

수목에 의한 흐름저항 평가를 위한 1차원 상류이송 음해기법

One-Dimensional Upwind Implicit Scheme for Estimating Flow Resistance by Tree

김지성*, 김 원**, 이해은***, 김은미****
Ji Sung Kim, Won Kim, Hea Eun Lee, Eum Mi Kim

요 지

홍수터에 식재된 수목에 의한 운동량 교환은 흐름의 추가적인 흐름저항으로 작용한다. 따라서 수목으로 인한 통수능의 감소로 부분적인 유속 상승이 발생하기도 하지만, 전반적으로 평균유속이 감소하며 수위는 상승하게 된다. 실무적 사용목적으로 홍수터 수목의 저항은 통합 매개변수인 합성조도계수가 사용되고 있으나, 정량적인 조도계수의 추정은 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 경험적으로 추정되는 비정량적 합성조도계수의 한계를 극복하고, 실무적으로 사용이 용이하도록 수목에 의한 흐름저항 항을 분리한 1차원 상류이송 음해기법이 개발되었다. 개발된 기법의 평가를 위하여 균일한 단면에서 수행된 수리실험에 적용하였으며, 다양한 유량규모 및 식재조건에서 제안된 기법의 적용성 및 정확성을 확인하였다. 불규칙한 단면형상을 가진 실제 하천의 홍수터에 식재된 수목군의 경우를 가정하여 1/25 정상축척의 수리실험을 실시하였고, 100년 빈도 홍수량에서 수목식재 전후의 실측결과를 개발된 수치기법으로 계산하여 비교하였다. 개발된 기법은 모든 경우에서 사용자의 주관적인 판단 없이 정확하면서 안정적인 해를 제공하였으므로, 흐름의 2차원 효과가 상쇄될 수 있는 광폭의 자연하천에서 수목의 식재기준 분석을 위한 대안으로 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 상류이송, 음해법, 1차원 수치해석, 수목저항

1. 서 론

홍수터에 식재된 수목에 의한 운동량 교환은 흐름의 추가적인 흐름저항으로 작용한다. 따라서 수목으로 인한 통수능의 감소로 부분적인 유속 상승이 발생하기도 하지만, 전반적으로 평균유속이 감소하며 수위는 상승하게 된다. 실무적 사용목적으로 홍수터 수목의 저항은 통합 매개변수인 합성조도계수가 사용되고 있으나, 정량적인 조도계수의 추정은 매우 어려운 문제이다. 일반적인 접근방법 가운데 Arcement와 Schneider(1989)는 식 (1)과 같이 각 흐름저항 요소를 구분하여 하천의 흐름저항을 산정하는 Cowan(1956) 기법을 소개하면서 각 요소들의 조정범위를 제시하였다. 표 1에는 한국수자원학회(2005)의 하천설계기준에서 “평야의 소하천, 잡초 없음”의 평균 조도계수를 기본 조도값으로 설정하고 각 요소의 조정범위가 하천 흐름저항에서 차지하는 범위를 나타내었다.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (1)$$

* 정회원-한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 박사후연구원E-mail : jjsungk@kict.re.kr
** 정회원-한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 책임연구원E-mail : wonkim@kict.re.kr
*** 정회원-한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 석사후연구원E-mail : nunari@kict.re.kr
**** 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 석사후연구원E-mail : eunmi7004@kict.re.kr

여기서 n_b 는 거의 균일한 하도 단면을 갖는 직선하도에 대한 조도계수로 기본 조도계수로 정의한다.

표 1. 각 흐름저항 요소의 영향범위

	흐름저항 요소	조정범위	영향범위 ¹⁾
n_b	기본 조도계수	0.029	13%
n_1	지표면 불규칙성	0.000 - 0.020	0- 9%
n_2	하도 단면의 변화	0.000 - 0.015	0- 7%
n_3	흐름장애물	0.000 - 0.060	0-27%
n_4	식생	0.000 - 0.100	0-45%
m	만곡 정도	1.0 - 1.3	0-30%

1) 만곡영향을 제외하고 계산될 수 있는 최대 조도계수(0.224)에 대하여 각 요소가 차지하는 비율

Manning 계수를 사용하는 USGS 사례를 살펴보면, 식생에 의한 조도계수의 조정을 0.1까지 함으로써 그 범위가 매우 크기 때문에 적절한 값을 선정하기 위해서는 하천전문가의 주관적인 판단이 반드시 필요하여 그 값을 산정하기가 매우 어렵다. 표 1에 의하면 식생에 의한 흐름저항이 전체 하천흐름저항의 45%까지 영향범위를 차지하고 있어 정량적 수목흐름저항 산정의 필요성이 다시한번 강조된다. 따라서 본 연구에서는, 앞서 언급된 비정량적 합성조도계수의 한계를 극복하고, 실무적으로 사용이 용이하도록 수목에 의한 흐름저항 항을 분리한 1차원 상류이송 음해기법이 개발되었다. 개발된 기법의 평가를 위하여 균일단면 및 자연하천 단면의 수리실험에 적용하였으며, 다양한 유량규모 및 식재조건에서 개발된 기법의 적용성 및 정확성을 확인하였다.

2. 수목저항 평가를 위한 1차원 상류이송 음해기법의 개발

본 연구에서 사용된 1차원 흐름을 해석하기 위한 지배방정식은 Saint-Venant 식이다. 기존의 Saint-Venant 식은 하천에서 발생하는 모든 흐름저항을 Manning 계수 또는 Chezy 계수를 사용함으로써 반영하고 있다. 본 연구에서는 수목에 의한 흐름저항을 분리하기 위하여 흐름저항의 생성항을 분리함으로써 Saint-Venant 식을 수정하였다. 수정된 Saint-Venant 식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U) \quad (2)$$

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad F(U) = \begin{bmatrix} Q \\ Q^2/A + gI_1 \end{bmatrix} \quad S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gI_2 + gA(S_0 - S_b - S_v) \end{bmatrix}$$

여기서 A 는 흐름단면적, Q 는 유량, g 는 중력가속도, I_1 는 정수압력항, I_2 는 중방향 하폭변화로 생성된 측면 정수압력항, S_0 는 하상경사, S_b 는 하상마찰에 의한 에너지경사, S_v 는 수목에 의한 흐름저항 에너지경사이며, 각 항은 식 (3)과 같다.

$$I_1 = \int_0^{h(x)} [h(x) - \zeta] \sigma(x, \zeta) d\zeta \quad I_2 = \int_0^{h(x)} (h - \zeta) \left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right]_{h=h_0} d\zeta \quad (3)$$

$$S_0 = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad S_b = \frac{n^2 Q |Q|}{R^{4/3} A^2} \quad S_v = \frac{|V| |V|}{2g} C_D dN$$

여기서 h 는 수심, σ 는 수심 ζ 일 때의 수면폭, z 는 하상고, n 은 하상 Manning 조도계수, R 은 동수반경, V ($=Q/A$)는 유속, C_D 는 항력계수, d 는 수목직경, N 은 단위면적당 식재수이다.

수정된 Saint-Venant 식의 수치해석을 위하여 음해적 상류이송 기법을 개발하였다. 기본적인 형태는 김원 등(2005)이 제안한 차분식과 동일하며 식 (4)와 같다.

$$\left[I + \Delta t \alpha \left(\frac{\partial J^{+n}}{\partial x} + \frac{\partial J^{-n}}{\partial x} + G^n \right) \right] \Delta U^{n+1} = - \Delta t \left\{ (\hat{J}^+ + \hat{J}^-) \frac{\partial F}{\partial x} + (\hat{J}^+ + \hat{J}^-) S \right\}^n \quad (4)$$

여기서 Jacobian의 +, - 성분 및 고유치는 $J^\pm = T \text{diag}(\lambda_i^\pm) T^{-1}$, $\lambda_i^\pm = \frac{1}{2}(\lambda_i \pm |\lambda_i|)$, $\lambda_1 = u + c$, $\lambda_2 = u - c$ 이며, 각 요소의 방향성은 $\hat{J}^\pm = T \text{diag}(\hat{\lambda}_i^\pm) T^{-1}$, $\hat{\lambda}_i^\pm = \frac{1}{2}(\lambda_i \pm \text{sgn} \lambda_i)$ 으로 표현된다. 식 (4)의 음해적 상류이송 기법에서 수목영향을 반영하기 위하여 개발된 좌변 생성항 Jacobian G 와 우변 상류이송 생성항 처리부분은 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$G = \frac{\partial S}{\partial U} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ g \left(S_0 + \frac{7}{3} S_f + S_v + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{A}{B^2} \right) & -\frac{2gA}{Q} (S_f + S_v) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$(\hat{J}^+ + \hat{J}^-) S_i = \hat{J}_{i-1/2}^+ S_{i-1/2}^+ + \hat{J}_{i+1/2}^- S_{i+1/2}^- \quad (6)$$

$$S_{i-1/2}^+ = \begin{bmatrix} -q_i \\ -gI_{i-1/2} - gA_{i-1/2} (S_{0_{i-1/2}} - S_{f_{i-1/2}} - S_{v_{i-1/2}}) \end{bmatrix}$$

3. 수리모형 실험을 통한 개발된 수치기법의 검증

본 연구에서는 개발된 수치기법을 검증하기 위하여 균일한 하도에서의 수리실험 및 자연하천 단면에서의 수리실험 결과를 사용하였다. 먼저 균일한 하도의 실험수로는 폭 2m, 길이 40m의 구형단면수로이며, 수목은 20cm 직경의 아크릴 원통이 사용되었다. 수목식재방법은 차단울로부터 그림 1과 같이 2가지 경우를 고려하였고 유량의 범위는 실제하천 홍수의 Fr 수가 0.4 ~ 0.5 정도인 것을 고려하여 유량범위를 결정하였다. 상류단 위어를 통하여 공급유량을 측정하였으며, 수로측면 수위측정 16개소와 수로중앙 포인트게이지 3개를 이용하여 전체 수로에서의 수위를 측정하였으며 자세한 실험내용 및 결과는 건설교통부(2006)을 참조할 수 있다.

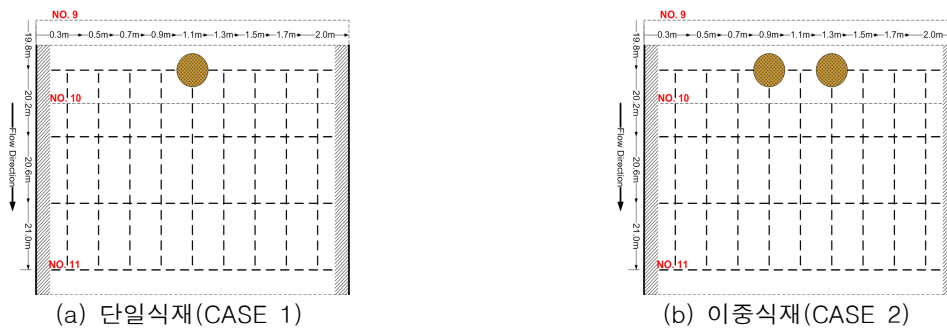


그림 1. 수목식재 방법

균일한 하도에서의 수리실험 결과를 이용한 개발된 기법의 검증결과는 그림 2와 같다. 검증을 위하여 항력계수(C_D)는 김지성 등(2008)에서 검토된 바와 같이 1.11을 사용하였다. 검증결과 단일식재의 경우(CASE 1)에서는 모든 유량규모에서 실측된 수위와 매우 잘 일치하였다. 그러나 이중식재의 경우(CASE 2)에서는 원통에 의한 단면차단율이 20%에 달하며 원통에 의한 흐름교란, 벽면효과 등 개발된 1차원 해석의 적용에 한계가 있음을 확인하였다.

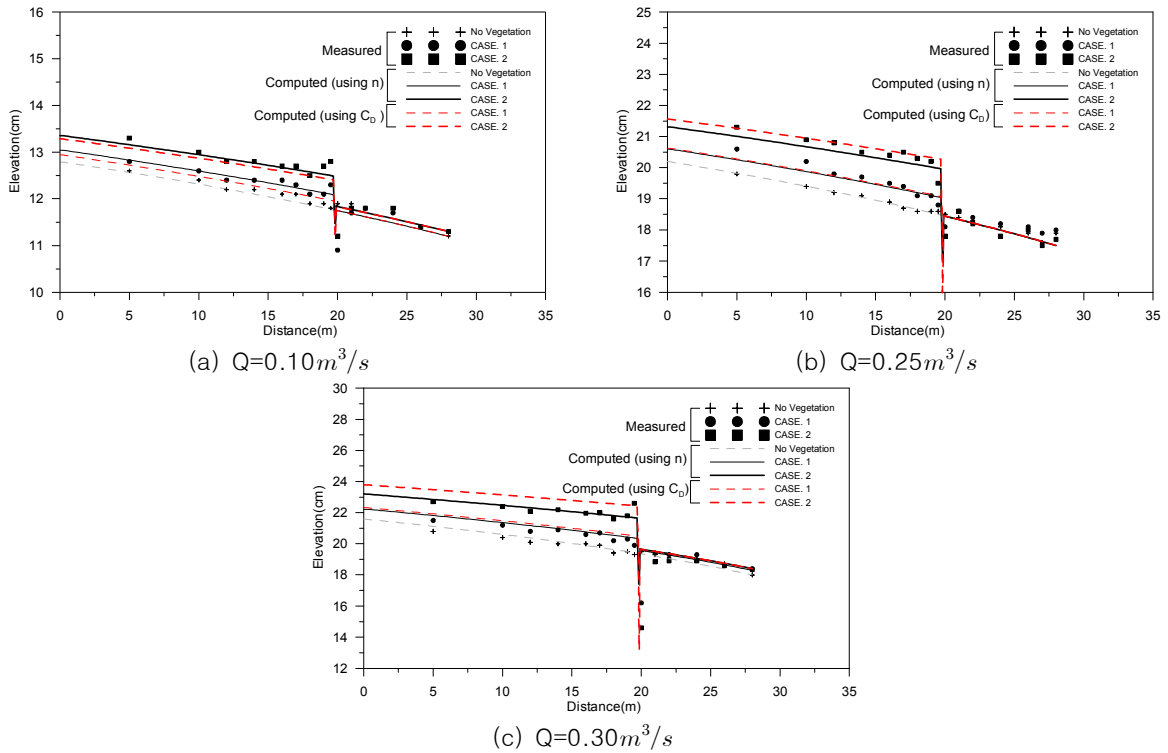


그림 2. 균일하도에서 유량규모에 따른 검증결과

실제 하천의 홍수터에 식재된 수목군의 경우, 수목에 의한 흐름저항의 증가를 평가하기 위하여 1/25 정상 축척의 수리실험을 실시하였고, 100년 빈도 홍수량에서 수목식재 전후의 실측결과를 개발된 수치기법으로 재현하였다. 수목의 식재조건은 원형기준으로 직경 20cm의 수목을 좌 홍수터의 경우 종방향 12.5m, 횡방향 12.5m 간격으로, 우 홍수터의 경우 종방향 12.5m, 횡방향 6.25m 간격으로 200m 구간에 그림 3과 같이 식재하였다. 그리고 하상 조도계수는 0.027이고, 상류단 유량 $2,180\text{m}^3/\text{s}$, 하류단 기점수위는 12.83m으로 지정하였다. 균일하도의 경우와 마찬가지로 항력계수(C_D)는 1.11이 사용되었다.



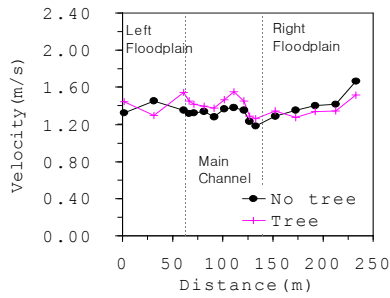
(a) 좌안



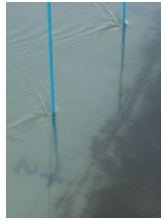
(b) 우안

그림 3. 좌우홍수터 수목식재 상태

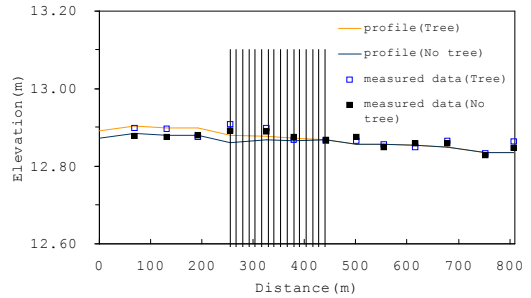
수목이 식재된 구간의 식재 전후 유속을 측정하였으며, 유속측정결과는 그림 4(a)와 같다. 식재후 주수로 부의 유속이 상승하였고, 홍수터 부분은 유속이 감소하였다. 그러나 주수로와 홍수터 평균유속의 차이가 크지 않았으므로 개발된 1차원 해석의 적용이 가능할 것으로 판단되었고, 수리실험을 통한 실측결과로부터 개발된 기법을 검증하였다. 그림 4(b)로부터 수목 식재로 인하여 추가적인 흐름저항이 발생함을 알 수 있으며, 그림 4(c)에는 수목저항으로 인한 수위 상승과 개발된 기법에 의한 해석결과를 함께 나타내었다. 실측수위와 계산수위의 비교결과 개발된 기법을 통한 수목저항의 반영이 불규칙한 자연하도에서도 잘 계산되고 있음을 알 수 있다. 본 연구 조건의 수목식재 결과, 평균 2cm의 수위상승이 있었으며, 향후 다양한 수목밀도에서의 실험을 통하여 개발된 기법을 추가적으로 검증할 필요가 있을 것이다.



(a) 유속



(b) 수목영향



(c) 수위 변화

그림 4. 수목 식재에 따른 영향 검증

4. 결론

본 연구에서는 수목영향을 정량적으로 산정하기 위하여 1차원 수치기법을 개발하였고, 개발된 기법은 균일하도 및 자연하도 단면에서 사용자의 주관적인 판단 없이 정확하면서 안정적인 해를 제공하였다. 본 연구에서 제안된 기법은 1차원 기법으로 흐름의 2차원 효과가 상쇄될 수 있는 광폭의 자연하천에서 수목의 식재 기준 분석을 위한 대안으로 사용될 수 있을 것이다. 그러나 2차원 효과가 크게 발생할 수 있는 중소하천의 경우 적용에 제한되며 향후 준2차원 기법의 개발 및 2차원 해석이 필요한 조건의 분석이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2006). **홍수터 수목관리 기술개발**, 기술보고서 ER-1-2-1-1, 자연과 함께하는 하천복원 기술 개발 연구단.
2. 김지성, 임동균, 김원 (2008). 개수로 내 장애물의 항력계수 특성에 관한 연구, **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집, pp. 1894-1899.
3. 김원, 한건연, 우효섭 (2005). 일차원 상류이송형모형의 자연하도에 대한 적용, **한국수자원학회논문집** 제 38권 제5호, pp. 333-343.
4. 한국수자원학회 (2005). **하천설계기준-해석**, 한국수자원학회.
5. Arcement, G. J. and Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339.
6. Cowan, W.L., (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients, *Agricultural Engineering*, V. 37, No. 7, pp. 473-475.