 다양한 형태로 존재하고, 미생물의 분해를 받아 무기화 된 식생번무와 물질순환의 시발점이 되기도 하지만, 흐름에 의한 POM의 공급과정에 대한 연구는 아직 불충분하다. 본 연구에서는 POM의 운동기구를 밝힌다는 관점에서 흙 입자와 비중은 다르지만 소류사로 처리한 CPOM(입경 1mm 이상)으로 대상을 좁혀 특히 식생을 동반하는 장소에서 토사와의 거동특성 차이와 간섭작용을 밝힌 뒤에 운동기구를 모델링 해 나가는 것이 앞으로의 하천생태계의 예측평가에 필수적이라고 생각했다. 식생영역에서의 토사퇴적 및 분류, 입상유기물의 포착을 일으키는 흐름의 특징 중 여기에서는 하천하류방향으로의 흐름의 감소가 토사 · POM 퇴적에 미치

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 하천연구소 박사후 연구원 · E-mail : jhyoo202@kict.re.kr

** 정회원 · 경상대학교 해양산업연구소 연구원 · E-mail : leewoodong@gnu.ac.kr

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 하천연구소 선임연구위원 · E-mail : khkim1@kict.re.kr

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 하천연구소 수석연구위원 · E-mail : hongil93@kict.re.kr

는 영향에 주목한다(Jeon, 2013). 식생내 유하방향으로 감속에 주목한 수로실험에서 식생영역 내에서의 모래와 POM (경량 입자모델을 이용)의 퇴적거동을 관찰했다. 그 결과 식생영역에 퇴적된 모래가 사련을 형성하였고 모래와 혼합시킨 경우에는 CPOM은 사련의 배후에 포착되어 사련과 함께 하류에 천천히 수송되었으며 사련의 전파속도와 파고는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 기존의 유사량식(芦田, 1972)은 입경과 상대밀도의 차이를 고려하는 것이 가능하고 또한 공존하는 운송형태에서도 입경별 노출높이의 차이에 의한 한계소류력의 차이(Egiazaroff, 1965)의 고려까지 가능하지만, 저자들의 실험에서 확인된 사련의 배후에 흡수되어 퇴적하는 간섭작용은 고려되지 않으므로 본 논문에서 모델화를 시도한다. 또한 단독으로 식생영역 내를 이동하는 POM이 모래이동과의 간섭에서 퇴적하는 구조를 식생영역 내에서의 흐름 및 하상변동해석에 포함하여 연구를 실시한다.

2. 수리실험의 개요

하도내 식생영역에 의한 감속과 식생대를 수반하는 흐름의 횡단혼합에 의한 토사 및 입상유기물의 수송 퇴적거구에 대한 수로실험을 실시하고 얻어진 특징적인 결과를 아래 요약한다. 실험은 길이 20m, 폭 0.5m, 높이 0.3m의 가변경사식 순환수로에서 실시하였다. 식생은 달뿌리풀 등으로 가정하고 직경 0.25cm, 높이 10cm의 대나무 꼬치를 지그재그 모양으로 중심간격 2cm로 바닥에 깐 아크릴 판에 꽂아 배열하였다. 하도는 고정상, 노상의 조건은 매끈한 면으로 했다. 공급재료는 4종류 중에 토사는 직경 0.25mm, 비중 2.65의 모래를 이용하고 POM 모델로는 직경 1.50mm, 비중 1.26으로 한 PVC 입자를 선정하여 식생종자와 낙엽의 파편으로 구성된 유기물의 조립편인 CPOM에 해당한다고 가정했다. 실험수로의 하상구배 I_b 는 1/150이고 비식생역 흐름의 에너지 경사는 $I_{e0}=1/185$, 평균수심은 $h_f=3.5\text{cm}$ 이며, 비식생영역에서의 마찰속도는 다음식 $u_{*0}^2 = gh_0 I_{e0}$ 에 의해 산정된다. 한편 식생영역에서 마찰속도는 식생영역 내외에서 측정된 저면유속과 비식생영역에서 마찰속도 u_{*0} 의 비에서 $u_{*v}=2.3\text{cm/s}$ 로 산정하였다. 이렇게 설정한 수리조건에서의 비식생영역에서 식생영역으로 전환할 때 각 시료의 이동형태(정지, 소류, 부유)의 변화는 Shields 다이어그램에 의해 요약적으로 산정되었다. 흙과 CPOM 각각의 이동형태는 식생역 내외로 변화하고 있으며, 토사는 식생영역 내에서 정지, 나머지는 모두 이동한계를 초과한 소류상태에서 유송하는 조건이었다. 실험케이스는 토사만 흘린 경우(Case-1), 토사와 CPOM 모두를 흘린 경우(Case-2)의 2종류를 준비했다. 토사와 CPOM은 모두 식생영역 상류부의 1m 상류에서 20분간 연속적으로 일정한 농도로 토사는 7.5kg, CPOM은 500g을 공급하여 각각의 퇴적특성을 비교했다. CPOM만 흘린 경우에는 퇴적하지 않고 흘러갔다. 흐름이 평형상태에 도달한 식생영역 입구로부터 2m 구간에서 식생영역 내에 퇴적한 토사의 퇴적층 두께와 CPOM의 퇴적개수를 4분 간격으로 총 5회 측정했다. 그림 1.에 토사퇴적층의 두께와 CPOM의 퇴적개수의 시계열 변화를 나타낸다.

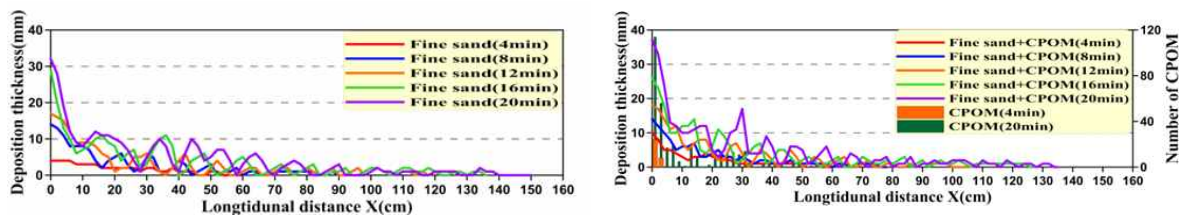


그림 1. Temporal change of deposition thickness and number of CPOM deposited

식생영역 내에서 퇴적된 토사는 모든 케이스에서 종단방향으로 물결모양으로 퇴적했다. 그 파장은 8~11cm ($L/d=320\sim440$)에서 파고는 0.4~0.6cm 정도이며, 시간과 함께 하류로 전파한다. 그것은 Shields 다이어그램에서 ripple과 dune의 구분을 겹친 Yalin에 의한 그림에서 사련으로 판단되었다. 사련이 안정적으

로 발전하고 있다고 판단한 30~60cm 구간에 주목하면, 흙과 CPOM 모두 공급한 경우의 Case-2에서는 단독적으로 흘렀던 경우에 퇴적하지 않았던 CPOM이 사련의 배후에 포착되어 사련의 진행과 함께 퇴적되어 가는 모습이 확인되었다. 사련의 진행 및 발달과 함께 CPOM은 포착·퇴적되어 전체공급량 중 77%가 사련에 포함되었다. 즉, CPOM은 사련과의 간섭에 의해 퇴적한다. 또한 사련의 파장·파고·전파속도는 표 1.와 같이 모두 Case-2에서 감소하는 것이 확인되었고, CPOM의 혼합이 사련의 발달에 영향을 주고 있는 것이 시사되었다.

	Case-1	Case-2
Wave length L(cm)	9~11	8~10
Wave height H(cm)	0.4~0.6	0.1~0.4
Propagation velocity U_w (cm/s)	0.021	0.019

표 1. Comparison of wave length, height and propagation velocity of ripple

3. 수식생영역내의 모래·CPOM의 수송

芦田·道上식은 실제 소류운동의 두가지 요소에 대한 평가식으로 구성되어 있다. 하나는 운동상태에 있는 흙의 밀도 v_g , 또 하나는 이동입자의 운동유속 u_g 에서 그 추정식은 다음과 같다.

$$v_g d^2 = \frac{1}{A_3 \mu_R} (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (1)$$

$$\frac{u_g}{u_*} = \phi_d \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (2)$$

소류사량은 이들과 아래의 관계에 있다.

$$q_B = v_g u_g A_3 d^3 \quad (3)$$

여기에서 A_3 : 모래의 차원 형상계수, μ_R : 모래의 동마찰계수(=0.4), $\phi_d=6.8$ (정수)이다. 하지만 입자의 속도는 입자수 밀도에 크게 변화되지 않지만(상대비중이 크고 입자운동에 빼앗기는 유체의 운동량이 큰 유체에 의해서 가속되는 입자의 속도는 작아진다), 운동상태의 입자수밀도는 식(1)에서 평형값이 부여되어 있는 것으로, 이보다 과다한 공급상태에서는 퇴적하고 과소한 공급상태에서는 퇴적하지 않고 내려간다. 즉 제 2장에 제시한 실험에서 퇴적을 발생시킬지 퇴적하지 않고 흘러갈지는 공급사량이 식(1)에서 주어지는 평형치보다 많을지 적을지에 의존하는 것이다. 표면입자 크기에 대한 구성의 변화도 입자군 운동중의 일종의 간섭작용으로 平野의 교환층 두께의 개념(平野, 1971)을 이용하면 일반 혼합사의 표층입도 구성의 변화를 수반하는 현상에 적용할 수 있다. 그러나 저자들의 실험에서는 모래와 CPOM의 공존상태에서는 사련의 형성과 전파에 구동되는 간섭이 뚜렷한 것으로 파악되었다. 사련에 CPOM이 도입되는 상황은 사련파고를 교환층 두께로 볼 수 있지만, 일반적으로 혼합사는 각 군의 운동은 정상적이고 평균인 반면, 본 현상에서는 모래가 CPOM에 거의 영향을 받지 않고 운동하지만, CPOM은 형성되는 사련의 산마루 배후의 와 영역에 포착되어, 사련의 이동으로 덮여 또 한파장 이동후 노출이라는 특수한 성상을 나타내고 이러한 운동과정의 간섭은 현재 표현하지 못하고 있다. 실험에서 관찰된 CPOM은 사련의 배후에서 와에 휩쓸려 퇴적한다. 상류단의 사련의 산마루 뒤에 Δt 시간 사이에 옮겨져 오는 CPOM 입자는 공급수 밀도 v_g , 입자속도 u_g , 포착율 ψ 의 곱으로 주어진다. 이들은 Δt 시간동안 개수 기준으로 $\psi v_g u_g \Delta t$ 의

CPOM이 배후에 포착되어 사련의 진행거리 Δx 에 매물한다(그림 2. 참조).

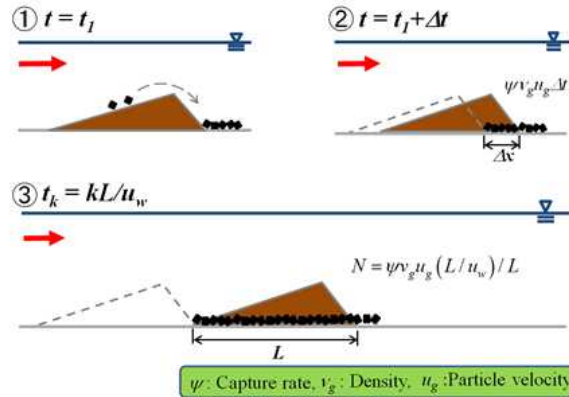


그림 2. Concept of deposition process of CPOM with ripple

이렇게 CPOM은 사련의 배후를 연결하는 선에 얇게 퇴적되어 층을 형성한다. 모래의 퇴적과 함께 사련이 신속하게 상류에서 형성되어 하류로 전파하면 1과장분의 이동시간 ΔT 마다 하류를 향해 사련개수가 증가하고 $t_k = kL/U_w = k\Delta T$ (k : 사련개수), 사련의 배후에 CPOM이 얇은 층을 이루며 퇴적한다. 이 시간 스텝마다 식생영역의 대표점 ($x_j = jL$ ($j=1 \sim k$))에서의 CPOM의 퇴적량에 대한 시간변화를 산정할 수 있다. 원점 x_1 에서 x_j 로 시간 t_k 까지의 누적퇴적량(개수기준) N_{kj} 는 다음과 같이 산정된다. 사련이 하나 형성될 때 ($t=t_1$)의 대표점은 x_1 만으로, $N_{11}^* = \psi$ 이다. ($N^* = N/[v_g(u_g/U_w)]$). $k=2$ 에서는 사련은 2개가 형성되어 사련의 이동에 따른 재노출시에 드러난 양(잔류율 β)과 상류에서의 신규공급분의 포착되는 양으로 $N_{21}^* = \psi(1+\beta)$ 이다. 하류측의 사련에서는 상류의 사련을 넘어온 입자 뿐이므로 $N_{22}^* = \psi(1-\psi\beta)$ 이다. $k=3$ 에서 사련은 3개 형성되어 가장 상류측에서는 재노출에 의해 드러난 손실을 고려하여 $N_{31}^* = \psi(1+\beta+\beta^2)$ 으로 한다. 두 번째 사련에서는 상류의 사련을 통과한 것으로부터 포착과 재노출에 의한 손실, Δt 전에 상류측에 존재한 사련의 이동에 의한 재노출, 드러난 양의 유출을 포착하는 것이므로 $N_{32}^* = \psi(1-\psi\beta^2)$ 이다. 또한 3번째 사련에서는 2개의 상류에서 사련을 넘기고 온것의 포착에 바로 위 상류의 사련의 이동에 따른 재노출분에서의 포착을 생각하면 되므로 $N_{33}^* = \psi[(1-\psi)^2 + (1-\beta)(\psi-\psi^2\beta)]$ 로 된다.

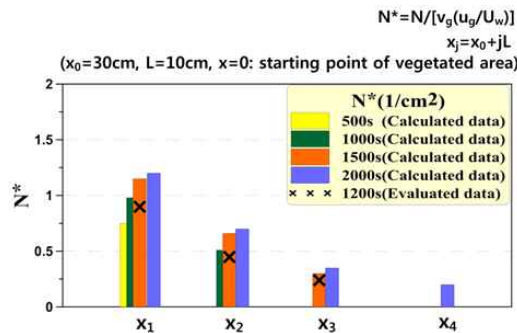


그림 3. Comparison between calculated and evaluated results of CPOM deposition

이상과 같이 순차적으로 계산함으로써, 사련과 간섭하는 거동을 보이는 POM 입자의 퇴적개수에 대한 시공간 분포를 구할 수 있다. 하지만 현재의 하상변동에 관한 수치해석에서는 유사의 기초식에 불안정을 가져오거나 지연기구를 모델에 내재시키지 않아 사련형성은 설명할 수 없다.

여기에서는 앞서 언급한 바와 같이 사련의 형성이 예상되기 때문에 그 규모와 전파특성(표 1.에서 $L=10\text{cm}$, $U_w=0.02\text{cm/s}$)을 계산결과에 겹쳐서 앞장에서 언급한 사련과의 간섭에 의해 CPOM 입자의 퇴적을 평가하였다.(그림 3. 참조)

계산함에 있어서 $\psi=0.9$, $\beta=0.5$ 로 가정하고 N^* 의 시간변화를 나타내었다. 모델에서는 500s 정도마다 사련이 형성되어 하류에 전파하고 1500s 후에는 상류에서 3개에 가까운 사련이 형성된다. 또한 실험 후 1200s에 관측된 N 의 값을 실험에서의 요약치 $U_w=0.02\text{cm/s}$, $u_g=5\text{cm/s}$ (식(2)에서 추정), $v_g=0.06/\text{cm}^2$ (투입량의 개수 환산치와 u_g 에서 산출)을 고려하고 N^* 을 표시한 것이 그림 중에 \times 표로 표시되어 본 모델로 실험결과를 대체로 잘 설명할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 식생사주에서의 입상유기물의 포착작용이 식생번무와 물질순환 등의 하천 생태계 해명에 필수적이라고 생각했다. 특히 상대밀도가 다른 입상유기물의 유사와의 간섭으로 인한 모델화에 대해서 연구를 실시하였고 입상유기물의 수송과 퇴적의 과정에 대해서는 먼저 기초실험을 통해 주목한 유사 중 특히 사련의 거동과 간섭구조에 대해 고찰하여 그것을 모델링 했다. 모델은 현재 점화식적인 표현에 머물고 있지만 보다 간결한 수식표현도 가능하리라 생각되며, 앞으로 더 독창적으로 토사이동 및 지형변화를 포함한 분석에 적용이 가능할 것으로 예상하고 있다. 또한 본 연구에서는 현안의 모델화를 우선시하여 비식생영역에서 식생영역으로 감속과정에 국한된 논의를 했지만, 사주를 대상으로 하면 또 다른 측면인 횡단혼합 현상으로 발전시키는 것이 다음의 과제로서 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 吉村千洋 · 谷田一三 · 古米弘明 · 中島典明 : 河川生態系を支える多様な粒狀有機物, 応用生態工學, 9卷1号, pp.85-101, 2006.
2. Jeon, H.S., M. Obana and T. Tsujimoto : Transport and deposition of sand and particulate organic matters on vegetated area in a river, *Proc. Multiphase Flow Sym., Jap. Soc. Multiphase Flow*, 2013.
3. 芦田和男 · 道上正規 : 移動床流れの抵抗と掃流砂に関する基礎的研究, 土木學會論文報告集, 第206号, pp.59-69, 1972.
4. Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentrations, *Jour. Hydraul. Div., ASCE*, Vol.91, HY4, pp.225-247, 1965.
5. 平野宗夫 : Armoringをともなう河床低下について, 土木學會論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.