

식생 수로에서의 조도특성에 관한 연구

A Study on Roughness Characteristics in Vegetated Channels

김병찬, 김치곤*, 박상범, 이종석
국립한밭대학교, (주)한경기술공사*

Kim byeong-chan, Kim chi-gon*, Park sang-bum,
Lee jong-seok
Hnabat National Univ., Hankyung Eng. Co.*

요약

최근에 이르러 우리나라에서도 선진외국과 같이 하천자연환경 보전에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라, 앞으로 하천생태계의 근간이 되고 있는 하천식생은 자연환경의 주요 지표가 되는 것이 당연할 것이다. 따라서 본 연구에서는 기존 문헌을 통하여 하도계획 및 관리에 있어, 하천식생을 어떻게 고려하는가에 대하여 살펴본다.

Abstract

In Korea, as in other advanced countries, interest in natural stream preservation has been increasing. Accordingly, it is certain that stream vegetation, as an important indicator of the natural environment, will have a place in the base knowledge of stream ecology. In this study, investigate current stream channel planning and management regarding stream vegetation in paper.

I. 서론

최근에 이르러 우리나라에서도 선진외국과 같이 하천환경에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 하천계획을 수립할 때, 자연환경과의 조화를 위해 하도내에 식생 설치를 반영한다. 하천복원이란 훼손된 하천의 생물 서식처·차정·경관과 친수성 등 환경적 기능을 되살리기 위해 하도와 하천 변을 원 자연 상태에 가깝게 되돌리는 것이다. 또한 하도내 식생, 만곡, 여울과 소, 기타 국부적인 자연 서식처를 제공하기 때문에 하천단면 축소, 하천식생에 의한 흐름과 조도 변화 및 하상의 변동으로 인하여 홍수해가 발생할 것이라는 염려가 대두되고 있다. 따라서 하천환경 특성을 반영하기 위해서는 하도형상 변화, 조도변화 등의 연구가 필요한 실정이다.

이제까지 하천 흐름에 대한 조도계수 산정 연구는 많이 수행되어 왔으며, 이러한 연구는 이론과 실측 또는 수리모형실험을 통하여 정립이 되어 왔다. 많은 연구에도 불구하고 하도내 흐름에 대한 조도변화를 정량적으로 해석할 수 있는 확실한 방법은 없는 실정이다.

조도계수는 홍수시 하상을 구성하는 재료의 입도특성이나 유하하는 홍수량 규모, 식생 등의 특성 등에 의해 시시각각 변한다. 이는 수심의 변화에 따라 하상재료의 입경, 하도내 지형의 요철에 의한 저항, 식생에 의한 저항뿐만 아니라 하상과의 거동특성 등에 의한 영향이 모두 포함되어 있기 때문이다[1].

따라서, 본 연구의 목적은 기존의 조도계수 산정 방법 뿐만 아니라 최근의 조도계수 산정 방법을 문헌을 통하여 각각의

특징을 파악하고, 식생이 있는 수로에서의 조도계수 산정 방법에 대해 비교·분석하는 것이다.

II. 조도계수 산정 방법

하천의 조도계수는 흐름에 대한 하도의 저항정도를 나타내는 것으로 하상재료, 하천구조물, 하도정비, 하도의 불규칙성, 하천 식생에 따라 변하는 특성이 있다. 그러므로 조도계수는 중요한 수리학적 변수 중의 하나이며, 하천 수리계산에 있어서 가장 기본적인 중요한 수치중의 하나이다. 조도계수 산정 방법은 과거로부터 많은 연구가 진행되어 왔으나 사용 목적에 따라, 어떤 자료를 사용하느냐에 따라 산정하는 방법이 상이하다.

[표 1] 조도계수 산정기준 (Chow, 1959)

수로의 형태(홍수터)	최소값	중간값	최대값
덤불이 없는 목초지 Pasture, no brush			
1. 짧은 잡초	0.025	0.030	0.035
2. 긴 잡초	0.030	0.035	0.050
경작지 Cultivated areas			
1. 곡물이 없는 경우	0.020	0.030	0.040
2. 성장한 작물이 있는 논	0.025	0.035	0.045
3. 성장한 작물이 있는 밭	0.030	0.040	0.050
덤불 Brush			
1. 덩굴이 드문드문 나고, 잡초가 많은 경우	0.035	0.050	0.070
2. 겨울에 적게 난 덩굴과 나무들	0.035	0.050	0.060
3. 여름에 적게 난 덩굴과 나무들	0.040	0.060	0.080

4. 거울에 뺨뺨하게 혹은 적당하게 난 덩불	0.045	0.070	0.110
5. 어름에 뺨뺨하게 혹은 적당하게 난 덩불	0.070	0.100	0.160
나무 Trees			
1. 어름에 곧고, 뺨뺨한 버드나무	0.110	0.150	0.200
2. 싹이 없는 나무 그루터기로 된 깨끗한 대지	0.030	0.040	0.050
3. 새싹이 많은 것 외에는 위와 동일한 조건의 대지	0.050	0.060	0.080
4. 뺨뺨한 높은 나무에, 약간의 작은 나무들, 풀은 거의 없는 분지점 아래의 홍수터	0.080	0.100	0.120
5. 분지점에 도달하기전이라는 것 이외에는 위와 동일한 홍수터	0.100	0.120	0.160

*참고문헌: 한국건설기술연구원, 하도특성과 식생의 상관관계 분석, 2000.

1. 일반적인 조도계수 산정 방법

1. 수위-유량자료를 이용

수위-유량자료를 이용하는 방법은 신뢰성이 높고, 비교적 정확한 조도계수를 산정할 수 있다. 실측된 수위-유량자료를 연속방정식이나 운동량방정식 등을 이용하여 해석적인 방법을 통해 주어진 유량에 대해 계산된 수위와 실측된 수위의 차가 최소가 되도록 최적의 조도계수를 산정하는 역산법이다[2]. 조도계수의 역산에 사용되는 방정식에 따라 등류, 부등류, 부정류 계산으로 구분된다. 등류(uniform flow)는 등가조도계수를 이용하는데 식 (1)을 사용한다.

$$Q = AV = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \tag{1}$$

또한 부등류(nonuniform flow)는 에너지 보존법칙을 이용하며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_B + \alpha_B \frac{V_B^2}{2g} = y_A + \alpha_A \frac{V_A^2}{2g} + h_L \tag{2}$$

하지만 이 방법은 수위-유량 자료가 부재한 하천에서는 사용할 수 없다.

수위-유량 측정시의 정확도는 수준측량, 채취점의 평균위치

[표 2] Cowan의 조도계수의 산정을 위한 각 계수값의 기준

수로조건		각 계수값		수로조건		각 계수값	
하상재료	흙	n3	0.020	장애물의 상대효과	무시할정도	n3	0.000
	분쇄된암		0.025		작 음		0.010-0.015
	가는자갈		0.024		중 간		0.020-0.030
	굵은자갈		0.028		심 함		0.040-0.060
불규칙성 정도	평 판	n1	0.000	식 생	적 음	n4	0.005-0.010
	작 음		0.005		중 간		0.010-0.025
	중 간		0.010		많 음		0.025-0.050
	심 함		0.020		아주많음		0.050-0.100
수로단면의 변화	점진적변화	n2	0.000	만 곡 의 정 도	작 음	m	1.000
	가끔식변화		0.005		중 간		1.150
	지주변화		0.010-0.015		심 함		1.300

*참고문헌: 건설교통부, 하천내 수목의 현황 및 관리방안에 관한 조사·연구, 1997.

결정의 정도에 좌우되며, 최고수위와 최대유량의 발생시각의 시차, 바람에 의한 수위상승, 만곡부 좌우안의 수위차, 부착물이 홍수 후에 바람 또는 인위적으로 이동되어진 것 등이 오차 원인으로 되기 쉽다.

2. 표와 사진 자료 이용

Chow는 여러 가지 실험자료와 관측 자료로부터 하도의 재료, 식생상태 등을 고려하여 개략적인 조도계수를 추정할 수 있도록 표를 제시하였고 표 1에 나타났다. Arcement and Schneider는 Cowan (1956)식을 적용하는 절차와 대표지점의 조도계수를 사진과 함께 나타내기도 했다(표 2 참조).

Cowan은 조도계수에 영향을 미치는 인자들을 도출하여 조도계수 산정식을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \tag{3}$$

여기서, n_0 은 직선, 균등하고, 매끄러운 수로에 대한 기본적인 n 값, n_1 은 표면의 비균일성에 대한 가산치, n_2 는 단면의 형태와 크기의 변동에 대한 가산치, n_3 는 장애물에 대한 가산치, n_4 는 식생상태와 흐름조건에 대한 가산치, m 은 수로의 굴곡에 대한 보정계수이다.

이 방법은 현장조사와 더불어 기술자의 전문성과 공학적 판단이 필요하다. 조도계수를 산정하기 위한 실측자료가 없을 경우, 여러 가지 흐름저항의 영향을 반영한 하천 조도계수를 근사적으로 산정할 수 있는 점에서 의의가 있다. 다만 이러한 방법은 홍수기 조도계수 산정에 국한되어 있으므로 저갈수기 조도계수의 산정에는 참조할 수 없다[3].

3. 경험(반경험적) 이용

하도와 하상의 조도특성이나 지형적인 특성 등을 고려하여 경험적 또는 반경험적으로 조도계수를 산정하는 방법이다. 대표적으로는 하상재료를 이용한 경험식들이 있다. 경험식에는

Strickler 형태의 경험식, 멱함수 형태의 경험식, 반대수함수 형태의 경험식 등이 대표적이다.

2. 식생영향을 고려한 조도계수 산정

자연친화적 하천이나 복원된 하천은 여러 가지 수목을 지니고 있다. 이러한 식생이 하천 내에 있을 경우 가장 문제가 되는 것은 통수단면의 감소로 인한 수위의 상승이다. 특히 수목군이 있는 경우에는 홍수소통 단면이 축소되므로 수목이 없을 경우보다도 수위가 증가하게 되지만, 점재하는 경우는 국부적으로 유속이 증가하기도 한다. 그러나 대체적으로 수목은 조도 증가의 역할을 하고 저항이 증가하여 전체적으로 유속을 감소시키게 한다. 또한 수목이 홍수시에 떠내려 갈 경우 하류의 하천시설물(보, 통문, 교량, 광케이블 등)에 걸려서 예상치 못한 영향을 줄 수 있다[4].

1. 식생을 고려한 하천 흐름 모형

1.1 준 2차원 모형

조도계수 산정은 앞서 언급한대로 여러 가지 방법이 있다. 특히 복단면 형태의 하도에서는 부등류 계산에 있어서 하도와 홍수터(저수로와 고수부지)를 횡적으로 여러 단면으로 분리하여 각각의 수위, 유량, 조도계수를 계산한다.

1.2 식생을 고려한 2차원 모형

하천식생에 의한 저항특성을 반영하고, 정수압 분포와 수심

방향의 유속분포형태 및 부유사 농도분포를 가정함에 있어 방정식을 간략화한 2차원 천수방정식이 적용가능범위가 폭넓은 관계로 일반적으로 많이 사용되고 있다.

1.3 식생을 고려한 3차원 모형

하도내 식생이 존재하는 경우의 흐름과 토사수송에 대한 3차원 모형은 평균흐름에 영향을 미치는 식생의 영향은 단위체적당 항력으로 나타낸다. 수심과 압력은 수면에서의 운동학적 경계조건과 연속방정식에 의해 구해지기 때문에, 난류효과와 식생효과의 수리모델링이 필요하다. 난류효과의 표현에는 다양하며, 각각 적용범위와 계산내용이 다르다.

2. 식생을 고려한 하천에서 유속 예측

식생을 고려한 조도계수와 유속 계산은 식생의 종류에 따라 유연한 식생과 곧은 식생, 그리고 실제식생과 모형식생 등으로 구분할 수 있다. 접근 방법에 따라 수심방향의 유속분포를 결정 후 이를 수심방향으로 적분하여 공식을 유도하는 방법과 평균유속을 직접 계산하는 방법으로 구분할 수 있다. 수심방향의 유속분포를 결정 후 유도하는 방법은 역학적 법칙에 근거한 해석적 방법이 많으며, 평균유속을 직접 계산하는 방법은 회귀분석 등을 이용한 경험적 방법이 주종을 이루고 있다[5].

표 3은 식생의 조도계수 산정 연구를 비교해 놓은 것이다.

[표 3] 식생의 조도계수 산정 연구동향

연구자	대상식생	유도방법	특징
Petryk, Bosmajian (1975)	실제식생, 정수식생	운동량방정식	식생된 개수로 흐름 중 비교적 해석이 용이한 정수식생에 대한 연구
Thompson, Roberson (1976)	유연한 식생, 침수-정수식생	운동량방정식, 대수법칙	수심 적분된 유속산정모형 이용한 후, 결과를 회귀분석
Kouwen, Li (1980)	초본식생, 침수식생	차원해석/실험자료 이용한 회귀분석	대부분의 절차를 경험에 의존
Hujita, Hong(1996)	유연한 식생	$k-\epsilon$ 난류모형	$k-\epsilon$ 난류모형에 식생의 유연성 고려
Fathi-Maghadam Kouwen (1997)	정수식생 (침엽수 묘목)	-	식생높이, 유연성, 수심이 조도에 미치는 영향 분석
辻本哲郎, 北村忠紀 (1998)	유연한 식생	$k-\epsilon$ 난류모형	곧은 식생에 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 수치모의 후 결과를 회귀분석
Klopstra 등 (1998)	곧은 식생, 침수식생	운동량방정식, 대수법칙	식생층과 표층으로 유속분포 산정 후, 적분하여 평균유속 결정
Darby (1999)	유연한 식생	-	민감도 분석을 이용, 식생이 홍수위에 미치는 영향 분석
Temple (1999)	잔디류, 침수식생	실험자료를 이용한 회귀분석	$n-VR$ 방법을 발전시킴 간략한 계산절차 경험상수의 검정 필요
Freeman 등 (2000)	목본류	-	개수로 실험장치를 이용, 흐름 저항식 제안
Wu 등 (2001)	가상식생, 침수/정수식생	운동량방정식	말층 매트리스를 이용하여 가상의 식생구현 투수계수 개념으로 접근
Stone, Shen (2002)	곧은 식생, 침수/정수식생	운동량방정식	유속비 확인 필요
최성욱 등 (2003)	플라스틱 식생	-	개수로 흐름의 난류/고유 구조 분석

*참고문헌 : 한국건설기술연구원, 다기능 하천 설계기준 사업, 2003(일부 수정, 보완).

2.1 유연한 식생에서의 유속예측

표 3에 나타냈듯이 유연한 식생의 변형에 대한 기존 연구로는 Thompson과 Roberson (1976), Hujita와 Hong (1996), 辻本哲郎과 北村忠紀 (1998), Darby (1999) 등이 있다.

2.2 곧은 식생에서의 유속예측

Stone과 Shen (2002)은 곧은 식생이 식재된 개수로 흐름에 대하여 하상의 마찰 저항력과 식생에 의한 항력의 합이 유속에 의한 관성력과 같다는 힘의 균형으로부터 식 (4)와 (5)의 유속공식을 제안하였다[6].

$$u' = (1 - \sqrt{\frac{4\lambda}{\pi}}) \sqrt{\frac{g(1-\lambda h_p/h)\pi D}{2\lambda h_p/h C_D}} S_v \quad (4)$$

$$U = \frac{(1 - D\sqrt{N} h_p/h)}{F_v \sqrt{h_p/h}} \sqrt{\frac{(1-\lambda h_p/h)}{0.5 C_D} \frac{g}{ND}} S_v \quad (5)$$

여기서, u' 은 식생구간의 평균유속, U 는 단면평균유속, S_v 는 에너지경사, D 는 식생의 직경, h_p 는 식생의 길이, g 는 중력가속도, h 는 수심, F_v 는 유속계수, N 은 단위면적당 식생의 개수, C_D 는 항력계수로서 원기둥의 경우 1.05이다.

Stone과 Shen (2002)은 식생의 높이(h_p)가 변하지 않는 경우에 대하여 실험을 통해 위 식의 적용성을 확인하였으며 $F_v = \sqrt{h_p/h}$ 를 제시하였다.

III. 결 론

하천식생은 하도를 구성하는 중요한 요소로서, 치수안전도 뿐만 아니라 하도내의 자연환경에 미치는 영향이 매우 크다. 그러므로 최근까지의 문헌조사를 토대로 하도계획 및 관리에 하천식생을 어떻게 고려하여 조도계수를 산정하는가에 대하여 연구해 보았다.

1. 일반적인 조도계수 산정방법은 크게 3가지로 수위-유량을 이용하는 방법, 기존의 표나 사진을 이용하는 방법 그리고 기술자의 경험을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.
2. 식생을 고려한 조도계수 산정방법은 유연한 식생과 곧은 식생으로 대별할 수 있고, 주로 1차원 모형보다는 2차원 이상의 모형을 이용한다.
3. 이상과 같은 이론을 토대로 폭 넓은 하천식생조사와 다양한 수리모형실험이 이루어지면, 이론 모형과 실험모형을 비교하여 식생에 의한 하천 수리특성변화를 좀 더 정확히 파악하고 예측이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비 지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] 한국건설기술연구원, 하도 특성과 식생의 상관관계 분석(문산천 시험조사결과 분석), 2000.
- [2] 이신재, 박상우 “수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구”, 한국수자원학회지논문집, 제39권, 제12호, pp.985-996, 2006.
- [3] 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 홍수터 수목관리기술개발 (06건설핵심B01), pp.81-86, 2006.
- [4] 건설교통부, 하천내 수목의 현황 및 관리방안에 관한 조사·연구, 1997.
- [5] 한국건설기술연구원, 다기능 하천 설계기준 사업, 2003.
- [6] Stone, B.M. and Shen, H.T., “Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness,” Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128(5), pp.500-506, 2002.