

## 홍수터 식생이 오염물질 이동에 미치는 영향

## Impact of Floodplain Vegetation on Solute Transport

이진휘\* · 정영훈\*\* · 최성욱\*\*\*

Lee, Jinhwi · Joung, Younghoon · Choi, Sung-Uk

## 1. 서 론

최근 하천환경정비사업이 많이 시행되면서 하천경관의 향상과 고수부지 이용시설이 증가되었고, 하천이나 고수부지가 시민들의 여가활동 공간으로 많이 활용되기 시작했다. 하변에는 수목이 식재되고 습지 등을 만들어 생태공원이 조성되고 있다. 이로 인해 홍수시 하도의 통수능력이 저하되고 하천수위가 상승할 수 있으며 하도 내 식생은 호안침식과 하도형태 변화에 영향을 준다. 따라서 하천에 식재를 계획할 경우 이러한 특성들을 고려하여 공학적인 설계가 이루어져야 한다.

또한 하천의 경관을 향상시키고 고수부지를 이용하는 시민들의 편의를 위해서는 수질문제도 함께 고려되어야 한다. 산업화와 도시화로 인한 각종 오염물질들이 하천으로 유입되게 되면서 이를 분석하고 통제하는 시스템이 필요하게 되었다. 오염물질의 이동시간과 확산을 정확하게 추정하고 통제하기 위해서는 기본정보가 되는 영향인자인 흐름방향 확산계수를 정량적으로 예측할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 복단면 수로에서 홍수터 식생이 오염물질의 이동에 미치는 영향을 수치해석을 통해 검토하였다. 수치실험을 통하여 홍수터 식생의 밀도에 따른 유량 및 유속 분포, 하도변형, 그리고 종확산계수의 변화를 제시하였고 토의하였다.

## 2. 지배방정식

일반적으로 수리학에서는 유동에 의해 하도의 형태가 변하지 않는 고정상 가정을 하나 이는 유수와 하도의 상호작용이 활발한 홍수기에는 타당하지 않은 가정이다. 따라서 하도의 형태는 유수와 이에 따른 유사이동에 의해 결정되는 것으로 보는 것이 합리적이다. 유사이동에 의한 하도의 변형을 수치적으로 모의하기 위해서는 수치모형이 유동, 유사이동, 그리고 하도형태 모형으로 구성되어야 한다.

## 2.1 유동 모형

본 연구에서 사용한 유동 모형은 Wark et al. (1990)이 제시한 횡분배 모형 (lateral distribution model)로서 다음과 같다.

$$\rho gh S_x = B_g \rho C_f U^2 + F_v - \rho h \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심,  $S_x$ 는 주흐름 방향 하상경사,  $B_g$ 는 기하학적 인자 ( $= \sqrt{1 + S_x + S_y}$ ),  $C_f$ 는 흐름저항계수,  $U$ 는 수심적분된 유속,  $F_v$ 는 식생 항력항,  $\varepsilon_y$ 는 횡방향 와점성 계

\* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 · 석사과정 · E-mail : [guyjinh@yonsei.ac.kr](mailto:guyjinh@yonsei.ac.kr)\*\* 정회원 · (주) 이 산 차장 · 공학박사 · E-mail : [truss96@yonsei.ac.kr](mailto:truss96@yonsei.ac.kr) - 발표자\*\*\* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · 공학박사 E-mail: [schoi@yonsei.ac.kr](mailto:schoi@yonsei.ac.kr)

수이다. 위 식에서 식생항력항은 다음과 같이 주어진다.

$$F_v = \frac{\rho}{2} C_D a h_p U^2 \quad (2)$$

여기서  $C_D$ 는 식생의 항력계수로서 식생줄기 뿐만 아니라 잎의 영향까지도 포함하며,  $a$ 는 식생밀도,  $h_p$ 는 식생높이를 나타낸다. 또한, 식(1)에서 횡방향 와점성계수는 다음과 같다.

$$\overline{\varepsilon}_y = \chi_y U_* h \quad (3)$$

위에서  $\chi_y$ 는 무차원 와점성계수로 유속의 log 법칙에서 유도되는 포물선 형태의 와점성계수를 적분하면 0.16의 값을 얻는다.

위의 식을 해석하기 위해 중앙차분기법이 사용되었고, 비선형 차분식은 Newton-Raphson 방법을 이용하여 해석되었다. 제방의 양끝단에서 활동조건 (free slip condition)이 부여되었으며, 식생이 있는 하상에서는 바닥마찰이 무시되었다.

## 2.2 유사이동

하상에 놓인 입자의 평형조건은 다음과 같다.

$$\overrightarrow{F_D} + \overrightarrow{W_g} + \overrightarrow{F_C} = 0 \quad (4)$$

여기서  $\overrightarrow{F_D}$ 는 유수에 의해 입자에 작용하는 항력,  $\overrightarrow{W_g}$ 는 입자의 수중중량,  $\overrightarrow{F_C}$ 는 Coulomb 저항력으로 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{F_D} = \frac{1}{2} \rho c_D \frac{\pi D^2}{4} |\overrightarrow{u_r}| \overrightarrow{u_r} \quad (5)$$

$$\overrightarrow{W_g} = \rho R g \frac{\pi D^3}{6} \overrightarrow{k_t} \quad (6)$$

$$\overrightarrow{F_C} = -t v_p \rho R g \frac{\pi D^3}{6} |\overrightarrow{k_n}| \mu_C \quad (7)$$

각각의 항을 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 방정식을 얻는다.

$$|\overrightarrow{u_\Delta}| (u_b^* - v_p^* \cos \Psi) = a_c \tau_{co}^* \left( |\cos \beta| - \cos \Psi - \frac{\sin \alpha}{\mu_c} \right) = 0 \quad (8)$$

$$|\overrightarrow{u_\Delta}| v_p^* \sin \Psi + a_c \tau_{co}^* \left( |\cos \beta| \sin \Psi - \frac{1}{\mu_c} \frac{\sin \omega \cos^2 \alpha}{\sqrt{\sin^2 \omega \cos^2 \alpha + \cos^2 \omega}} \right) = 0 \quad (9)$$

위의 식은 비선형 방정식으로 Newton-Raphson 방법으로 해석 할 수 있으며, 해는 무차원 입자 속도 ( $v_p^*$ )와 흐름과 입자 운동의 사이각 ( $\Psi$ )이다. 소류사 공식으로는 Kovacs and Parker (1994)가 제시한 벡터화된 소류사량 공식을 이용하였다.

## 2.3 하도형태

유동과 유사이동에 의해 변화하는 하도형태를 계산하기 위하여 다음과 같은 하상토 보존방정식 (혹은 Exner 방정식)을 해석한다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1 - \lambda_p} \left( \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} \right) \quad (10)$$

여기서  $z_b$ 는 일정한 기준면에서부터 하상고,  $\lambda_p$ 는 하상토의 공극률,  $q_{bx}$ 와  $q_{by}$ 는 각각 x와 y 방향으로의 소류사 양을 의미한다. 등류조건 하에서 우변의 두 번째 항은 무시할 수 있으며, 중앙차분법을 이용하여 위의

식을 이산화 하였다. 본 연구에서 사면의 변형을 고려하기 위해 Menendez et al. (2008)이 제시한 활동 알고리즘 (sliding algorithm)을 이용하였다.

### 3. 확산계수 산정

하천으로 유입된 오염물질은 이송 및 확산 과정을 통하여 흐름방향, 횡방향 및 연직방향으로 이동한다. 식생이 오염물질 이동에 미치는 영향을 파악하기 위해, 1차원 수송방정식의 확산계수는 다음과 같다 (Fisher et al., 1979).

$$K = -\frac{1}{A} \int_0^W u' d \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t d} \int_0^y u' d dy dy \quad (11)$$

여기서  $A$ 는 유수단면적,  $u'$ 은 평균유속과 국부유속의 편차,  $d$ 는 국부 수심,  $y$ 는 횡방향 좌표,  $W$ 는 하폭,  $\varepsilon_t$ 는 국부 횡방향 혼합계수로서 Fisher et al. (1979)이 제시한  $0.01234m^2/s$ 을 사용하였다.

### 4. 모형의 적용

고수부지 식생이 흐름과 하도형태 및 오염물질의 이동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 1에 제시된 복단면 수로에 모형을 적용하였다. 하도 단면을 구성하는 토립자는 직경  $D = 1.3 \text{ mm}$ 인 모래라고 가정하였고, 유량과 하도경사는 각각  $Q = 0.005 \text{ cms}$ 와  $S = 0.00215$ 로 가정하였다. 이 때 조도계수  $n = 0.03$ 을 사용하였고, 저수로와 고수부지에서 무차원 와점성계수는 각각 0.16과 0.061을 사용하였다.

그림 2에 고수부지 수목식재에 의한 유속의 변화를 도시하였다. 식생밀도가 증가할수록 고수부지에서의 유속은 감소하나 저수로에서의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 3은 고수부지 식재에 따른 하도형태의 변화를 도시한 것이다. 그림에 제시된 하도형태는 모의시작 후 12분 후의 하도 단면으로 식생밀도가 클수록 저수로 사면의 침식속도가 지연됨을 알 수 있다. 그림 4는 식생밀도에 따른 흐름방향 확산계수를 나타낸 그림으로서 식생밀도가 증가할수록 흐름방향 확산계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 수치모의를 이용하여 식생된 개수로에서의 흐름과 하도형태 변화를 예측하고 식생이 오염물질 이동에 미치는 영향을 파악하였다. 이와 같은 현상을 모의하기 위한 수치모형은 흐름, 유사이동, 하도형태 변화 모듈로 구성되어야 하며 오염물질의 이동은 Fisher 등 (1979)에 제시된 흐름방향 혼합계수를 이용하여 해석하였다. 흐름 모의를 위하여 주 흐름 방향으로 등류조건을 가정하는 횡분배 모형을 이용하였다. 사면에 위치한 입자의 평형방정식을 구성하여 입자의 운동을 고려하였으며, 매시간 간격마다 하상토 보존방정식을 해석하여 유사이동에 의해 변화되는 하도형태를 계산하였다. 고수부지에서 식생에 의한 저항력 증가로 홍수터의 수심평균 유속이 감소하였고, 사면 침식속도는 지연되었다. 또한 주수로와 홍수터 사이의 유속차가 커지게 되면 식생에 의한 저항력 증가로 홍수터의 횡방향 유속이 감소하여, 주수로와 홍수터 사이의 유속차에 의한 전단력이 커지므로 흐름방향 확산계수가 증가하게 된다.

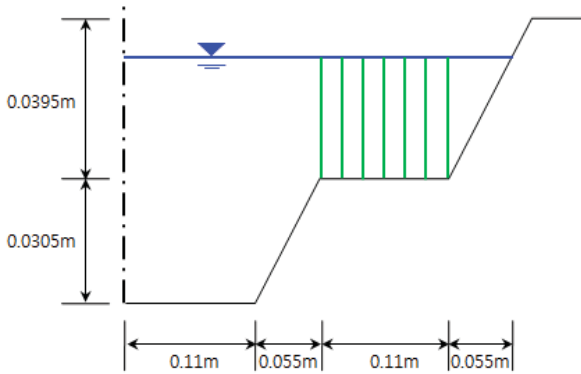


그림 1. 고수부지에 수목이 식재된 복단면 수로

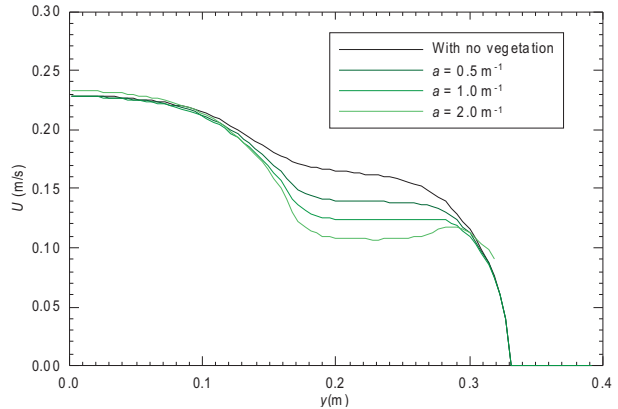


그림 2. 고수부지 수목식재에 의한 유속분포의 변화

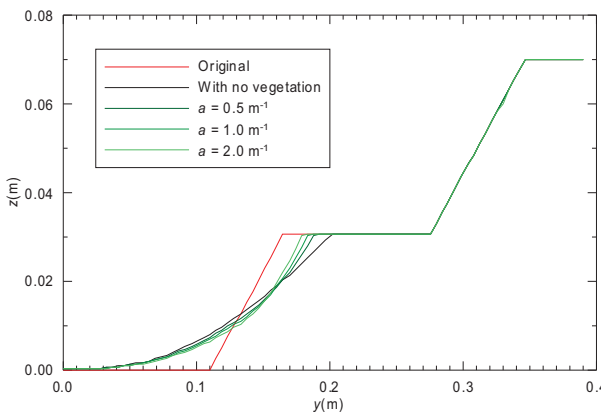


그림 3. 고수부지 식재에 따른 하도형태의 변화

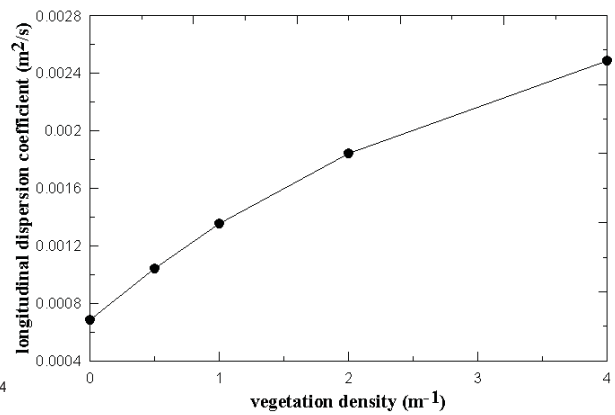


그림 4. 식생밀도에 따른 흐름방향 확산계수 변화

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kovacs, A., and Parker, G. (1994). A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 267, pp. 153-183.
2. Menendez, A.N., Laciana, C.E., and Garcia, P.E. (2008). An integrated hydrodynamic sedimentologic morphologic model for the evolution of alluvial channels cross-sections. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 2, pp. 411-426.
3. Hogo, B.F., John, E.L., Koh, C.R., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and Coastal Waters*, Academic Press Inc., U.K.
4. Wark, J.B., Samuels, P.G., and Ervine, D.A. (1990). A practical method of estimating velocity and discharge in a compound channel. *International Conference on River Flood Hydraulics*. W.R. White, ed., Wiley, Chichester, U.K., 163-172.