하천 복원 후의 홍수위 안정성 검토

Evaluation of River Flood Stability after River Restoration

김병찬, 이종석
국립한밭대학교 토목공학과

Byeong-Chan Kim(bckim777@hanbat.ac.kr), Jong-Seok Lee(ljs96@hanbat.ac.kr)

요약

자연친화적인 하천복원의 관심이 증폭되면서 하도내 식생은 경관이나 기능적으로 매우 중요한 항목으로 인정받고 있다. 반면에 식생은 통수단면적을 줄어들게 하고, 하천 흐름 저항 증가로 인해 유속이 감소, 이에 따른 수위상승이라는 치수적인 측면에서는 부정적인 역할을 하기도 한다. 본 연구에서는 하천 복원으로 인해 수리학적 요소가 급변한 하천에서 정확한 조도계수 산정 방법에 대하여 연구하였다. HEC-RAS와 연직 2차원 수리해석 방법을 이용하여 하천복원 후의 양재천 중하류 구간의 하천조도계수는 주수로 0.011~0.159, 식생 설치를 하지 않았을 시의 홍수터 0.031, 식생을 설치했을 경우에는 0.034~0.506의 값을 도출할 수 있었다. 또한 홍수터에 추가로 식생 밀도를 30% 증가시켜 본 결과, 양재천에서의 수위 상승은 식생후보다 0.13~0.34m로 모의되어, 홍수터의 추가 식생에 의한 수위변동은 미비한 것으로 판단된다.

■ 중심어 : | 하천복원 | 식생 | HEC-RAS | 조도계수 | 홍수위 안정성 |

Abstract

The eco-friendly river restoration issue has been increased and the importance of the vegetation along the river banks has been understood with its scenery and significant role. However vegetation reduces the stream flow cross section and brings negative effects such as increase of water flow resistance and decreases of river flow velocity. In this study, the method to choose roughness coefficient is studied in the sudden changed hydraulic characteristics by river restoration. Using the HEC-RAS model and the two-dimensional vertical analysis method, Yangjae stream was calculated that the roughness coefficient of the main channel is 0.011~0.159 after river restoration, 0.031 without vegetation on the flood plain, and 0.034~0.506 with vegetation on the flood plain. The level of water in the river is predicted to rise 0.13~0.34m at 30% of vegetation density increase.

■ keyword : | River Restoration | Vegetation | HEC-RAS | Roughness Coefficient | Flood Stability |

Ⅰ. 서 론

우리나라가 선진 외국처럼 자연형 하천복원에 관심을 가지면서 자연환경과의 조화를 위해 수변에 식생 설치를 반영하고 있다. 하도내 식생은 경관이나 기능적으로 매우 중요한 항목으로 인정받고 있으나 통수단면적을 줄어들게 하고, 하천의 흐름 저항 증가로 인해 유속이 감소하며, 이에 따라 수위가 상승하여 홍수시에는

* 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.
접수번호 : #090330-002
접수일자 : 2009년 03월 30일
심사완료일 : 2009년 09월 14일
교신저자 : 김병찬, e-mail : bckim777@hanbat.ac.kr

홍수해가 발생할 것이라는 염려도 대두되고 있다. 이렇듯 치수적인 측면에서 부정적인 역할을 하기도 하는 하도내 식생은 하도형상 변화, 조도변화 등의 많은 연구가 필요한 실정이다.

일반적인 조도계수 산정 방법은 크게 수위-유량자료를 이용하는 방법, 표와 사진을 이용하는 방법, 그리고 경험을 이용하는 방법 등이 있으며, 이들 방법 중 가장 정확한 방법은 수위-유량자료를 이용하는 것이다[1-5]. 그러나 다양한 하천 식생은 기하학적 형태나 분포특성이 매우 상이하므로 Fathi-Maghadam과 Kouwen[6], Wu 등[7], Darby[8], Temple[9], Stone과 Shen[10], 강형식과 최성욱[11]등은 식생에 의한 연직·수평 2차원 흐름의 영향, 식생 밀도법 등을 연구하여 식생에 의한 저항치를 산정하였다. 또한 Schneider는 Manning-Strickler의 공식을 이용하여 복합단면에서의 단면과 단면사이에 가상의 마찰 벽이 있다는 전제하에 실측치와 근사한 유량을 계산할 수 있는 연구를 하였다[12].

이와 같이 많은 연구들은 세계 각국에서 통합하여 사용하고 있는데 하천내 식생설치에 따른 수리학적 이론은 미국의 HEC-RAS, 일본의 준1차원 부등류 해석, 그리고 독일의 Manning-Strickler 조도계수를 이용하는 방법들이 있다[13]. 독일의 경우에는 Pasche, Mertens, Nuding에 의하여 매우 안정적인 이론적 근거가 마련되었는데, 이 중 Pasche 공식은 가장 정확하게 통수량을 계산할 수 있으나 광범위한 전산작업이 필요하고, Nuding 이론식은 비교적 간단히 통수량 계산을 할 수 있다 장점이 있다[14]. 우리나라에서도 나무가 있는 하천의 수리계산 방법을 발표하였다[15].

본 연구에서는 수위-유량자료가 부재한 유역이면서 하천 복원으로 인해 수리학적 요소가 급변한 하천에서의 수리안정성 분석, 즉 식생 설치에 따른 홍수위를 산정하는 것이 목적이다. 이를 위해서는 식생설치로 인해 변화된 새로운 조도계수 산정이 필수적이므로 대상하천의 하천단면, 하상경사, 계획홍수량 등을 HEC-RAS에 입력하여 수리학적 특성들을 파악한 후, 이들 결과를 연직 2차원 수리해석의 입력자료로 사용하여, 하천 복원 전·후의 조도계수 및 유속, 유량 그리고 홍수위를 산정하여 비교·검토하였다. 또한 하도내 추가 식생할 경우를 상정하여 그 때의 홍수위도 도출하였다.

II. 조도계수 산정

1. 일반적인 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 수치 중의 하나이다. 조도계수 산정 방법은 과거로부터 많은 연구가 진행되어 왔으나 사용 목적에 따라, 어떤 자료를 사용하느냐에 따라 산정하는 방법이 상이하다[16].

1.1 수위-유량자료 이용

수위-유량자료를 이용하는 방법은 신뢰성이 높고, 비교적 정확한 조도계수를 산정할 수 있다. 조도계수의 역산에 사용되는 방정식에 따라 등류, 부등류, 부정류 계산으로 구분된다. 등류(uniform flow)는 등가조도계수를 이용하는데 식 (1)을 사용한다.

$$Q = A\,V = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \tag{1}$$

여기서 Q는 유량, A는 단면적, V는 유속, n은 Manning 조도계수, R은 동수반경, 그리고 S는 에너지 경사이다.

또한 부등류(nonuniform flow)는 에너지 보존법칙을 이용하며 식 (2)와 같다.

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

여기서 y_A, y_B는 구간 양단에서의 수심, α_A, α_B는 구간 양단에서의 흐름에너지 보정계수, V_A, V_B는 구간 양단에서의 평균 유속, g는 중력가속도, 그리고 h_L은 에너지 손실수두이다. 하지만 이 방법은 수위-유량

자료가 부재한 하천에서는 사용할 수 없다.

1.2 표와 사진 자료 이용

Chow는 여러 가지 실험 자료와 관측 자료로부터 하도의 재료, 식생상태 등을 고려하여 개략적인 조도계수를 추정할 수 있도록 표를 제시하였다([표 1] 참조)[17]. 조도계수를 산정하기 위한 실측자료가 없을 경우, 여러 가지 흐름저항의 영향을 반영한 하천 조도계수를 근사적으로 산정할 수 있는 점에서 의의가 있다[18].

표 1. 조도계수 산정기준 (Chow, 1959)

수로의 형태(홍수터)	최소값	중간값	최대값
덤불이 없는 목초지			
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. 덤불이 드문드문 나고, 잡초가 많은 경우	0.035	0.050	0.070
2. 겨울에 적게 난 덤불과 나무들	0.035	0.050	0.060
3. 여름에 적게 난 덤불과 나무들	0.040	0.060	0.080
4. 겨울에 빽빽하게 혹은 적당하게 난 덤불	0.045	0.070	0.110
5. 여름에 빽빽하게 혹은 적당하게 난 덤불	0.070	0.100	0.160
나무(Trees)			
1. 여름에 곧고, 빽빽한 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. 빽빽한 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

1.3 경험(반경험적) 이용

하도와 하상의 조도특성이나 지형적인 특성 등을 고려하여 경험적 또는 반경험적으로 조도계수를 산정하는 방법이다. 하상재료를 이용한 경험식들은 Strickler 형태의 경험식, 멱함수 형태의 경험식, 반대수함수 형태의 경험식 등이 대표적이다.

2. 식생 영향을 고려한 하천 수리계산

식생이 하천 내에 있을 경우 가장 문제가 되는 것은 통수단면의 감소로 인한 수위 상승이다. 특히 수목군이 있는 경우에는 홍수소통 단면이 축소되므로 수목이 없을 경우보다도 수위가 증가하게 되지만, 점재하는 경우는 국부적으로 유속이 증가하기도 한다. 그러나 대체로 수목은 조도증가의 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[15].

그러므로, 하천 계획이나 설계시에는 하도내 식생에 의한 통수단면 감소와 식생에 의한 흐름저항의 영향을 고려하여 수위와 유속을 산정하여야 한다.

2.1 식생이 없는 경우

복합단면을 지닌 수로에서는 하상 형태에 의한 흐름저항을 고려하기 위해서 주수로(A_M)와 고수부지(A_L, A_R)를 분할하여 각각의 유속을 계산하고 유량을 구한다([그림 1] 참조). 이 때 분할단면은 가상의 벽으로 간주하고, 주수로의 유속을 계산할 때는 이 가상의 벽을 윤변(P)에 포함시켜서 동수반경을 계산하며, 고수부지의 유속을 계산할 때에는 이 가상의 벽을 윤변에 포함시키지 않는다.

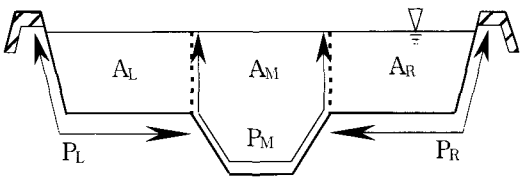


그림 1. 수로의 단면분할 가정

[그림 1]에서 유량 산정시 계산되는 유속은 식 (3)과 같이 Manning-Strickler의 공식으로부터 구할 수 있다[12].

$$Q = v_L A_L + v_M A_M + v_R A_R$$
$$V = \alpha\, k_{st}\, R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

여기서 α는 하천조건을 고려한 보정계수, k_{st}는

Manning-Strickler 상수, R은 동수반경, 그리고 S는 에너지경사이다.

2.2 식생이 있는 경우

하도에 식생이 있는 경우에는 크게 주수로를 포함한 통수단면 전체에 나무가 있는 경우, 고수부지 중 좌·우측 어느 한쪽에만 나무가 있는 경우, 그리고 주수로를 제외한 고수부지 양측 모두에 나무가 있는 경우로 나눌 수 있다.

연직2차원 수리해석은 Manning 공식과 Darcy-Weisbach 마찰계수를 이용하는 방법을 포함한다. 식생영향을 고려한 수리계산은 Chezy 공식을 이용하며, Chezy 계수를 Darcy-Weisbach의 마찰손실계수를 이용, 변환하여 나무로 인한 흐름저항을 고려하며 정리하면 다음과 같다[15].

하천의 어느 단면에서 식생이 없는 단면은 Manning 공식을, 식생이 있는 단면은 식 (4)를 이용하여 유속을 계산한다.

$$V=\sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{RS_0}=\sqrt{\frac{8gRS_0}{f}} \tag{4}$$

여기서 f는 마찰손실계수, S_0는 하상경사이다.

또한 f는 하천의 하상재료나 하천 형태, 나무 등 모든 영향을 포함하고 있는데 특히, 나무에 의한 영향을 고려해 주기 위해서 식 (5)와 같이 변형하여 사용하기도 한다.

$$f=\lambda+4c\omega R \tag{5}$$

여기서 λ는 하상이나 경사면의 마찰계수, c는 나무저항계수(1.0~1.5), ω는 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 λ_f는 식 (6)과 같다.

$$\lambda_f=4(\log\frac{V_m}{V_f})^2\frac{R_f b_f}{h_f b_m} \tag{6}$$

여기서 $b_m=\frac{A_m}{h_f}$, $R_f=\frac{A_f}{P_f}$에서 h_f는 고수부지 수심, A_m은 주수로 단면, A_f는 고수부지 단면의 면적, P_f는 고수부지 단면의 윤변, R_f는 고수부지 단면의 동수반경, V_m은 가상 분리면을 고려하지 않을 때의 주수로 단면의 유속, V_f는 가상 분리면을 고려하지 않을 때의 나무가 있는 단면의 유속이다. 그러므로 b_m은 식생이 없는 단면의 평균넓이, b_f는 유체의 흐름에 영향을 미치는 식생부분의 넓이로 나무의 직경과 나무사이의 간격(밀도)에 의하여 계산된 b_N 와류폭에 따라 결정된다.

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}}=2\log(\frac{14.84R_m}{k_m}) \tag{7}$$

$$R_m=\frac{\lambda_m A_m}{\lambda_m P_m+\lambda_f h_f} \tag{8}$$

여기서 k_m는 하상구조와 하상조건에 따른 조도높이(조고, roughness height)로 [표 2]에 나타내었다.

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

나무에 의한 저항과 동수반경을 계산하여 나무가 없는 분할단면의 유속을 계산한다. 이 때 분할단면의 한 측에만 나무가 있을 경우 동수반경과 마찰계수, 유속을 구하는 식은 (9)~(11)과 같다.

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_f} \tag{9}$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_f}{\lambda_m P_m + \lambda_f h_f}} \tag{10}$$

$$V_m = \sqrt{\frac{8g R_m S}{\lambda}} \tag{11}$$

그리고, 분할단면의 양측에 수목이 분포할 경우에는 동수반경과 마찰계수를 다음 식 (12), (13)과 같이 수정하여 이용한다.

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_{f1} + h_{f2}} \tag{12}$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_{f1} + h_{f2}}{\lambda_m P_m + \lambda_{f1} h_{f1} + \lambda_{f2} h_{f2}}} \tag{13}$$

식 (12), (13)을 이용하여 나무가 있는 단면의 평균유속을 계산하고, 단면적을 곱하여 각 단면의 유량을 구한다. 그리고 각 단면 유량을 합하여 주어진 수위를 갖고 흐를 수 있는 전체유량을 계산할 수 있다. 이렇게 구한 유량이 계획홍수량보다 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[15].

Ⅲ. 연구 대상 지역

1. 유역의 특성

연구대상 지역인 양재천은 한강의 제 1지류인 탄천의 제 1지류로서 경기도 과천시 청계산에서 발원하여 서울시를 북동쪽으로 유하하여 탄천에 합류하는 하천이다. 양재천은 하구를 기준으로 유역면적 56.80㎢, 하천연장은 8.28㎞, 유로연장이 16.60㎞인 지방2급 하천으로 하폭은 약 34~200m 내외이며, 하상경사는 1/3,606~1/165로 상류를 제외하면 비교적 완만한 편이다[19].

2. 홍수량 산정

홍수량은 유역내에서 측정한 연최대유량을 빈도분석하여 산정하는 것이 제일 좋은 방법이다. 그러나 양재천 유역처럼 측정 자료가 부족하거나 없는 경우에는 강우량 및 유역특성으로부터 획득하는 방법인 빈도별 확률홍수량을 이용한다.

홍수량 산정을 위해 양재천 유역의 소유역 분할을 실시하였다. 기존 문헌을 토대로 한 양재천의 소유역 분할은 총 12개로 나누었으며, 빈도별 홍수량은 [표 3]과 같다[19].

일반적으로 지방 2급 하천일 경우, 50~100년 빈도의 홍수량을 이용하므로 연구대상지역인 양재천은 Clark 방법으로 구한 50년 빈도 홍수량을 기본홍수량으로 선택하였다.

표 3. 소유역 · 빈도별 홍수량 및 계획홍수량

산정지점	유역면적 (㎢)	빈도 (년)	산정방법별 홍수량(㎥/s)				
			Clark	SCS	합리식	SWMM	ILLUDAS
양재천 하구	56.80	50	605	733	660	645	593
		100	692	839	727	726	669
영동5교 인근	55.06	50	596	723	683	627	588
		100	681	829	754	707	665
경남APT쪽 합류후	54.24	50	586	713	709	626	578
		100	671	819	783	708	653
경남APT쪽 합류전	52.12	50	565	689	680	601	561
		100	646	791	751	684	636
철홍빌딩쪽 합류후	51.78	50	561	687	704	600	555
		100	642	789	778	685	631
철홍빌딩쪽 합류전	50.68	50	551	675	687	587	555
		100	631	776	759	672	630
대성주차장 합류후	50.59	50	551	677	714	589	550
		100	630	778	790	677	625
대성주차장 합류전	49.39	50	538	662	696	571	535
		100	616	761	770	659	611
매현교쪽 합류후	49.32	50	538	662	713	571	534
		100	615	762	789	659	610
매현교쪽 합류전	36.78	50	391	496	527	570	544
		100	447	571	583	658	621
청소년 문화회관점	34.87	50	371	477	531	543	539
		100	424	548	589	634	614
연구대상 시작점	28.21	50	297	386	497	446	437
		100	339	444	552	533	497

또한 양재천 유역의 계획홍수량은 유역내 홍수조절용 댐, 홍수조절지 및 방수로 등이 없으므로 기본홍수량과 같은 값을 사용하였다.

연구 대상 구간은 본격적인 도심지가 시작되는 서울시 서초구 우면동 KT통신연구개발본부 부근 무지개다리부터 서울시 강남구 탄천 합류지점까지의 양재천 중하류구간으로 약 5,350m이다.

3. 수리계산

하도에 식생 설치로 인해 변경된 홍수위 산정을 위해서는 우선적으로 급변한 조도계수 계산이 필수이다. 양재천 유역은 수위-유량관측 자료가 부재하여 하천 조도계수는 [표 1]과 같은 방법을 이용하여야 하나, 이는 설계자의 개인 차이가 발생할 수 있으므로, 본 연구에서는 정확성을 기하기 위해 연직 2차원 수리해석을 하였다.

3.1 입력자료

연구 구간인 양재천 중하류는 [그림 2]에 보는 바와 같이 복단면 혹은 복복단면의 형상을 띄고 있다. 주수로와 고수부지의 하상상태가 다르므로 연직 2차원 수리해석을 하기 위해서 좌측수로-주수로-우측수로로 나누었다.

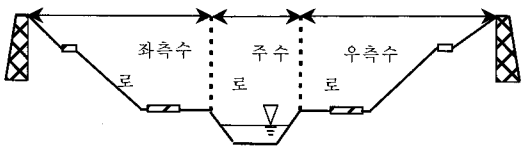


그림 2. 양재천 중하류구간의 횡단면도(scale 무시)

양재천 중류구간은 [그림 3]과 같이 약 120,033m^{2}에 버드나무, 벚나무, 능수버들, 갯버들, 물억새, 갈대 등이, 하류구간에는 현사시나무, 느릅나무, 고로쇠나무, 능수버들, 버드나무, 복자기나무, 갯버들, 조팝나무, 키버들, 물억새, 갈대 등이 약 421,794m^{2}에 걸쳐 분포하는 것으로 알려져 있다[15].

식생 밀도를 산정하기 위해 양재천 중·하류 7곳에서 버드나무, 벚나무, 능수버들과 같은 교목과 갯버들, 키버들 같은 관목을 직접 조사하였다. 그 결과, 평균적으로 교목은 직경 12.2cm, 7.1개/100m^2, 관목은 직경 1.5cm, 117개/100m^{2}로 조사되었다.

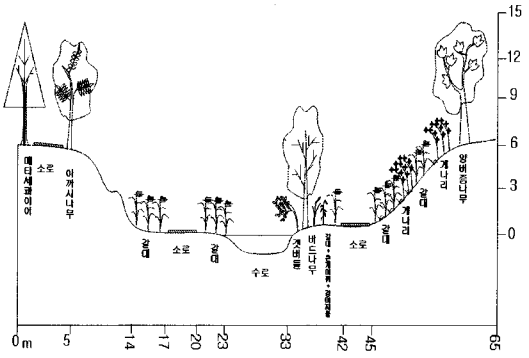


그림 3. 양재천 중류구간의 식생단면도

[표 4]는 연직 2차원 수리해석을 위한 입력자료이다.

표 4. 수리계산을 위한 입력자료(계획홍수위 0m)

단면 No.	항목	좌측단면(L)	주수로(M)	우측단면(R)
107	단면 A (m^2)	29.31	59.21	34.88
	윤변 P (m)	20.91	18.44	19.88
	동수반경 R (m)	1.40	3.21	1.75
	하상경사	≒ 0.002070		
100	단면 A (m^2)	42.28	49.83	39.08
	윤변 P (m)	25.45	16.14	27.30
	동수반경 R (m)	1.66	3.09	1.43
	하상경사	≒ 0.003275		
79	단면 A (m^2)	39.41	52.26	42.00
	윤변 P (m)	23.52	16.90	24.92
	동수반경 R (m)	1.68	3.09	1.69
	하상경사	≒ 0.003671		
55	단면 A (m^2)	36.36	66.60	33.48
	윤변 P (m)	22.84	22.04	21.11
	동수반경 R (m)	1.59	3.02	1.59
	하상경사	≒ 0.001378		
28	단면 A (m^2)	26.42	67.87	44.72
	윤변 P (m)	17.48	21.01	23.35
	동수반경 R (m)	1.51	3.23	1.92
	하상경사	≒ 0.000429		
5	단면 A (m^2)	21.32	91.56	30.82
	윤변 P (m)	15.60	27.05	22.22
	동수반경 R (m)	1.37	3.38	1.39
	하상경사	≒ 0.0001		
공통	조도높이 (m)	0.050	0.030	0.050
	나무저항계수	1.000	-	1.000
	식생 밀도	0.026	-	0.026
	나무직경 (m)	0.122,0.015	-	0.122,0.015

No. 107은 양재천 중상류 지점으로 본 연구의 시작 단면이고, No. 5는 양재천 하구로 탄천과 만나기 직전의 단면이다.

단면적, 윤변, 동수반경 등은 하천 단면에서 직접 얻을 수 있고, 조도높이(조고)는 [표 2]를 이용하여 양재천의 좌·우측수로인 홍수터에 선택·적용하였다[20].

3.2 결과

HEC-RAS에 계획홍수위, 하천단면, 단면별 계획홍수량 등을 입력하여 모의된 단면별 윤변, 동수반경, 면적 등을 연직 2차원 수리계산에 이용하였다.

즉, [표 4]의 입력자료들을 각각 식 (3)~(13)과 연계하여 하천내 식생이 있을 경우와 없을 경우를 상정하여 연직 2차원 수리계산을 하였다.

(1) 양재천 하구 계획홍수위 0m

50년 빈도 홍수시 양재천 하구지역과 탄천이 만나는 지점의 계획홍수위는 18.01m이다. 그러나 이 수위는 양재천 중상류에도 영향을 미치므로 하도내 식생 설치로 인해 발생되는 순수한 상승 수위를 계산하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 우선, 양재천 하구 계획홍수위를 0m로 입력하여 양재천의 중상류가 하류로부터 영향을 받지 않는 상황을 재현하여 보았다. 또한 양 재천의 50년 빈도 기본홍수량을 각 하천 단면별로 입력하였다([표 3] 참조).

[표 5]와 [그림 4]는 양재천 하구 계획홍수위를 0m로 하여 양재천 홍수터에 식생 설치 전·후의 단면별 수리계산 결과이다. 식생전 상태의 좌·우측수로 조도계수는 모든 단면이 0.031, 주수로는 0.040, 그리고 유량은 60.63~393.82m3/s 산정되어 이 값들을 식 (3)에 넣어 조도계수를 계산하였다. 양재천의 주수로를 제외한 홍수터인 좌·우측에만 식생을 설치해야 하므로 현장 조사한 식생밀도를 연직 2차원 수리계산에 입력하였다.

그 결과, 조도계수는 좌측수로 0.037~0.203, 주수로 0.013~0.074, 그리고 우측수로는 0.023~0.107로 계산되어, 식생설치가 된 좌·우측수로의 조도계수가 식생 전보다 대부분 높게 산정되었다.

좌·우측수로의 조도계수가 높게 산정되면서 유속은 상대적으로 낮아져 각 단면에서 계산된 유량을 토대로

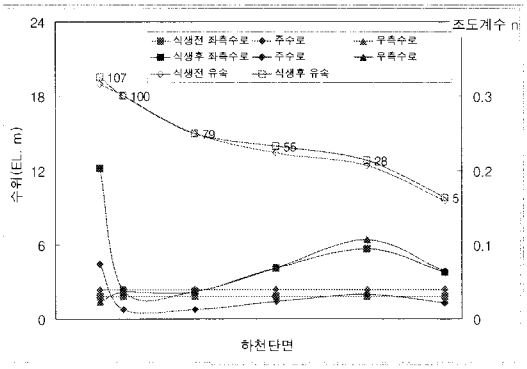


그림 4. 식생전후의 조도계수와 수위 변화 (양재천 하구 계획홍수위 0m)

표 5. 기점홍수위 변화에 따른 식생전후의 단면별 수리계산 결과

홍수위	하천단면	조건	조도계수 (n) 좌측-주수로-우측	유속 (m/s) 좌측-주수로-우측	유량 (m^3/s)	수위 (EL. m)	수위차 (m)
기점 홍수위 0m	No. 107	식생전	0.031-0.040-0.031	2.45-2.88-2.66	60.63	18.97	0.63
		식생후	0.203-0.074-0.023	1.04-4.12-0.99	67.77	19.60	
	No. 100	식생전	0.031-0.040-0.031	2.88-3.24-2.70	354.47	18.07	0.00
		식생후	0.039-0.013-0.036	1.41-5.87-1.43	344.55	18.07	
	No. 79	식생전	0.031-0.040-0.031	2.68-3.22-2.94	393.82	15.01	0.03
		식생후	0.037-0.013-0.037	1.32-6.01-1.45	380.32	14.98	
	No. 55	식생전	0.031-0.040-0.031	1.98-2.20-1.97	207.77	13.43	0.34
		식생후	0.068-0.023-0.068	0.81-3.40-0.80	238.78	13.97	
	No. 28	식생전	0.031-0.040-0.031	1.75-2.09-2.04	158.28	12.39	0.46
		식생후	0.094-0.033-0.107	0.79-3.40-0.80	174.11	12.85	
	No. 5	식생전	0.031-0.040-0.031	3.36-4.87-3.38	230.25	9.54	0.27
		식생후	0.063-0.022-0.064	1.10-5.58-1.11	328.17	9.81	

수심을 계산한 결과, 식생전·후의 차이가 0.00~0.63m로 No. 107과 No. 28에서 크게 발생하였다.

(2) 양재천 하구 계획홍수위 18.01m

양재천 하구의 계획홍수위 18.01m와 50년 빈도의 계획홍수량을 입력하여 연직 2차원 수리해석을 실시하였다. 이는 홍수시 발생할 수 있는 상황을 가정한 것이다. 각 단면의 계획홍수위는 No. 107은 19.44m, No. 103은 19.06m, No. 100은 18.46m이고, 나머지 단면은 18.01m이다.

각 단면의 조도계수, 유속, 유량, 수심 등의 계산결과는 [표 6]에 나타냈다. No. 107과 No. 100에서의 식생전 조도계수는 하류로부터 멀리 떨어져 있어 기점홍수위 0m일 때와 같은 값을 보이나, No.79부터는 조도계수가 크게 증가하여 계획홍수위를 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 식생전 조도계수는 좌측수로, 주수로, 우측수로의 값이 0.031-0.040-0.031로 양재천 하구 계획홍수량이 0m 일 때와 같다.

식생후 조도계수는 좌측수로 0.034~0.456, 주수로 0.011~0.159, 그리고 우측수로는 0.035~0.506으로 계산되어 계획홍수위 0m 일 때 보다 크게 증가한 것으로 나타났다. 각 단면별 유속은 조도계수의 증가로 인해 상대적으로 크게 낮아져 전반적으로 0.30~3.90m/s로 계산되었다. 계산된 조도계수, 유속을 이용하여 수위를 산정한결과, 식생전·후의 수위차는 0.00~1.25m로 식생설치로 인한 수위상승은 No. 76에서 최고 1.25m 상승하였다.

(3) 30% 추가 식생

양재천 하구 계획홍수위 18.01m와 각 단면의 계획홍수위에 식생을 설치하고, 여기에 좀 더 자연과 가까운 상태의 양재천을 만들기 위해 홍수터에 식생을 30% 더 추가하는 것을 상정하여 보았다.

[표 6]와 [그림 5]에서 나타냈듯이 양재천 좌·우측수로에 지금의 상태보다 30% 더 식생을 하였을 때, 전반적으로 조도계수는 증가하고 상대적으로 유속은 감소하였다. 식생후와 홍수터에 30%의 식생을 추가로 설치했을 경우의 수위차는 0.00~0.34m로, No.100에서 최대 0.34m 상승하는 효과가 발생하는 것으로 모의되었다.

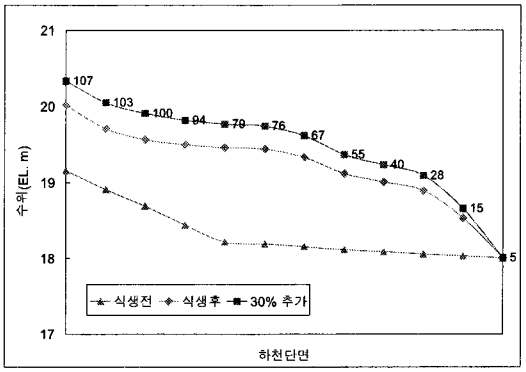


그림 5. 식생전후의 수위변화 (양재천 하구 계획홍수위 18.01m)

Ⅳ. 결 론

단순한 치수나 이수 뿐만 아니라 자연 그대로의 다양한 모습으로 다시 되돌리는 하천복원은 매우 발 빠르게 진보하고 있다.

하천복원의 중요한 항목 중 하나인 하도내 식생은 경관 같은 시각적인 면과 기능적인 면이 있음에도 불구하고 통수단면적을 줄어들게 하여 홍수시에는 홍수해가 발생할 것이라는 부정적인 역할을 내포하기도 한다.

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 하천복원 성공사례로 뽑히고 있는 양재천을 대상으로 식생 설치전·후 그리고 고수부지에 30%의 추가 식생을 가정하여 수리안정성 검토를 실시하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 수위-유량자료가 부재한 하천에서의 수리안정성 분석은 HEC-RAS와 연직 2차원 수리해석을 연계 이용하여 정확하게 수리특성을 검토할 수 있었다.
2. 양재천 하구의 홍수위를 0m로 가정하여 각 단면별 식생설치 전·후의 수위를 계산해 본 결과, 0.00~0.63m의 수위 상승이 예측되었다.
3. 양재천 하구와 각 단면의 계획홍수위를 입력하여 계산해 본 결과, 식생 설치 전·후의 수위차는 0.00~1.25m이며, No. 76이 가장 크게 산정되었다.
4. 식생 설치 후, 홍수터에 30%의 식생을 추가로 설치했을 때를 가정하여 해석해 본 결과, 식생후의 수위보다 최고 0.34m의 상승효과를 나타냈다.

표 6. 기점홍수위에 변화에 따른 식생전후의 단면별 수리계산 결과

홍수위	하천단면 No.	조건	조도계수 (n) 좌측-주수로-우측	유속 (m/s) 좌측-주수로-우측	유량 (m^3/s)	수위 (EL. m)	수위차* (m)
기점 홍수위 18.01m	107	식생전	0.031-0.040-0.031	2.33-2.70-2.51	144.31	19.16	0.86 (0.31)
		식생후	0.288-0.094-0.305	0.88-3.83-0.88	108.30	20.02	
		30% 증가	0.324-0.104-0.344	0.74-3.66-0.83	97.66	20.33	
	103	식생전	0.031-0.040-0.031	2.03-2.38-2.38	770.05	18.91	0.80 (0.34)
		식생후	0.051-0.018-0.060	0.97-3.90-0.96	493.94	19.71	
		30% 증가	0.058-0.020-0.067	0.91-3.62-0.89	441.65	20.05	
	100	식생전	0.031-0.040-0.031	2.31-2.51-2.21	117.91	18.69	0.88 (0.34)
		식생후	0.272-0.090-0.262	0.85-3.46-0.61	85.74	19.57	
		30% 증가	0.306-0.100-0.294	0.43-3.22-0.60	77.24	19.91	
	94	식생전	0.031-0.040-0.031	1.75-1.82-1.77	1,016.54	18.44	1.06 (0.32)
		식생후	0.034-0.011-0.035	0.73-3.04-0.72	737.42	19.50	
		30% 증가	0.038-0.011-0.040	0.66-2.86-0.65	673.00	19.82	
	79	식생전	0.031-0.040-0.031	1.25-1.30-1.27	1,820.12	18.22	1.24 (0.31)
		식생후	0.076-0.028-0.079	0.62-2.26-0.57	792.63	19.46	
		30% 증가	0.086-0.031-0.089	0.60-2.16-0.55	697.64	19.77	
	76	식생전	0.031-0.040-0.031	1.17-1.27-1.21	2,332.22	18.19	1.25 (0.30)
		식생후	0.066-0.023-0.070	0.52-2.07-0.50	1,138.61	19.44	
		30% 증가	0.075-0.025-0.079	0.50-1.99-0.48	1,007.94	19.74	
	67	식생전	0.031-0.040-0.031	0.93-1.03-0.96	687.35	18.16	1.17 (0.29)
		식생후	0.348-0.114-0.358	0.41-1.75-0.41	313.35	19.33	
		30% 증가	0.395-0.129-0.406	0.30-1.59-0.20	277.67	19.62	
	55	식생전	0.031-0.040-0.031	0.83-0.87-0.81	2,986.20	18.12	1.00 (0.25)
		식생후	0.115-0.038-0.114	0.38-1.55-0.38	1,180.66	19.12	
		30% 증가	0.131-0.043-0.129	0.37-1.51-0.37	1,042.61	19.37	
	40	식생전	0.031-0.040-0.031	0.75-0.80-0.77	3,325.85	18.09	0.92 (0.22)
		식생후	0.126-0.043-0.130	0.37-1.50-0.37	1,224.10	19.01	
		30% 증가	0.143-0.048-0.147	0.36-1.47-0.36	1,080.25	19.23	
	28	식생전	0.031-0.040-0.031	0.73-0.82-0.75	3,118.90	18.06	0.83 (0.20)
		식생후	0.148-0.055-0.150	0.36-1.48-0.38	1,083.47	18.89	
		30% 증가	0.168-0.062-0.173	0.35-1.45-0.38	954.04	19.09	
	15	식생전	0.031-0.040-0.031	0.69-0.85-0.77	890.07	18.03	0.50 (0.13)
		식생후	0.456-0.159-0.506	0.33-1.49-0.33	382.38	18.53	
		30% 증가	0.518-0.178-0.575	0.32-1.47-0.32	339.52	18.66	
	5	식생전	0.031-0.040-0.031	0.67-0.79-0.68	1,772.39	18.01	0.00 (0)
		식생후	0.271-0.084-0.273	0.30-1.44-0.30	801.23	18.01	
		30% 증가	0.308-0.094-0.310	0.29-1.44-0.29	714.09	18.01	

*는 식생후와 추가 30% 식생시의 수위차

참 고 문 헌

[1] B. Azmon, "Manning coefficient of roughness - a case study along Soreq Stream, 1971- 1981", Journal of Hydrology, Vol.132, pp.361 -377, 1992.

[2] 김원, 김양수, 우효섭, "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정", 한국수자원학회논문집, 제28권, 제6호, pp.133-146, 1995.

[3] H. Afzalimehr and F. Anctil, "Estimation of gravel-bed river flow resistance," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.124, No.10, pp.1,054-1,058, 1998.

[4] 이정규, 이창현, "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정", 대한토목학회논문집, 제24권, 제1B호, pp.23-32, 2004.

[5] 이신재, 박상우, "수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구", 한국수자원학회지논문집, 제39권, 제12호, pp.985-996, 2006.

[6] M. Fathi-Maghadam and N. Kouwen, "Nonrigid,

Nonsubmerged, Vegetative Roughness on Floodplains," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No.1, pp.51-57, 1997.

[7] F. Wu, H. W. Shen, and Y. Chou, "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.9, pp.934-942, 2001.

[8] E. D. Darby, "Effect of riparian vegetation of flow resistance and flood potential," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.5, pp.443-454, 1999.

[9] D. M. Temple, "Flow resistance of grass- lined channel bank," Applied Engineering in Agriculture, ASAE, Vol.15, No.2, pp.129-133, 1999.

[10] B. M. Stone and H. T. Shen, "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness," Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.5, pp.500-506, 2002.

[11] 강형식, 최성욱, "식생된 개수로에서 항력가중계수가 흐름에 미치는 영향 분석", 대한토목학회논문집, 제26권, 제5B호, pp.529-537, 2006.

[12] Schneider and Bautabellen, Werner-verlag GmbH, pp.13.18-13.27, 1992.

[13] 행정자치부, 국립방재연구소, 자연형 하천 공법의 재해특성분석에 관한 연구(Ⅱ), pp.213-233, 2000.

[14] 우원재, 정동양, "수변식재에 따른 갑천의 수위분석", 한국환경복원녹화기술학회, Vol.1, No.1, pp.3-17, 1988.

[15] 건설교통부, 하천에서 나무심기 및 관리에 관한 기준(안), pp.47-76, 2007.

[16] 김병찬, 김치곤, 박상범, 이종석, "식생수로에서의 조도특성에 관한 연구", 2008 한국콘텐츠학회 춘계종합학술대회, pp.776-779, 2008.

[17] V. T. Chow, Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1959.

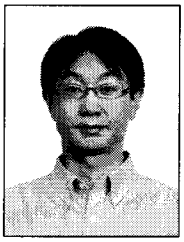
[18] 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 홍수터 수목관리 기술개발(06건설핵심B01), pp.81-86, 2006.

[19] 서울특별시, 대동천 등 7개 하천정비기본계획(대동천, 가오천, 화계천, 면목천, 전농천, 사당천, 양재천), pp.3-11, 2005.

[20] 김병찬, 윤성준, 김민정, 이종석, "식생된 수로에서의 수위변화 분석", 2008 한국콘텐츠학회 춘계종합학술대회, pp.780-783, 2008.

저 자 소 개

김 병 찬(Byeong-Chan Kim) 정회원



- 1993년 2월 : 충북대학교 토목공학과(공학사)
- 1995년 8월 : 충북대학교 토목공학과(공학석사)
- 2002년 8월 : 동국대학교 토목환경공학과(공학박사)
- 2000년 8월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목공학과 겸임교수

<관심분야> : 수리 · 수문, 하천수질, 하천복원

이 종 석(Jong-Seok Lee) 정회원

- 1987년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목공학과 교수

<관심분야> : 수리 · 수문, 하천 · 생태환경