

개수로 내 장애물의 항력계수 특성에 관한 연구

The Study on Drag Coefficient Characteristic of Obstacles in Open Channel

김지성*, 임동균**, 김원***

Ji Sung Kim, Dong Kyun Im, Won Kim

요 지

하천 내의 자생수목군에 의한 자연적인 흐름저항의 증가, 식재를 통한 인위적인 흐름저항의 증가, 교각 등의 구조물로 인한 흐름저항을 배수계산에 반영하기 위하여 일반적으로 Manning n 값이 사용된다. 그러나 흐름 장애물로 인하여 증가된 Manning n 값의 선정은 Chow(1950) 등이 제시한 도표를 활용하는 방법과 같이 공학적 판단을 요하는 작업이다. 그러므로 객관적으로 흐름저항을 산정할 수 있는 기법의 개발이 필요하며, 이를 위한 기초연구로 본 연구에서는 개수로 내 장애물의 항력계수 특성에 대하여 분석하고자 한다. 일반적으로 항력계수는 유체의 유속에 따라 변화되므로, Reynolds 수 또는 Froude 수에 따라 변화되는 것으로 알려져 있다. 그러나 그 범위가 연구자에 따라 상이하어 이를 정량화 할 필요가 있으며, 본 연구에서는 실험자료로부터 개수로 내 장애물의 항력계수 특성을 분석하고, 개수로에서 일반적으로 발생할 수 있는 Reynolds 수 또는 Froude 수 범위에서 기존 연구결과들을 비교분석하여 항력계수의 범위를 정량적으로 정립하고자 한다. 일반적인 상류 흐름조건에서 평균 항력계수(C_D)는 1.11로 계산되었고, Froude 수의 증가에 따라 항력계수의 변동성이 점차 증가하였으며, 이러한 결과로부터 개수로 내 장애물로 인한 흐름저항을 반영하기 위하여 Manning n 값으로 산정된 결과는 평균 0.01의 편차를 보이는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 항력계수, Reynolds 수, Froude 수, 개수로

1. 서 론

최근 하천의 주요 역할 중 환경적 측면의 인식이 증가하고 있으며, 이를 만족시키기 위하여 홍수관리와 생태환경을 동시에 고려하는 지속가능한 하천유지관리 방안의 수립이 필요하다. 하천 내에 존재하는 수목은 흐름저항 요소로서 평균유속을 줄이고 통수능을 감소시켜 수위를 상승시키게 되므로 과거 치수 중심의 하천 관리에서는 부정적인 역할을 한다. 뿐만 아니라 홍수시 하천 내 수목의 전도는 하천구조물 붕괴 및 하도 폐색의 요인이 되므로 하천구역 내 수목 식재에 대하여 매우 부정적인 입장을 고수하여 왔다. 치수를 위하여 금지시켜왔던 하천구역 내 나무심기에 대하여, 생태적 환경 조성과 하천 경관, 지역 주민의 휴식처 제공을 목적으로 치수계획에 지장을 주지 않은 범위에서 나무를 심을 수 있도록 하천법 시행령이 개정('97. 10. 30) 되었다(건설교통부, 1998). 그러나 식생 및 수목의 도입 및 유지에 따른 홍수위 상승 등과 같은 치수적 문제 및 생태적 영향에 대한 평가 및 대응 기술이 크게 미흡하며, 무엇보다도 하천식재가 홍수 흐름에 미치는 영향에 대한 정량적 평가기준의 마련이 절실하다.

본 연구에서는 식생 특히 수목에 의한 흐름저항과 관련된 연구에 대하여 집중적으로 분석하고 그 결과를

* 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 박사후연구원·E-mail : jjsungk@kict.re.kr

** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 연구원·E-mail : himdk@kict.re.kr

*** 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원·E-mail : wonkim@kict.re.kr

정리하였으며, 수목과 같은 개수로 내 장애물에 의한 흐름저항을 정량적으로 산정하는 방안을 모색하고 그 타당성을 검토하였다.

2. 수목영향 평가 연구동향

하천에 식재된 수목영향의 평가는 크게 수목에 의한 저항을 하천흐름의 모든 저항요소와 함께 하나의 매개변수(bulk flow parameter)인 Manning n 으로 취급하는 기법과 수목군을 단순 사수역으로 고려하여 계산하는 방법, 수목에 의한 사수역과 수목 경계에서의 간섭작용에 의한 운동량 손실을 분리하여 고려하는 방법으로 구분된다. 수목영향을 조도계수 또는 단순 사수역으로 고려하는 방법은 수목영향을 평가하기 위하여 수행되는 1차원 및 2차원 흐름해석에서 실무적으로 사용되고 있는 기법이며, 수목에 의해서 발생하는 난류 특성을 분리된 항으로 고려하는 방법은 수목주변의 세밀한 유속장의 조사를 위하여 최근까지 연구되고 있는 기법이다. 본 연구에는 식생의 영향을 실무에서 적용할 수 있는 기법을 중심으로 연구동향을 분석하였다.

수목에 의한 흐름저항은 Petryk과 Bosmajian(1975)의 방법을 사용할 수 있다. 그들은 흐름방향의 운동량 방정식으로부터 평균유속 산정공식을 유도하고, Manning 평균유속공식과 비교하여 식 (1)과 같이 수목에 의한 영향을 포함한 하천 흐름저항 산정공식을 제안하였다.

$$n = n_0 \sqrt{1 + \left(\frac{C_D \times \sum A_f}{2gAL} \right) \left(\frac{1}{n_0} \right)^2 R^{4/3}} \quad (1)$$

여기서 n_0 는 하천 바닥저항을 의미하는 기본 조도계수이고, C_D 는 항력계수, A_f 는 f 번째 수목의 흐름방향 투영면적, A 는 흐름단면적, L 은 대상구간 길이, R 은 동수반경이다.

Wu 등(1999)은 바닥에 수목이 식재된 단면 내의 평균유속이 균일하다고 가정하여, 측면에서 발생하는 흐름저항으로부터 수목과 바닥에 의한 흐름저항을 조도계수 n 으로 산정하는 식을 제안하였다. 흐름이 정상상태를 유지할 경우, 대상구간에서 작용하는 전체저항력과 식생에 의해 발생된 항력은 같다고 가정할 수 있으므로 수목이 완전히 잠기지 않은 정수식생과 수목전체가 완전히 잠긴 침수식생으로 구분하여 식 (2)와 같이 식생항력저항을 반영한 조도계수 n 을 산정할 수 있다.

$$n = \left(\frac{D^{2/3}}{\sqrt{2g}} \right) \sqrt{C_D'}; \text{ 정수식생} \quad n = \left(\frac{D^{1/6} T^{1/2}}{\sqrt{2g}} \right) \sqrt{C_D'}; \text{ 침수식생} \quad (2)$$

여기서 D 는 수심이고, T 는 식생의 높이, 그리고 C_D' 는 식생항력계수로서 식 (3)과 같은 식생 밀도(λ)와 항력계수(C_D)의 곱을 의미한다.

$$\lambda = \frac{\sum A_f}{AL} \quad (3)$$

식 (1)에서 식생에 의한 조도계수가 하상마찰에 의한 조도계수보다 현저히 클 경우, 정수식생의 Wu 등의 식과 Petryk과 Bosmajian의 식은 동일하다. 일본의 리버프론트센터에서는 수목이 흩어져 있는 고수부의 조도계수를 고려하기 위하여 수목의 줄기부분과 수관부분을 구분하여 고려하였다. 수목의 수관부 아래 줄기 부분의 항력을 W_b , 수관부의 항력을 W_u , 지표면의 저항을 W_f 로 하고, 이 3가지 힘의 합과 유수에 작용하는 중력이 균형을 이루고 있다고 생각하면, 식 (4)가 성립한다.

$$N^2 = \frac{h^{1/3}}{\rho g u^2 B} (W_f + W_d + W_u) \quad (4)$$

여기서 우변 괄호 내의 각 항은 식 (5)와 같다.

$$W_f = \frac{\rho g u^2 n_b^2 B}{h^{1/3}} \quad W_d = \frac{1}{2} a B C_D \rho D h u^2 \quad W_u = \frac{1}{2} a B C_u \rho a_u u^2 \quad (5)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, B 는 수면폭, h 는 수심, n_b 는 하도바닥 조도계수, B 는 수면폭, D (m)는 수목의 줄기지름, 단위면적당 a (그루/m²)의 밀도이다.

줄기부분만 침수하는 경우 즉 $h \leq h_0$ 일 때는 $W_u=0$ 이므로, 합성조도계수 N 은 식 (6)과 같다.

$$N = \left[n_b^2 + \frac{a}{2g} C_D D h^{4/3} \right]^{1/2} \quad (6)$$

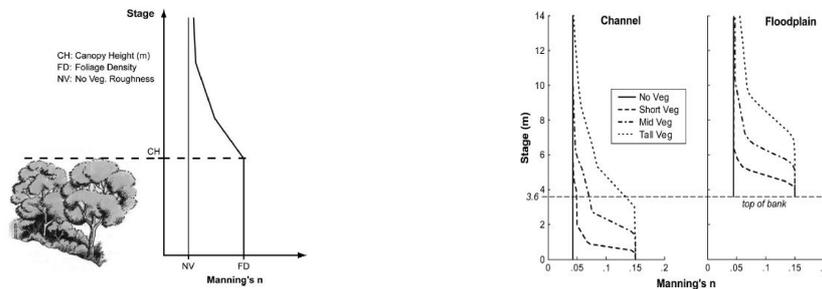
수목군을 단순 사수역으로 고려하는 방법은 Cunge 등(1980)에 의해 소개된 바와 같이 매우 일반적인 방법이다. 1차원 모형을 사용하여 홍수터의 수목영향을 평가하기 위하여 먼저 식 (7)과 같은 연속방정식이 사용된다.

$$\frac{\partial A_{st}}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

여기서 A_{st} 는 홍수터를 포함한 전체 흐름단면적이다. 전체 흐름단면적의 시간에 따른 변화는 홍수터를 포함한 전체 수면폭 b_{st} 를 사용하여 식 (8)과 같이 근사화될 수 있다.

$$\frac{\partial A_{st}}{\partial t} = b_{st} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

한편, 운동량방정식의 해법에는 수목군 내의 운동량변화를 무시하고 사수역으로 처리하여 주수로부의 수면폭과 흐름단면적으로 고려한다. 이러한 방법은 주수로에서 흐름방향의 모든 유수가 소통되는 것을 가정한 것이다. 그러므로 홍수터는 단지 흐름방향의 유속이 없는 저수영역으로 가정되며, 횡단면 내의 전반적인 운동량 흐름에 기여하지 않는 것을 의미한다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 FLDWAV, UNET 모형에서는 이와 같은 방법을 사용하고 있다. Anderson 등(2006)은 기존 FLDWAV 모형에서 수목의 영향을 사수역으로 처리함에 있어 침수식생의 경우를 고려하지 못하는 한계를 극복하기 위하여 Fig. 1과 같이 수심에 따른 조도계수의 변화를 고려하였고, 주수로와 홍수터의 식생상황을 분석하여 수심에 따른 조도계수의 변화를 고려하였다. 그 결과 주수로 및 홍수터의 식생은 홍수파의 전파속도, 수문곡선의 감쇠 및 왜곡도에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였고, 침수 홍수량이 큰 경우보다 비교적 작은 홍수에서 식생에 의한 영향이 민감함을 확인하였다.



(a) 수목영향의 반영

(b) 주수로와 홍수터에서의 조도계수

그림 1. 수심에 따른 조도계수를 활용한 식생영향 반영(Anderson 등, 2006)

3. 수목영향의 정량적 산정방안

2장에서 검토된 바와 같이 수목에 의한 흐름저항을 Manning 조도계수 n 으로 반영하기 위해서는 실무적

으로 Chow(1950) 등이 제시한 도표를 활용하는 방법 또는 2장에서 검토된 방법이 사용될 수 있으나, m 값의 범위가 너무 크거나 n 산정식 적용에 있어 부적절한 값의 사용 등으로 산정된 결과의 차이가 클 수 있다. 그리고 수목에 의한 흐름저항과 하상저항 등 단면 내 모든 흐름저항을 1차원적으로 나타내기 위해서는 정밀도 높은 합성조도계수의 설정이 필요한데, 합성조도계수는 수목의 밀도, 직경, 유량, 수위 등에 따라 변화하므로 적절한 추정이 매우 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 정상부등류 운동량방정식에서 수목, 교각 등의 장애물로 인한 흐름저항을 정량적으로 산정하기 위하여, 장애물에 작용하는 항력을 변화하는 흐름조건에서 직접 산정할 수 있는 방안을 모색하였다. 다시 말해서 흐름저항을 반영하기 위한 변수로 항력계수(C_D)를 직접 사용하였다. 본 연구에서 사용된 정상부등류 운동량방정식은 식 (9)와 같다.

$$\sqrt{\frac{u^2}{2g}} C_D \sum A_P + \tau_w PL = B \left[\sqrt{h_3^2 \left\{ \frac{\Delta h}{h_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{h_3} \right)^2 \right\}} - u_3^2 h_3 \left(\frac{\Delta h/h_3}{1 + \Delta h/h_3} \right) \right] + \sqrt{ALS_0} \quad (9)$$

수목저항 하상저항 정수압력항 운동량 중력항

여기서 S_0 는 하상경사이다.

일반적으로 항력계수는 유체의 유속에 따라 변화되므로, Reynolds 수 또는 Froude 수에 따라 변화되는 것으로 알려져 있다. 그러나 그 범위가 연구자에 따라 상이하여 이를 정량화 할 필요가 있으며, 본 연구에서는 개수로 내 장애물에 대한 항력을 측정된 Carrbeneau와 Holley(2001) 실험자료로부터 개수로 상류 흐름조건에서 항력계수 특성을 분석하였다. 그들은 28가지 유량 조건에서 개수로 내 장애물의 전후에서 실측 수위로부터 배수계산으로 항력계수를 간접 산정하였다. 본 연구에서는 개수로 내 장애물에 의한 흐름교란을 고려하지 않고 배수계산으로 산정된 항력계수(Carrbeneau와 Holley, 2001)와 흐름교란을 고려하여 산정된 항력계수를 비교함으로써 적절한 항력계수의 산정방법에 대하여 검토하였다. Carrbeneau와 Holley(2001)는 흐름교란에 의한 수심을 측정하지 않았기 때문에, 한국건설기술연구원에서 개발된 SNS 모형(과학기술부, 2006)을 이용하여 그림 2와 같이 실험결과를 재현하였다.

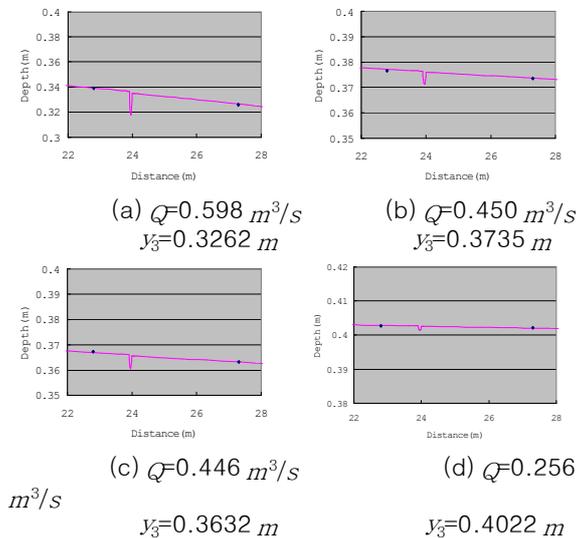


그림 2. SNS 모형을 이용한 실험결과 재현

그림 3. Froude 수에 따른 항력계수 산정결과 비교

그림 3에서는 본 연구에서 고려한 방법으로 산정된 항력계수와 흐름교란을 고려하지 않고 산정된 항력계수를 함께 나타내었으며, 흐름교란을 고려하지 않고 산정한 Carrbeneau와 Holley(2001)의 배수계산결과와 비교하여 전반적인 상류 흐름조건에서 항력계수의 범위가 감소하였다. 평균 항력계수(C_D)는 1.11로 계산되었고, Froude 수의 증가에 따라 항력계수의 변동성이 점차 증가하였으며, 표준편차는 0.405로 계산되었다. 항력계수의 편차가 흐름저항에 미치는 영향을 분석하기 위하여 식 (1)의 Petryk과 Bosmajian 방법으로 Manning m 값을 산정하였다. 산정된 조도계수 m 은 SNS 모형을 이용하여 보정된 조도계수와 그림 4에 비교

하였다.

비교결과, 평균항력계수와 항력계수의 변동성(± 0.405)을 고려하여 산정된 조도계수가 평균 0.01의 범위를 나타냄을 알 수 있다. 이는 수목영향을 조도계수로 고려한 기존 연구에 비하여 매우 작은 범위를 나타내는 것이다. 이러한 결과의 타당성을 검토하기 위하여 SNS 모형을 이용하여 보정된 조도계수와 비교한 그림 4(b)로부터 모든 유량조건에서 타당한 범위를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

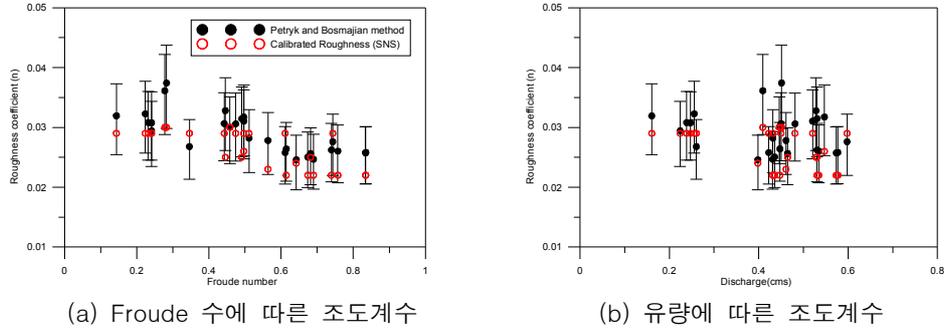


그림 4. 항력계수의 변동성에 따른 조도계수의 민감도

4. 결 론

본 연구에서는 수목, 교각 등과 같은 개수로의 장애물로 인한 흐름저항을 정량적으로 산정할 수 있는 기법을 검토하였다. 이를 위하여 기존 실험자료를 사용하였으며, 미 측정된 수위를 재현하기 위하여 SNS 고정확도 수치모형을 이용하였다. 분석결과 전반적인 상류흐름 조건에서 항력계수는 1.11의 값을 나타내었으며, 표준편차는 0.405로 계산되었다. 이러한 항력계수의 변동성으로부터 조도계수 n 으로 산정한 결과는 0.01의 범위를 나타내었으며, 수치모형으로 보정된 조도계수가 그 범위 내에 존재함을 확인함으로써 개수로 내 흐름저항을 정량적으로 산정하였다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업인 자연과 함께하는 하천 복원 기술개발 연구단(ECORIVER21)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1998). 하천구역 내 나무심기 및 관리에 관한 기준
2. 과학기술부 (2006). 고정확도 하천홍수 해석기법 개발
3. 리버프론트정비센터 (1999). 河川에서 樹木管理의 案內, 山海堂.
4. Anderson, B.G., Rutherford, I.D., and Western, A.W. (2006). "An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves." *Environmental Modeling & Software*, 21, pp. 1290-1296.
5. Carrbeneau R.J. and Holley E.R (2001). *Backwater effects of bridge piers in subcritical flow*, FHWA/TX-0-1805-1.
6. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
7. Cunge, J.A., Holly, F.M., and Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman Advanced Pub., London.
8. Petryk, S., and Bosmajian, G. III. (1975). "Analysis of flow through vegetation." Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *Journal of the Hydraulics Division*, v. 101, no. HY7, p. 871-884.
9. Wu, F.C., Shen, H.W., and Chou Y.J. (1999). "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and

submerged vegetation.” *J. Hydraul. Eng.* Vol. 125, No. 9, pp. 934–942.