

밀집구조물이 본류에 미치는 영향

윤태훈*, ○이종욱**

1. 서 론

자연하천이나 인공하천에서 식생이 흐름에 미치는 영향은 비교적 많은 연구가 이루어져 왔다 (Chow¹⁾, Kouwen²⁾). 그러나 이들의 연구는 유속이 빨라짐에 따라 식생이 흐름방향으로 유동하여 저항력이 감소되는 것에 초점이 맞추어져 있다.

구조물이 본류에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 흐름에 대하여 식생의 유동이 없는 경우여야 하므로 본 연구에서는 비교적 큰 식생에 대해 연구된 Li & Shen³⁾의 연구를 기초로 하고 있으며 노랑대교나 강변복로처럼 흐름방향으로 설치된 구조물의 영향을 평가하는 것이 주목적이다.

2. 항력계수의 결정

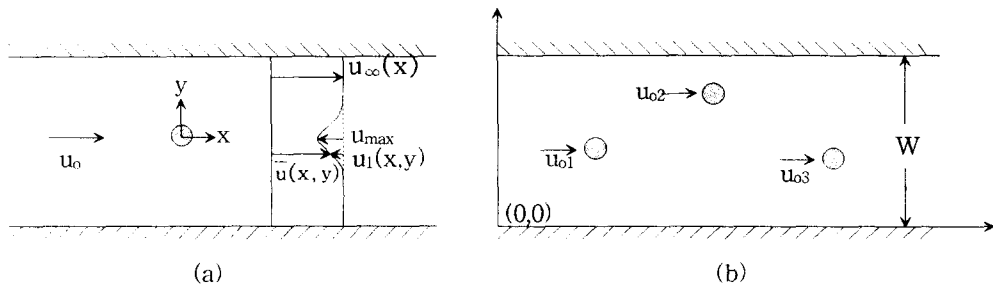


그림 1. 교각에 의한 유속의 변화와 유속의 정의도

Petryk과 Yano는 실험자료를 통하여 교각의 하류에서 유속예측식을 제안하였다.

* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 한양대학교 토목공학과 석사과정, 정회원

2.1 단일교각

1) Petryk의 제안식

$$u_1 = \frac{u_{\max}}{2} \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi y}{2b_{1/2}} \right) \right\} \quad (1)$$

여기서, $\frac{u_{\max}}{u_o} = -0.90 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{-0.7}$ (2)

$$\frac{2b_{1/2}}{C_d d} = 0.48 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{0.59} \quad (3)$$

C_d = 항력계수

d = 교각의 지름

$b_{1/2}$ 는 $u_1 = u_{\max}/2$ 인 곳에서의 후류폭(wake width)의 1/2

하상경사가 있을 경우는 식2를 식4로 대체하여 사용한다.

$$\frac{u_{\max}}{u_o} = -0.9 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{-0.7} \left(\frac{1}{1 + \frac{gxS_o}{u_o^2} / 2} \right)^{3/2} \quad (4)$$

여기서, S_o 는 하상경사이다.

2) Yano의 제안식

Petryk의 제안식중 계수만을 수정하여 아래의 식을 제안하였으며 이들의 제안식을 이용하면 교각에 의한 유속의 변화를 예측할 수 있다(식8).

$$\frac{u_{\max}}{u_o} = -0.83 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{-0.5} \quad (5)$$

$$\frac{2b_{1/2}}{C_d d} = 0.57 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$\frac{u_{\max}}{u_o} = -0.83 \left(\frac{x}{C_d d} \right)^{-0.5} \left(\frac{1}{1 + \frac{gxS_o}{u_o^2} / 2} \right)^{3/2} \quad (7)$$

$$\bar{u}(x, y) = u_{\infty} + u_1(x, y) \quad (8)$$

2.2 다중교각

2번째 교각의 접근유속은 첫 번째 교각에 의한 유속의 변화, 즉 식8에 의해서 구한 해를 이용하여 구할 수 있다(식9).

$$\begin{aligned}
 u_{o2} &= \bar{u}(x_2, y_2) \\
 &= u_{\infty}(x_2) + u_1\{(x_2 - x_1), (y_2 - y_1)\} \\
 u_{cc}(x_2) &= u_o - \frac{1}{W} \int_w u_1\{(x_2 - x_1), (y - y_1)\} dy
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

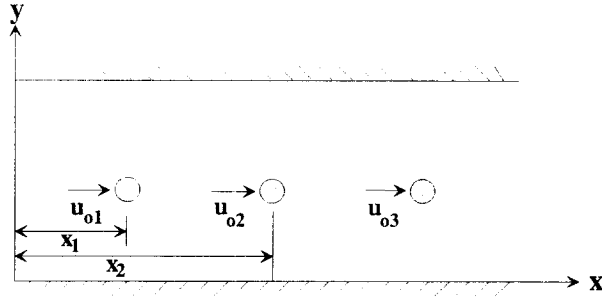


그림 2. 일렬의 다중교각

1) Petryk

$$u_{total} = u_1 + u_2 + u_3 + \dots \tag{10}$$

식10의 선형화가정에 의하여 식9를 일반식으로 나타내면 식11과 같다.

$$u_{on} = u_{\infty}(x_n) + \sum_{i=1}^m u_i\{(x_n - x_i), (y_n - y_i)\} \tag{11}$$

$$u_{cc}(x_n) = u_o - \frac{1}{W} \sum_{i=1}^m \int_w u_i\{(x_n - x_i), (y_n - y_i)\} dy \tag{12}$$

여기서 m은 n번째 교각에 영향을 미치는 교각의 수, 즉 n-1이다.

2) Yano

Petryk의 식10의 가정 대신 식13을 사용하였다.

$$u_{total}^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots \tag{13}$$

$$u_{on} = u_{\infty}(x_n) + \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2\{(x_n - x_i), (y_n - y_i)\}} \tag{14}$$

$$u_{cc}(x_n) = u_o - \frac{1}{W} \sqrt{\sum_{i=1}^m \int_w u_i^2\{(x_n - x_i), (y_n - y_i)\} dy} \tag{15}$$

2.3 항력계수의 결정

교각에서의 항력은 수심, 교각의 직경과 접근유속의 함수이며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$F_i = \frac{1}{2} C_d \rho u_{oi}^2 d_i D \tag{16}$$

여기서 F 는 항력, C_d 는 다른 교각에 의해 간섭되지 않은 항력계수로서 1.2로 가정된다. u_0 는 식11이나 식14를 이용하여 구한 접근유속, d 는 교각의 직경이며 D 는 수심이다.

각 교각의 평균항력계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{C_{di}} &= \frac{F_i}{\frac{1}{2} \rho u_0^2 d_i D} = \frac{\frac{1}{2} C_d \rho u_{oi}^2 d_i D}{\frac{1}{2} \rho u_0^2 d_i D} \\ &= \frac{u_{oi}^2}{u_0^2} C_d \end{aligned} \quad (17)$$

3. 조도계수의 산정

Petryk과 Bosmajian은 식생이 있는 하천에서 운동량방정식을 기초로 하여 다음식을 유도하였다.

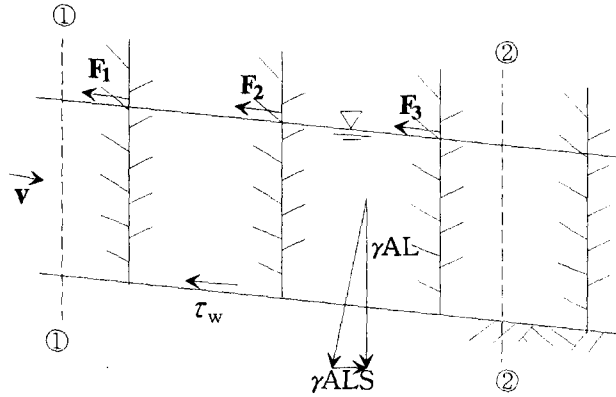


그림 3. 식생이 있는 수로에서의 흐름도

단면1과 단면2사이의 검사체적에서 x방향의 운동량의 합은 0이다.

$$\sum F_x = \gamma ALS - \sum F_i - \tau_w PL = 0 \quad (18)$$

여기서 F_i 는 i 번째 식생의 항력, τ_w 는 바닥전단응력이며 각각 식19와 20으로 나타낼 수 있다.

$$F_i = \frac{C_d \gamma V_i^2 A_i}{2g} \quad (19)$$

$$\tau_w = \gamma \left(\frac{A}{P} \right) S_e \quad (20)$$

여기서 S_e 는 에너지 경사이다.

마냥공식, 식19와 20을 식18에 대입하고 정리하면,

$$\gamma ALS - \gamma C_d V^2 \sum A_i 2g - \gamma V^2 n_p^2 R^{1/3} PL = 0 \quad (21)$$

$$V^2 = \frac{S}{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} + n_b^2 R^{4/3}} \quad (22)$$

마닝공식과 식22를 같게 놓으면 다음과 같다.

$$\dot{V}^2 = \frac{1}{n^2} R^{4/3} S = \frac{S}{\frac{C_d \sum A_i}{2gAL} + n_b^2 R^{4/3}} \quad (23)$$

식23을 n의 항으로 정리하면 식생에 의한 조도계수의 증가를 고려할 수 있다.

$$n_i = n_b \sqrt{1 + \frac{\sum C_{di} A_i}{2gAL} \left(\frac{1}{n_b}\right)^2 R^{4/3}} \quad (24)$$

여기서, n_b 는 식생이 없는 경우의 조도계수, $\frac{\sum C_{di} A_i}{2gAL}$ 은 식생의 밀집도를 나타내며 $\overline{C_{di}}$ 는 식17에서 구한 평균항력계수, A_i 는 흐름방향으로 투영된 식생의 면적, A 는 수로의 단면적, L 은 식생이 존재하는 수로의 거리이며 R 은 동수반경이다.

4. 적 용

식24에 의해 계산된 조도계수의 영향을 평가하기 위하여 100m×40m, 수심 10m의 직사각형 수로에 직경 1m의 교각 5개를 설치하고 유입부에서 100cms의 유량을, 유출부에서는 10m의 수위를 경계조건으로 하여 각 교각에서의 조도계수를 산정하였다.

먼저 Petryk과 Yano의 제안식에서 평균항력계수를 구한 후 조도계수가 결정되었으며 표1은 각 교각에서 이 값을 나타낸 것이다.

표 1. 각 교각에서의 평균항력계수와 조도계수

구 분	평 균 항 력 계 수					조 도 계 수				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Petryk	1.200	1.016	0.917	0.849	0.795	0.032	0.038	0.042	0.045	0.048
Yano	1.200	0.932	0.771	0.653	0.561	0.032	0.037	0.041	0.043	0.047

일반적으로 경계처리가 용이한 유한요소법을 이용하면 하천의 교각 등의 구조물을 쉽게 격자 망에 표현할 수 있다. 그러나 수로의 폭에 비하여 길이가 긴 대부분의 하천에서 흐름방향으로 설치된 밀집구조물을 표현하는 것은 단순하지 않으며, 요소가 대단히 증가하게 되어 계산시간이 증대된다. 이 연구를 통하여 수치해석에서 흐름방향의 교각 등과 같은 밀집구조물의 영향이 간접적으로 고려할 수 있게 되었으며 이 모형의 검증을 위하여 수리모형실험이나 수치모형실험이 행하여지고 있다.

5. 흐름단면의 축소에 따른 배수위 상승고

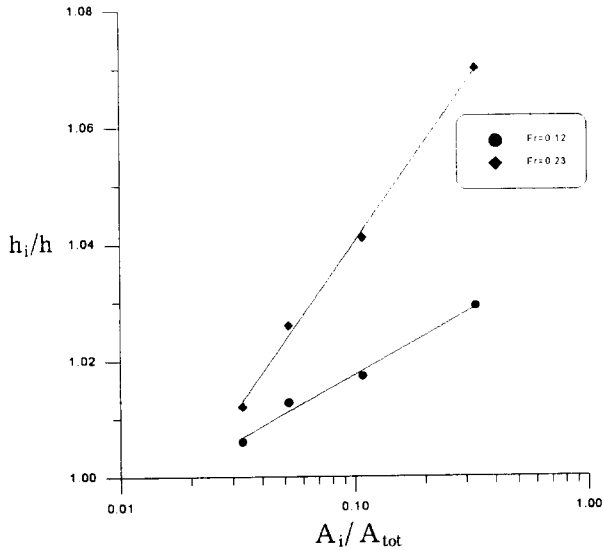


그림 4. 단면적과 유속 및 배수위 관계곡선

흐름단면의 축소와 유속의 증가로 인한 배수위의 상승고를 알아보기 위해 사다리꼴 단면의 직사각형(100×10m)수로가 이용되었으며 이 수치 실험에 사용된 모형은 상업모형인 SMS이다. 총 흐름단면적은 60m²이며, 1.95~20m²까지 단면을 축소시키면서 유량을 증가시켜 유속의 영향도 함께 고려하였다. 여기서 h는 단면의 축소가 없을 때 상류에서의 수위이며, A_i와 h_i는 축소된 단면적과 그때의 수위를 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있듯이 같은 단면적의 변화라도 유속의

증가에 따라 배수위는 증가하며 단면의 축소량이 커짐에 따라 배수위가 증가하였다.

6. 참고문헌

- 1) Chow, V. T., Open channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York, N. T., 1959
- 2) Kouwen, N., and Unny, T. E. (1973), "Flexible roughness in open channels.", J. Hydr. Div., ASCE, 99(5), 713-728
- 3) Li, R. M., and Shen, H. W. (1973), "Effect of tall vegetation on flow and sediment", J. Hydr. Div., ASCE, 99(HY5), 793-814
- 4) Petryk, S. P., and Bosmajian, G. (1975), "Analysis of flow through vegetation", J. Hydr. Div., ASCE, 101(HY7), 871-884