

# HEC-RAS 모형을 이용한 수목 조도 영향 분석

이두한, 이동섭, 김승기  
 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부  
 e-mail:dhlee@kict.re.kr

## Analysis of the Vegetation Roughness Effect using HEC-RAS Model

Du Han Lee, Dong Sop Rhee, Seung Ki Kim  
 Dept. of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

### 요약

본 연구에서는 국외의 대표적인 수목조도공식을 가상의 국내 중소하천 규모 하도에 적용하여 수목조도의 영향을 정량적으로 분석하였다. 수목 조도 공식의 조도계수는 수심이 수목 높이까지 증가하는 시점에서 급격하게 증가하며 수목 높이를 월류하면 조도계수가 서서히 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내었다. 산정된 수목 조도의 최대값은 0.073으로 일반적으로 하천실무에서 적용되는 0.04 보다 매우 높음을 확인할 수 있었다. 수위 상승시에는 급격한 수위 변화가 나타나 가정된 수목 조건에서는 중소규모 하천에 0.26 m의 수위 상승을 확인하였다. 수위 하강 시에는 수목 조도에 의해 상승된 수위가 장기간 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

### 1. 서론

최근 우리나라에서는 하천 내 수목의 과도한 성장과 식재로 홍수위 상승의 우려가 제기되고 있다. 하천 내 수목관리는 홍수와 생태 관리의 균형점을 찾는 다는 점에서 매우 중요하며 이를 위해서는 수목이 하천 수위에 미치는 영향을 정확하게 평가할 필요가 있다.

일반적으로 수목의 조도계수는 Manning 계수  $n$ 으로 표현되며 0.025 ~ 0.2 사이의 큰 범위를 나타내나 국내에서는 수목 조도를 정밀하게 분석한 사례가 거의 없다. 홍수위 계산 실무에서는 수목이 있는 경우에는 경험적 판단을 통해 Manning 계수를 0.04 이상의 고정된 값으로 설정하는 실정이다. Manning 계수 자체는 수심과 유속에 따라 변하는 계수이나 국내 실무에서는 고정된 값을 적용하고 있어 수목에 의한 홍수위 영향을 고려하는데 한계가 있다.

국외에서는 수목의 특성을 고려한 다양한 수목조도공식이 개발되어 적용되고 있으나 국내 하천 설계 실무에서는 적용된 사례가 거의 없다. 본 연구에서는 국외의 대표적인 수목조도공식을 가상의 국내 중소하천 규모 하도에 적용하여 수목 조도의 영향을 정량적으로 분석하였다.

### 2. 연구 방법

#### 2.1 수목 조도 공식

수목조도공식은 흐름에 의해 발생하는 수목의 저항을 수목의 물리적 특성에 기반하여 고려한다. 현재까지 이론적, 실험적 연구를 통해 제안된 대표적인 수목조도공식은 10여개에 이른다[1].

본 연구에서는 Freeman 등[2]의 공식을 적용하여 검토하였다. Freeman 등의 공식은 미공병단에서 주관한 연구로 대형수로(길이 152.4 m, 높이 1.82 m, 폭 2.44 m)에서 21종의 실제 수목을 이용한 실험을 통해 제안하였다. 실험 시 최대 수심은 1.4 m, 최대 유속은 1.4 m/s, 수목 높이 0.20 ~ 1.52 m, 수목 폭 0.076 ~ 0.91 m, 1 m<sup>2</sup> 당 수목 밀도(m) 0.53 ~ 13 등이다. 흐름에 의해 작용하는 수목 항력은 수로 하부에 수목과 연결된 변위계를 통해 측정하였다. 실험결과에 의하면 유속이 일정 값 이하에서는 유속이 증가함에 따라 항력이 선형으로 증가하나 일정 유속 이상에서는 유속 증가에 따라 항력이 지수적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Freeman 등은 수목에 의한 흐름 저항은 수목에 의해 발생하는 항력의 총합과 같다고 가정하였다. 흐름저항 특성은 수심이  $0.8h_p$ 를 초과하면 휨에 의한 영향이 증가하므로 이를 기준으로 공식을 제안하였다. 여기서  $h_p$ 는 수목 높이이다.

수목의 휨을 고려하여 항력계수는 Reynolds number, 수심, 수목 높이, 수목 종류, 수목 형태, 수목 휨강성, 수목 밀도 등

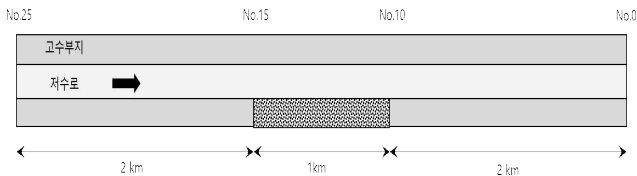
의 영향을 받는 것으로 가정하였다. 실험결과에 의하면 유속, 수심, 수목 밀도, 수목 휨강성, 수목 간격 등이 증가하면 항력 계수는 감소하였다. 또한 항력계수는 흐름에 의한 수목의 변형과 굽힘 정도에 크게 영향을 받기 때문에 단순히 흐름 상태, 잎 밀도, 수목 폐색 정도 등의 단일 인자의 영향을 분리하는 것은 불가능하였다. 실험결과에 의해 수목 항력 및 흐름 저항의 중요 인자는 ① 수목 변형 저항력에 대한 흐름에 의한 항력의 비, ② 수목 높이에 대한 수심비, ③ 하상에서 흐름에 대한 수목 폐색 정도, ④ Reynolds number 등의 4가지 인자로 분석하였으므로 이들 변수를 기준으로 실험 결과의 회귀 분석을 통해 다음과 같은 수목 조도 산정식을 제시하였다.

$$n = \begin{cases} 0.00003487 \left( \frac{E_s A_s}{\rho A_p u_*^2} \right)^{0.15} (m A_p^*)^{0.166} \left( \frac{u_* R}{\nu} \right)^{0.022} \left( \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{u_*} \right), & H \leq 0.8 h_p \\ 0.183 \left( \frac{E_s A_s}{\rho A_p u_*^2} \right)^{0.183} \left( \frac{h_p}{H} \right)^{0.243} (m A_p)^{0.273} \left( \frac{\nu}{u_* R} \right)^{0.115} \left( \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{u_*} \right), & H > 0.8 h_p \end{cases}$$

여기서  $E_s$ 는 수목 강성 계수,  $A_s$ 는  $H/4$  지점에서 측정된 수목 줄기부 단면적,  $A_p$ 는 흐름을 방해하는 수목 전면부 면적,  $A_p^*$ 는 부분 침수된 수목의 전면부 침수 순면적,  $u_*$ 는 마찰속도,  $R$ 는 동수반경,  $S$ 는 에너지 경사,  $H$ 는 수심,  $\nu$ 는 물의 동점성계수 등이다.

## 2.2 적용 방법 및 대상

본 연구에서는 수목에 의한 홍수위 영향을 검토하기 위하여 국내 중소규모 하천을 가정하고 고수부지 일정 구간에 수목이 존재하는 것으로 가정하였다. 하천 폭은 84 m, 저수로 폭은 30 m, 고수부지 폭은 좌우 각 20 m로 가정하였으며 하도의 총 길이는 5 km이며 이 중 중간 1 km의 고수부지에 수목이 존재하는 것으로 가정하였다. 수로의 종단형은 하상경사 1/2,000의 직선하도로 가정하였다(그림 1).



[그림 1] 수목 조도 검토를 위한 가상하도

수목에 대한 가정은 수목의 물리적 특성이 잘 알려진 검은 갯버들로 가정하였으며 관련 인자는 Wang과 Zhang(2019)을 참고하여 설정하였다. 가정된 수목 높이는 1.2 m, 줄기 직경 0.019 m, 수목 밀도 2.3 개/ $m^2$ , 수목 항력계수 0.88, 수목 강성 계수  $E_s$   $1.5 \times 10^8$  등이다.

최대유량은 유사한 규모 하천의 계획홍수량을 고려하여 700  $m^3/s$ 으로 설정하였으며 유입수문 곡선은 유사한 규모의 하천의 실제 유입수문 곡선을 이용하여 설정하였다. 하류 수위 조건은 등류 수위조건으로 설정하여 하류 경계 수위에 의한 영향을 최소화하였다.

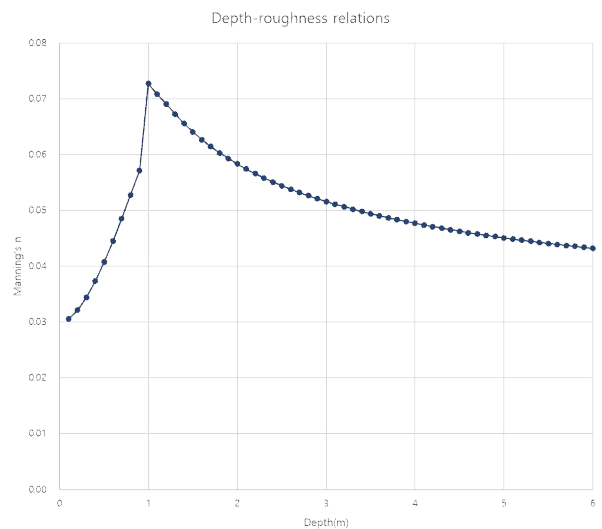
조도계수는 수목 식재 구간을 제외한 영역에서는 0.03으로 고정된 값을 설정하였고 수목 식재 구간에서는 수목의 물리적 특성에 따라 산정된 수심별 조도계수로 설정하였다. Freeman 등의 공식에서 조도계수 산정을 위해 에너지 경사 및 수심이 필요하므로 반복계산을 수행하여 수심별로 수렴된 조도계수를 계산하여 설정하였다.

이상의 지형, 조도계수, 수문조건 등을 HEC-RAS 모형에 입력하여 계산을 수행하였다.

## 3. 연구 결과

### 3.1 수심별 수목 조도

Freeman 등의 공식으로 산정된 수심별 조도계수는 그림 2와 같다. 본 연구에서 가정한 수목의 밀도 및 줄기 직경은 자연 상태의 수목에 비해 크지 않음에도 최대 조도계수는 0.073으로 높게 나타났다. 수목 높이 1.2 m 부근에서 최대 조도계수가 나타난다. 수심 0 m에서 약 1 m까지는 수심 증가에 따라 조도계수가 급격하게 증가하며 수심이 수목 높이를 월류하면 서서히 감소하는 경향을 나타내며 수심 6 m에서는 0.043의 값을 보인다. 이상과 같이 수목의 조도계수는 수심에 따라 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

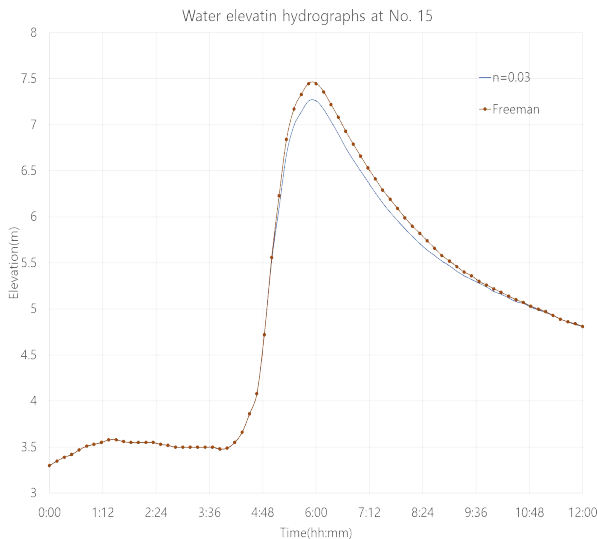


[그림 2] Freeman 등의 공식에 의한 수심별 조도

### 3.2 수목 조도에 의한 수위 영향

그림 2의 결과를 HEC-RAS 단면자료의 수심별 조도계수로 설정하여 가정한 유입수문 곡선에 따라 부정류 모의를 수행하였다. 모의 결과는 수목 구간의 조도계수를 0.03로 고정하여 모의한 결과와 비교하였다. 수목에 의한 수위차가 가장 크게 발생하는 수목 구간의 상류 지점(No. 15)에 대한 시간별 수위 곡선은 그림 3과 같다.

수목에 의한 최대 수위 상승은 유량이 최대인 시간에서 0.26 m가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 하천에서 홍수에 의한 수위 상승은 그림 3과 같이 급격하게 발생하여 수위 하강 시에는 상대적으로 완만하게 나타난다. 수목에 의한 수위의 영향도 마찬가지로 나타나는데, 그림 3에서 보는 것과 같이 수위 상승기의 수위차는 급격하게 나타나고 하강기에는 수목에 의한 상승된 수위가 장시간 지속되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 3] Freeman 등의 공식에 의한 시간별 수위 변화

### 4. 결론

본 연구에서는 수목에 의한 수위 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 수목 항력에 의한 저항을 고려하는 Freeman 등의 공식과 일반적인 하천실무에서 적용되는 고정 조도계수 방법을 비교하였다.

수목 조도 공식의 조도계수는 수심이 수목 높이까지 증가하는 시점에서 급격하게 증가하며 수목 높이를 월류하면 조도계수가 서서히 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서 산정된 수목 조도의 최대값은 0.073으로 일반적으로 하천실무에서 적용되는 0.04 보다 매우 높음을 확인할 수 있었

다.

수심별로 변하는 수목 조도계수가 하천 수위에 미치는 영향을 분석하기 위하여 HEC-RAS 부정류 모의를 수행하였으며 그 결과 수위 상승시에는 급격한 수위 변화가 나타나 본 연구에서 가정한 수목 조건에서는 중소규모 하천에 0.26 m의 수위 상승을 확인하였다. 수위 하강 시에는 수목 조도에 의해 상승된 수위가 장기간 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 현재 하천설계 실무에서 적용되는 조도계수 설정 방식으로 수목 조도를 설정하면 홍수위를 과소산정할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 재원으로 환경시설 재난재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. 이에 감사드립니다. (2022002850001).

### 참고문헌

- [1] Wang, Junna, and Zhang, Zhonglong, "Evaluating Riparian Vegetation Roughness Computation Methods Integrated within HEC-RAS", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 145, No. 6, pp. 2019.
- [2] Freeman, G. E., W. J. Rahmeyer, and R. R. Copeland. 2000. Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation. ERDC/CHL TR-00-25. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers Research and Development Center.