

## 식생된 수로에서의 수위변화 분석 Change of Water Level in Vegetated Channels

김병찬, 윤성준, 김민정, 이종석  
국립한밭대학교

Kim byeong-chan, Yun seong-jun, Kim min-jeong,  
Lee jong-seok  
Hnabat National University

### 요약

본 연구는 Manning's coefficient 와 Chezy coefficient 를 이용하여 양재천 하도의 조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 계산된 등가조도는 수위-유량자료가 없는 하천에서 수위, 유량 및 조도계수를 산정하는데 이용하였다. 조도계수는 대상구간에 대해 부정류 해석을 수행하여 유량규모별로 수위를 산정하였다. 그 결과 식생이 있을 때와 없을 때의 수위차가 1.29m 이었고, 식생 밀도가 증가함에 따라 흐름저항이 크게 증가함을 알 수 있었다.

### Abstract

This study developed a model that could calculate roughness using Manning's and Chezy coefficient for Yangjae-stream. The estimated roughness by model developed was used for roughness coefficient in the stream without water level-discharge data. Roughness coefficient was estimated using assumed and calculated water level about each discharge scale by unsteady flow analysis. As a result, error of water surface level by model was shown 1.29m, it was shown that the flow resistance tends to increase with the desity of vegetation.

## I. 서론

자연친화적인 하천복원의 관심이 증폭되면서 하도내 식생은 경관이나 기능적으로 매우 중요한 항목으로 인정받고 있다. 이러한 자연 하천에서의 하천 식생은 오염물질의 여과 기능 및 용존 산소량의 증가, 그리고 수중생태계의 서식처 역할 등을 하고, 제방 보호, 지표 유출량이나 지하수 충전에 관여하기도 한다. 반면에 식생은 통수단면적이 줄어들게 하고, 하천 흐름 저항 증가로 인해 유속이 늦어져 수위상승이라는 치수적인 측면에서는 부정적인 역할을 하기도 한다.

이렇듯 하천 식생은 흐름해석에 매우 민감한 항목으로 알려지고 있으며, 자연하천의 흐름해석을 위해서는 하천단면자료, 유량, 하천 내 구조물과 하천의 형태, 그리고 조도계수 등이 필요하다. 그러나 조도계수는 하천 흐름에 매우 중요한 매개변수임에 틀림없지만, 다양한 형태의 하도와 식생의 조도계수 산정은 객관적이지 못하고, 경험에 의존하는 등 절대적인 산정방법을 가지고 있지 않다.

본 연구에서는 기존의 수리해석 방법을 비교·검토하고, 선정된 연구대상지역에서의 수리량의 계산 가능성 여부, 필요한 정밀도를 얻을 수 있는 기법을 선택한다. 그리고 연구대상 하천의 하도에 현재 상태와 식생을 모두 제거했을 때, 그리고 현재보다 더 많은 식생을 했을 때의 수위를 산정하는 게 목적이다.

## II. 이론

### 1. 수리해석 방법

수리해석 방법에는 1차원, 2차원, 3차원의 수리해석 기법이 있으며 하도 식생 영향 검토에 대한 수리해석 방법별 적용 가능성 항목들은 표 1에 나타내었다.

### 2. 연직 2차원 수리해석

흐름저항 모형은 흐름의 운동방정식과 연속방정식을 고려한 부등류 모형과 하상재료와 수목에 의한 흐름 저항을 단순히 기존의 Chezy나 Manning식 등으로 표시한 등류 모형이 있다.

부등류 모형은 수목에 의한 흐름저항 영향을 기존의 배수계산 부등류 모형에 고려하지 못하고 별도의 부등류 모형을 이용하여야 하는 단점이 있다. 등류모형은 Chezy 등의 기존 조도계수를 수정하여 흐름에 미치는 수목의 영향을 고려한다[1].

하천 계획이나 설계시에는 하도내 식생에 의한 통수단면 감소와 식생에 의한 흐름저항의 영향을 고려하여 수위와 유속을 산정하여야 한다. 연직 2차원 수리해석 방법은 식생의 밀도와 하상재료 특성, 그리고 식생과 흐름간의 저항(식생으로 인해 생성된 시수역) 그리고 단면형상에 의한 흐름저항을 고려하여 계산한다.

[표 1] 수리해석 방법별 적용 가능성

항목	1차원 수리해석	연직 2차원 수리해석	수평 2차원 수리해석	3차원 수리해석
수위 (유하능력)	△	○	-	-
	조도요인에 의해 현저한 변화가 없는 경우, 과거 홍수의 재현 조도계수 등을 이용해서 쉽게 계산할 수 있음	복단면 형상, 나무 군락, 고수부지 식생, 하도 형태 등 각종 요인에 의한 저항을 합리적으로 계산할 수 있음		
제방을 따른 고속흐름의 발생 여부	×	○	○	-
		분할단면마다 유하방향 유속을 파악할 수 있음	평면적 유황을 파악할 수 있어 제방 선형에 따른 유속을 파악 할 수 있음	
나무 군락에 의한 유황의 변화	×	△	△	○
		흐름이 1차원적인 경우에는 대략적인 유황을 파악 할 수 있음	적용 가능한 하도나 수목 조건이 일부 제한되기도 하지만 수심평균한 평면적 유황을 파악 할 수 있음	나무 군락 주변의 상세한 유황을 파악할 수 있음
적용상 문제점	하도	정밀도를 요하는 높은 조도나 에너지손실 결정이 가능한 경우에 적용 가능함	사행이 심한 구간에서는 유속분포의 재현성이 떨어짐	계산구간이 길 경우에는 계산시간의 많이 소요됨
	나무 군락	조도계수에 포함해서 생각함. 단, 수위에 따라 조도가 변화하므로 적용상 주의가 필요함	종단적으로 수목 분포가 급변하는 경우는 유황파악이 어려움. 나무군락을 수역으로 취급하므로 수목군내의 유속을 추정할 수 없음	나무 군락이 침수하는 경우에는 수심 방향으로의 유속 분포가 일정하지 않아 적용이 곤란함.
비고	○:적용 가능, △ : 적용조건에 따라 부분적 적용 가능, × : 적용 불가함			

\*참고문헌: 건설교통부, 하천에서 나무심기 및 관리에 관한 기준(안, p.48, 2007(일부 수정).

2.1 식생이 없는 하천의 수리계산

흐름단면이 단순한 수로의 유속은 식 (1)과 같은 간단한 식으로 구할 수 있다.

$$V = \alpha k_{st} R^{2/3} S^{1/2} \tag{1}$$

여기서  $R$ 는 동수반경,  $S$ 는 에너지경사이다.

그러나 복합단면 수로인 경우는 하상 형태에 의한 흐름저항을 고려하기 위해서 주수로와 고수부지를 분할하여 각각의 유속을 계산하고 유량을 구한다. 이 때 분할단면은 가상의 벽으로 간주하고, 주수로의 유속을 계산할 때는 이 가상의 벽을 윤변에 포함시켜서 동수반경을 계산하며, 고수부지의 유속을 계산할 때에는 이 가상의 벽을 윤변에 포함시키지 않는다[2].

2.2 식생이 있는 하천의 수리계산

하도에 식생이 있는 경우에는 앞서 언급한 Chezy 공식을 이용한 등류모형을 사용한다. 이는 Darcy-Weisbach의 마찰손실계수를 이용하여 변환하여 나무로 인한 흐름저항을 고려한다. 식생이 없는 단면은 식 (2)를 이용하여 유속을 계산한다.

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{RS_0} = \sqrt{\frac{8gRS_0}{f}} \tag{2}$$

여기서,  $f$ 는 마찰손실계수,  $R$ 은 동수경사,  $S_0$ 는 하상경사이다.  $f$ 는 다음과 같은 표현으로 나타낼 수 있다.

$$f = \lambda + 4c\omega R \tag{3}$$

여기서,  $\lambda$ 는 하상이나 경사면의 마찰계수,  $c$ 는 나무저항계수(1.0~1.5),  $R$ 은 동수경사,  $\omega$ 는 식생밀도이다.

하도의 한 측면에 나무가 분포하고 있는 경우 수목이 없는 분할단면의 유속을 구하기 위해서는 나무가 흐름에 미치는 영향을 고려해야 한다. 이 때 나무가 있는 고수부지의 마찰계수  $\lambda_f$ 는 식 (4)로 구한다.

$$\lambda_f = 4 \left( \log \frac{V_m}{V_f} \right)^2 \frac{R_f b_f}{h_f b_m} \tag{4}$$

$b_m = \frac{A_m}{h_f}$ ,  $R_f = \frac{A_f}{P_f}$ 에서  $h_f$ 는 고수부지 수심,  $A_m$ 은 주수로(main channel) 단면,  $A_f$ 는 고수부지 단면의 면적,  $P_f$ 는 고수부지 단면의 윤변,  $R_f$ 는 고수부지 단면의 동수반경,  $V_m$ 은 가상 분리면을 고려하지 않을 때의 주수로 단면의 유속,  $V_f$ 는 가상 분리면을 고려하지 않을 때의 나무가 있는 단면의 유속이다. 그러므로  $b_m$ 은 식생이 없는 단면의 평균넓이,  $b_f$ 는 유체의 흐름에 영향을 미치는 식생부분의 넓이로 나무의 직경과 나무사이의 간격(밀도)에 의하여 계산된  $b_N$ 와류폭에 따라 결정된다.

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = 2 \log \left( \frac{14.84 R_m}{k_m} \right) \quad (5)$$

$$R_m = \frac{\lambda_m A_m}{\lambda_m P_m + \lambda_f h_f} \quad (6)$$

여기서  $k_m$ 는 하상구조와 하상조건에 따른 조도높이(조고, roughness height)로 표 2에 나타내었다[3].

[표 2] 하상구조와 하상 조건에 따른 조도높이

하상 구조와 하상 조건		조고 k(m)
돌	벽돌 및 깬 자연석	0.0015-0.0040
	거친 자연석 벽면	0.080-0.100
	격자형 잔디면	0.015-0.030
흙	모래와 자갈	d90
	호박돌	0.060-0.200
	농경지	0.020-0.250
	숲의 표면	0.160-0.320
	잔디	0.060-0.400
	불규칙적인 하상	0.150-0.350
	아주 불규칙적인 하상	0.350-0.500

\*참고문헌: 건설교통부, 하천 수목의 현황 및 관리 방안에 관한 조사·연구, p.200, 1997(일부수정).

나무에 의한 저항과 동수반경을 계산하여 나무가 없는 분할 단면의 유속을 계산한다. 이 때 분할단면의 한 측에만 나무가 있을 경우 동수반경과 마찰계수, 유속을 구하는 식은 (7)~(9)와 같다.

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_f} \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_f}{\lambda_m P_m + \lambda_f h_f}} \quad (8)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{8gR_m S}{\lambda}} \quad (9)$$

그리고 분할단면의 양측에 수목이 분포할 경우에는 동수반경과 마찰계수를 다음과 같이 수정하여 이용한다.

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_{f1} + h_{f2}} \quad (10)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_{f1} + h_{f2}}{\lambda_m P_m + \lambda_{f1} h_{f1} + \lambda_{f2} h_{f2}}} \quad (11)$$

식 (10), (11)을 이용하여 나무가 있는 단면의 평균유속을 계산하고, 단면적을 곱하여 각 단면의 유량을 구한다. 그리고 각 단면 유량을 합하여 주어진 수위를 갖고 흐를 수 있는 전체 유량을 계산할 수 있다.

[표 3] 수리계산을 위한 입력자료

조건	항목	좌측단면(L)	주수로(M)	우측단면(R)
식생이 있을때	단면 A (m <sup>2</sup> )	63.574	92.640	74.191
	윤변 P (m)	26.179	19.823	11.412
	동수경사 R (m)	2.428	4.673	6.501
	조도높이 (m)	0.500	0.030	0.500
	마찰계수 $\lambda$	0.072	0.032 0.033	0.048
	나무저항계수	1.500	-	1.500
	식생 밀도	0.009	-	0.009
	나무직경 (m)	0.122	-	0.122
	유속 V (m)	0.980	3.1298 3.0609	1.636
	유량 Q (m <sup>3</sup> /s)	62.270	401.492	121.376
식생이 없을때	조도계수 n	0.0583	0.0204	0.0673
	유속 V (m)	1.791	2.828	3.150
	유량 Q (m <sup>3</sup> /s)	113.889	262.024	233.729
	조도계수 n	0.0294	0.0313	0.0294

이렇게 구한 유량이 계획 홍수량보다 작으면 수위를 증가시켜 계획홍수량을 통과시킬 수 있을 때까지 반복 계산하게 된다. 또한 나무가 없을 때의 수위와 비교하여 하천에 심은 나무가 홍수에 미치는 수리적 영향을 파악할 수 있다[2],[3].

### 3. 연구대상 지역

연구대상지역으로는 양재천을 선택했다. 양재천은 한강의 제 1지류인 탄천의 제 1지류로서 경기도 과천시 청계산에서 발원하여 서울시를 북동쪽으로 유하하여 탄천에 합류하는 하천이다. 양재천 하구를 기준으로 유역면적 56.80km<sup>2</sup>, 하천연장은 8.28km이며, 유로연장이 16.60km인 지방2급 하천으로 하폭은 약 34~200m 내외이며 하상경사는 1/3,606~1/165 로 상류를 제외하면 비교적 완만한 편이다[4].

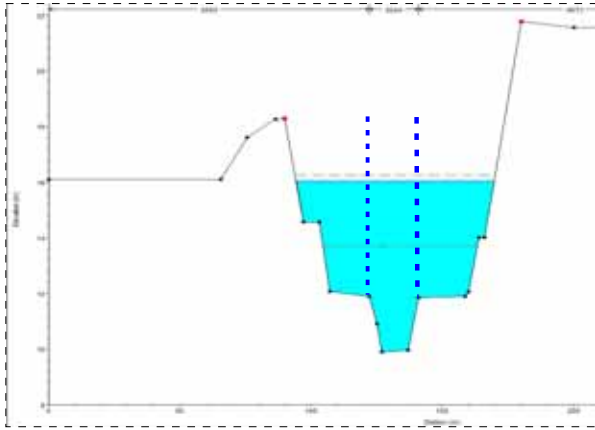
#### 3.1 입력자료

양재천에는 수위관측소가 영동2교에 있다. 하지만 잘 운영되고 있지 않아 수위자료가 양호하지 않다. 그래서 영동 2교 위치에서 임의의 홍수위를 가정해서 연직 2차원 수리해석을 실시하였다.

하천 단면은 양재천 하천정비계획[4]을 참고하였고, 등류와 부등류 해석을 위해 HEC-RAS를 이용하였다. 식 (1)~(11)을 이용하여 식생이 있을 때와 없을 때의 하천 수리계산을 실시하였다.

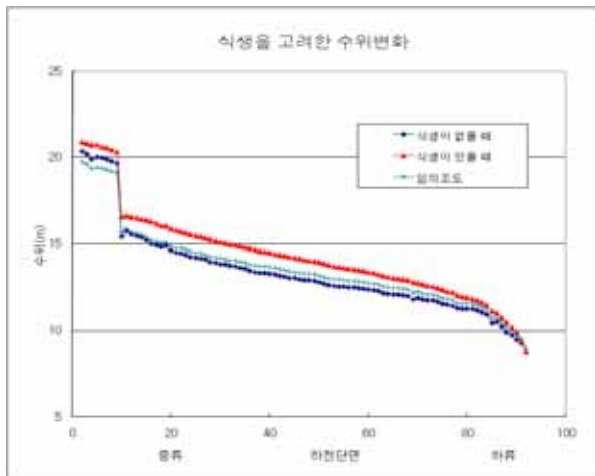
표 3에 나타냈듯이 하천은 좌측, 주수로, 우측단면으로 나누었다(그림 1 참조). 이는 주수로와 고수부지의 하상 상태가 다르기 때문이다. 또한 주수로와의 분리면인 좌측, 우측 분리면에서는 외류에서 오는 마찰계수를 식 (4)에 의해 계산한다. 동수반경  $R$ 은 반대편의 분리면을 고려하여 계산해야 하며, 식 (7)~(11)을 반복 계산하면서 전체 마찰계수를 수립시킨다. 표

3에서 주수로의 마찰계수와 유속값이 두 개씩인 이유는 좌측 단면과의 분리면, 우측단면과의 분리면에서 발생하는 마찰계수와 유속값이 다르기 때문이다.



▶▶ 그림 1. 대표 하천단면(HEC-RAS 이용)

양재천에는 버드나무, 뱀나무, 능수버들과 같은 교목과 관목으로는 갯버들, 키버들, 초본식물은 물억새, 갈대 등이 주로 서식하고 있었다. 이러한 교목의 밀도는 양재천 7곳에서 직접 측정하여 얻은 값을 평균하여 사용하였다. 그러나 관목은 조고(조도높이)값으로 대체하였다.



▶▶ 그림 2. 식생을 고려한 수위변화

### 3.2 결과

식 (1)~(11)을 이용하여 하천내 식생이 있을 경우와 없을 경우를 상정하여 계산을 해보았다. 그림 2에서 알 수 있듯이 식생을 고려하여 계산한 수위는 16.09m, 식생이 없을 때의 수위는 14.8m로 산정되었다. 양재천 중류~하류구간에서 식생이 있을 때와 없을 때의 수위차는 최고 1.32m이며, 평균 수위차이는 0.81m, 대표하천단면에서는 1.29m의 수위차가 발생하였다. 그리고 임의조도는 각종 문헌을 통하여 얻은 대략적인

조도계수이며, 이때의 수위는 15.01m로 계산되었다.

### III. 결론

본 연구는 Manning 조도계수와 Chezy 계수를 이용하여 양재천 하도의 조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다. 양재천 유역은 잦은 기기의 고장으로 수위측정이 불안정하고, 수위-유량곡선은 존재하지도 않는다. 이렇듯, 수위-유량자료가 없는 하천에서 연직 2차원 수리해석을 통하여 획득한 등가조도는 수위, 유량 및 조도계수를 산정하는데 도움을 주었으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 수위-유량 자료가 부재한 곳에서는 연직 2차원 수리해석을 통하여 수리특성을 알아낼 수 있다.
2. 양재천의 대표 하천 단면인 영동 2교 부근을 Manning 조도계수와 Chezy 계수를 이용하여 양재천 하도의 조도를 산정할 수 있는 모형을 개발하였다.
3. 산정된 모형을 이용하여 대표하천단면에서 계산해 본 결과 식생을 고려했을 때와 식생이 없었을 때 흐름저항으로 인한 수위차는 1.29m로 나타났다.
4. 대표하천단면에서 계산된 수위와 유량을 바탕으로 등가조도를 구하고, 이를 양재천 중류~하류구간에 적용해 본 결과, 최고 1.32m, 평균 0.81m의 수위차가 발생하였다.
5. 하천단면과 식생밀도의 정확도를 높이면, 좀 더 나은 정확한 수리해석이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [1] 우효섭, 하천수리학, pp.772-773, 청문각, 2007.
- [2] 건설교통부, 하천에서 나무심기 및 관리에 관한 기준(안), pp.47-76, 2007.
- [3] 건설교통부, 하천 수목의 현황 및 관리방안에 관한 조사·연구, p.200, 1997.
- [4] 서울특별시, 대동천 등 7개 하천정비기본계획(대동천, 가오천, 화계천, 면목천, 전농천, 사당천, 양재천), p.3-11, 2005.