

소양강 댐 직하류 하천의 식생 영향에 의한 통수능 분석

Conveyance Analysis of Downstream of the Soyang Reservoir Considering the Influence of Vegetation

노준우* · 신현호** · 김호준***

Noh, Joonwoo · Shin, Hyunho · Kim, Hojoon

Abstract

Recently management of vegetation distributed in the watercourse is very important not only for safety but also for river restoration. In general, vegetations in the watercourse increase hydraulic resistance and accordingly decrease conveyance capacity which may yield levee overflow. This paper simulates water level rise using 1D and 2D hydro dynamic model to check the possibility of overflow in downstream of the Soyang Reservoir by assigning different roughness coefficient corresponding to different types of vegetation. In this study, 3 different vegetation types of tree, shrub, and main channel were considered and corresponding Manning's roughness coefficient n was assigned based on the vegetation map generated from the site investigation. As results, the water level raised about 0.1 to 0.7 m comparing with the case without considering vegetation and a proper measurements is necessary where overflow occurs due to low level levee.

Keywords : *vegetation, hydraulic analysis, roughness coefficient, soyang river*

요 지

최근, 하천변에 분포된 식생관리는 하천의 안정성 뿐만 아니라 하천복원을 위해서도 매우 중요하다. 통상 하천변에 분포된 식생에 의하여 수리학적 저항이 증가되고 통수능이 감소되어 제방 범람을 초래한다. 본 논문에서는 1차원 및 2차원 수리해석 모형을 활용하여 소양강 댐 하류하천을 대상으로 서로 상이한 식생분포에 해당하는 조도계수를 적용함으로써 식생에 의한 제방일류 가능성을 검토하였다. 본 연구에서는 3가지 상이한 조도계수 즉, 관목부, 교목부, 그리고 주수로 부로 구분하여 해당되는 조도계수를 현장측정을 통해 작성한 식생도를 바탕으로 모형에 반영하여 이들에 의한 영향을 고려하였다. 전체적으로 식생에 의하여 약 0.1 m - 0.7 m 수위가 상승하는 것으로 모의되었으며 일류에 취약한 제방의 경우 범람방지를 위해 적절한 대책이 필요한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 식생분포, 수리해석, 조도계수, 소양강

1. 서 론

최근 이상기후에 의한 국지성 폭우 및 돌발 홍수로 인적·물적 피해가 급증하고 있다. 특히 과거의 강우 관측기록을 갱신한 2002년 루사와 2003년 매미는 유역 내 유수량을 급격히 증가시켜 하천의 중·하류부에 막대한 피해를 야기하였고 그 손실비용은 천문학적인 수치를 기록하였다. 하천의 수위변화는 여러 가지 요인에 따라 달라질 수 있지만 유수량의 증가, 하도 단면의 흐름저항 증가, 구조물에 의한 배수위, 하천의 만곡도 등에 의한 영향을 주로 받는다. 이 중에서 수위의 변화양상은 매우 복잡하고 다양하게 발생하며 하도 단면의 흐름저항, 이를테면 자연 하도 하상의 재질, 저수로 및 홍수터의 식생, 이로 인한 단면의 기하학적

형태변화 등에 따라 때로는 실제 설계된 수로와 전혀 다른 양상이 나타날 수도 있다. 최근 하천관리자 및 수리학자들이 어류 및 수생생물의 서식처, 여가활동, 제방침식감소 등의 측면에서 하천식생에 대한 중요성을 이해하면서 하천변 식생분포를 고려한 하천관리가 주요관심사가 되고 있다. 하천내 식생은 생물 서식처를 조성하며 하천의 환경성과 심미성을 크게 증진시킨다는 장점을 가지는 반면, 수변식생이 무성해질수록 하천의 통수능을 감소시키며 수위를 증가시켜 홍수의 위험성을 증가시킨다는 것이 단점으로 지적되어 왔다. 과거에는 홍수조절의 관점에서 하도 내 식생은 통수단면적의 축소와 조도상승 등의 문제로 기피의 대상이 되어왔으나 최근 저수지를 비롯한 자연하천의 생태계 보전·복원을 통한 하천 환경의 개선, 경제성장 및 생활환경의 질적

*정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 (E-mail : jnoh@kwater.or.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한국수자원공사 K-water연구원 위촉연구원 (E-Mail : hhshin@kwater.or.kr)

***한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 (E-mail : hjoonkim@kwater.or.kr)

향상에 의한 하천변 경관조성과 휴식처 조성 등 사회적 요구가 증대하여 하도내 식생의 영향을 고려한 하천관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

Johnson 등(1976)과 Johnson(1994)은 상류에 댐이 건설되면 하류하천에 수목이 더욱 번성할 수 있는 환경이 조성된다고 보고하였다. 댐 하류의 하상은 상류로부터 세립토의 공급이 중단되어 하상의 표면이 조립화 되는데 이것은 유수로부터 하상을 안정화시켜 식생활착에 도움을 주고 식생피복의 면적을 증가시키게 된다. 한편 Kamada와 Okebe(1998)는 현장관측을 통하여 상류댐으로 인한 유사량이 감소하고 사주에 활착된 식생이 유사이동 자체를 억제하여 하상의 안정화가 가속화되는 것을 보였다. Andrew(1984), Hey와 Thorne(1986), Huang과 Nanson(1997)은 현장 조사로부터 밀도가 높은 식생은 하천 수심과 흐름에 대한 저항을 증가시키고 하천 폭의 증가를 억제시킨다고 설명하였으며, 하천의 발달 과정은 시경 밀도, 형상, 연령, 건강상태 등에 의해 영향을 받는다고 하였다. 그러나 지금까지 식생에 의한 흐름저항은 과다 추정된 것으로 이는 1990년대 이후 하천의 식생관리에 중요한 전향점을 제공해 주었다(Masterman, 1992). 이러한 식생 활착에 따른 하도 영향을 판단하기 위해 수치모의를 활용한 연구도 활발하다. Mahoney와 Rood(1998)는 홍수터 식생, 특히 북미산 포플러의 이입, 활착을 모의하는 'Recruitment Box Model(RBM)'을 제안하였으며 Dixon과 Truner(2006)는 'RBM'을 이용하여 하천흐름이 수변 초기 정착 수목의 유식물 생장에 미치는 영향을 모의하였다. Tsujimoto(1999)는 식생 활착에 의한 영역 확장에 의해 수로폭이 축소되는 원리를 설명하였으며, 2차원 수심평균 모형을 사용하여 이러한 과정을 수치모의 하였다. 또한 연속적인 홍수에 의해 식생 사주 주변에 유사의 퇴적이 발생한다는 것을 확인하였으며 이에 따라 식생 사주는 길이 및 폭 방향으로 확장한다는 알 수 있었다.

본 연구에서는 소양강댐 직하류 하천을 대상으로 홍수기 방류시 식생에 의한 수위변동을 모의함으로써 대상하천의 통수능 검토를 실시하였다. 이를 위하여 대상유역의 식생분포를 현장조사를 통해 파악하여 식생도를 작성하였고 이를 토대로 1차원 및 2차원 수리학적 수치모형을 활용하여 식생을 고려한 흐름해석을 실시함으로써 단면별 수위상승을 검토하였다. 제방월류 가능성 검토에 중점을 두고 모의를 수행하고자 기본계획 방류량 및 최대방류량을 적용하였으며 단일조도계수 및 복수조도계수를 적용함으로써 식생분포의 유무에 따른 모의결과를 서로 비교·검토하였으며 수위 모의결과와 단면별 제방고를 상호 비교하여 월류가능성을 판단하였다. 본 연구결과를 토대로 최근 문제시되고 있는 하천변 식생에 대한 영향을 해석하고 이에 관한 관리방안을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

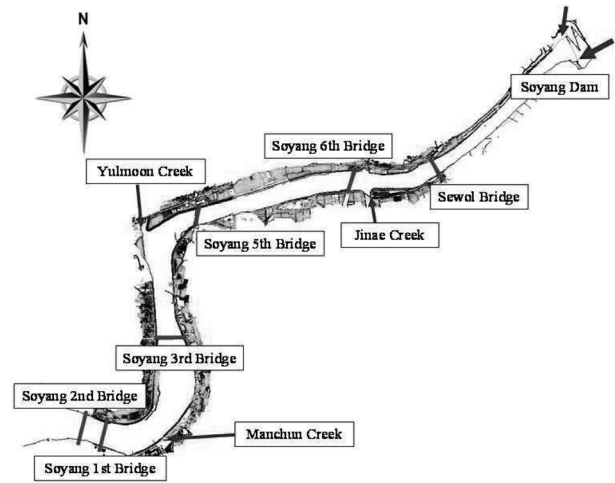


Fig. 1 Downstream of the Soyang Reservoir

2. 대상유역 개요 및 식생분포조사

본 연구에서는 소양강 댐 직하류부터 북한강 합류지점까지를 모의 구간으로 설정하였다. Fig. 1과 같이 소양강 댐 직하류로부터 약 13 km 유하하다가 최하류단 소양 제 2교를 거쳐서 의암호로 유입하게 된다. 대상구간에는 총 6개의 교량이 존재하며 주요지류로는 지내천, 울문천, 그리고 만천천이 있다.

대상구간의 식생조사를 위하여 소양댐 하류에서 소양 제3교까지 약 9 km구간에 대한 정밀식생도를 작성하였으며, 22개의 지점을 선정하여 식물의 군락 구조 및 분포특성을 조사하였다. 전체 조사구간에서 확인된 식물은 27목 45과 104속 124종류이며, 귀화식물은 14종류가 출현하였다. 조사구간의 귀화율은 11.3%이고, 도시화지수는 4.9로서 간섭이 많은 일반적인 하천 수준으로 나타났다. 환경부에서 지정한 생태계교란식물 4종류(가시박, 돼지풀, 미국가시박, 미국쑥부쟁이)가 분포하고 있으며, 특히 최근에 국내 하천에서 문제가 되고 있는 가시박의 경우 분포범위가 광범위하고 자생 식물군락을 고사시키는 등의 문제를 유발하고 있어 별도의 관리 계획 수립이 필요하다. 조사구간에 분포하는 식물군락에서 교목은 버드나무(*Salix koreensis*)가 우점하고, 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)가 아우점하고 있다. 이들은 제방사면과 인접하여 분포하고, 밀도는 약 10개체/100 m²이다. 교목은 높이 7-13 m로서, 식피율은 약 90%를 나타내고 흉고 직경은 15-17 cm 정도이다. 군락의 구성종은 고마리, 달뿌리풀, 쇠뜨기, 환삼덩굴 등이다. 관목은 갯버들군락(*Salix gracilistyla* community)이 우점하고, 수변부 및 하중도에 주로 분포하고 있으며, 밀도는 약 25개체/100 m²이다. 관목류는 높이 3-6 m로서, 식피율은 90%이상을 나타내고, 흉고 직경은 5-6 cm 정도이다. 군락의 구성종은 달뿌리풀, 쇠뜨기 등

Table 1. Distribution of vegetation in downstream of the Soyang River

Classification	Hight(m)	Community	DBH(cm)	Density (100 m ²)
Tree	7-13	<i>Robinia pseudoacacia</i> (아까시나무)	15.5±6.0	9.3±1.7
		<i>Salix koreensis</i> (버드나무)	17.0±6.6	10.8±1.3
Shrubs	3-6	<i>Salix gracilistyla</i> (갯버들)	5.3±1.6	21.8±7.0
Herb	<3	<i>Phragmites japonica</i> (달뿌리풀)	<1.0	2482.5±239.2

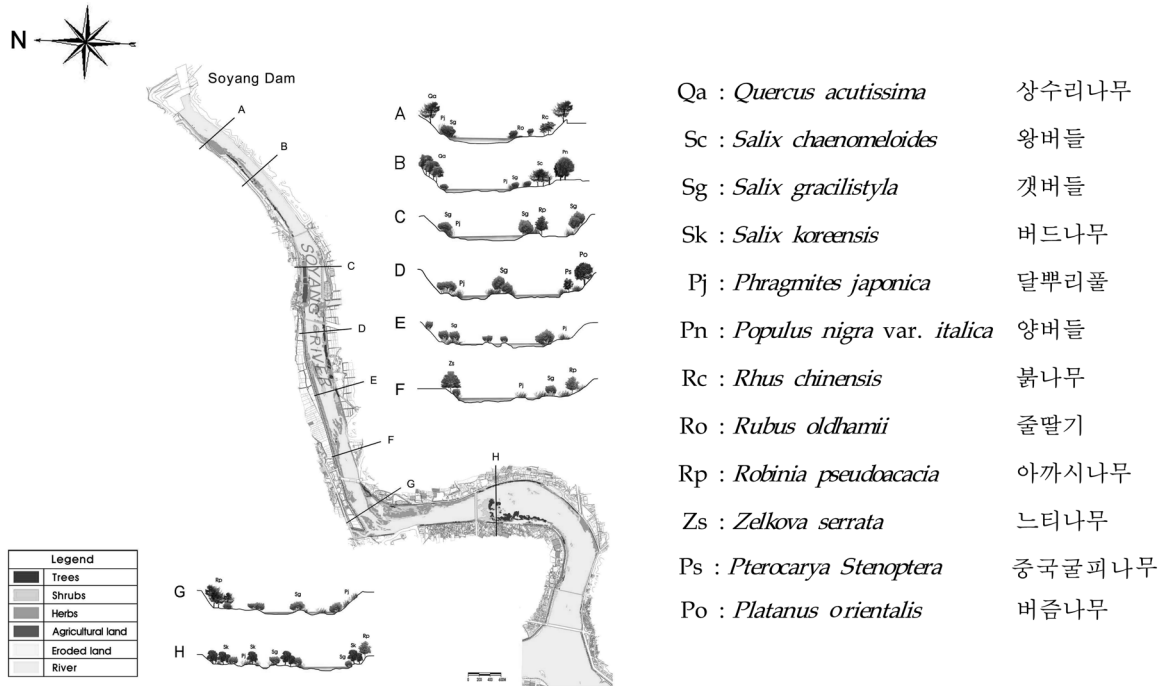


Fig. 2 Vegetation map generated from site investigation

으로서 군락내의 초본층의 식피율은 10-20%로서 매우 낮다. 초본류는 달뿌리풀군락(*Phragmites japonica* community)이 우점하고, 수변부에 분포하고 있다. 높이는 1.5-3 m 정도이고 밀도는 2500개체/100 m²로 나타났다(Table 1, Fig. 3).

3. 이론적 배경

정상상태 개수로 흐름은 Fig. 3과 같이 표현할 수 있으며 에너지 방정식을 적용하여 단면의 마찰손실 h_c 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_c = L\bar{S}_f + C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (1)$$

여기서, V_1, V_2 는 평균 속도(유량/단면적), α_1, α_2 는 유속 및 속도와 에너지 보정계수, g 는 중력가속도를 나타내며 유량 가중 구간 거리 L 은 구간의 양단에서 좌측 홍수터, 주수로 및 우측 홍수터에서의 각각 유량을 이용하여 계산된다. C 는

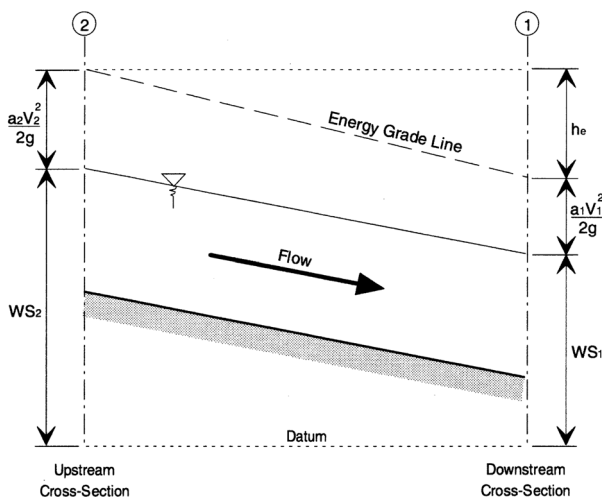


Fig. 3 Representative terms in the energy equation

단면 확대 및 축소 손실계수이며 \bar{S}_f 는 구간의 대표 마찰경사를 나타낸다. 1차원 흐름에서 각 단면에서의 마찰경사는 식 (2)와 같다.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, K 는 각 단면에서의 통수능을 의미하며 Manning 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3)$$

한편 운동량 방정식으로부터 하상의 전단력(Shear stress)은 식 유체의 밀도와 유속의 함수로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau^b = \rho k_b U \quad (4)$$

식 (4)를 2차원으로 확장하여 기술하면 종방향 및 횡방향 전단력 τ_x^b 와 τ_y^b 는 유속의 함수로 다음과 같이 기술한다.

$$\tau_x^b = \rho k_b u \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (5a)$$

$$\tau_y^b = \rho k_b v \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (5b)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, k_b 는 무차원 전단력 계수(Shear stress coefficient)이며 Chezy-Manning 공식으로 계산된다.

$$k_b = \frac{g}{C^2} \quad (6)$$

여기서 C 는 Chezy의 유량계수이며 Manning의 조도계수의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} \quad (7)$$

식 (7)로 구해진 전단력 Chezy 유량계수를 식 (6)에 대입하면 전단력은 흐름장과 조도의 함수가 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_x^b = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} u \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (8a)$$

$$\tau_x^b = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (8b)$$

4. 모형의 적용

4.1 조도계수의 산정

대상구간내 흐름해석을 수행하기 위하여 먼저 적절한 하상계수의 산정이 선행되어야 한다. 조도계수의 산정을 위하여 대표적인 1차원 수리계산 모형인 HEC-RAS모형을 사용하여 모의를 수행하였다. HEC-RAS는 미국군공병단의 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 기존의 HEC-2모형을 발전시킨 것으로 windows상에서 GUI환경을 제공하여 사용하기 쉬운 인터페이스를 갖추고 있다. HEC-RAS의 1차원 정상류 해석(steady flow analysis)은 상류, 사류 뿐만 아니라 혼합류에 대해서도 해석이 기능이 가능하며 1차원 에너지방정식을 기본으로 마찰 및 단면 확대/축소에 의한 에너지 손실을 고려할 수 있고 운동량방정식으로 도수 및 혼합류에 대한 해석이 가능하다. 또한 교량, 암거, 웨어, 홍수터 구조물 등 홍수류의 소통을 방해하는 구조물을 수리계산에 고려할 수 있으며, 이는 홍수터관리나, 홍수보험 정책수립 등에 적용가능하다.

Fig. 4과 같이 대상구간의 횡단면을 설정하였고 교각의 영향을 고려하여 수축과 확장계수의 경우 해당단면에 각각 0.3, 0.5의 값을 적용하였으며 소양강댐의 직하류 최초 교각인 세월교의 경우 홍수량에 따른 구조물의 특성을 반영하여 암거로 모의하였다. 북한강 하천정비기본계획(건설교통부, 2002)에서 제시된 Manning 조도계수 0.035를 적용하여 소양강댐 발전방류량 240 cms를 상류단 경계조건으로, 평균수위 E.L. 70.00 m를 하류단 경계조건으로 적용하여 모의를 실시하였다. 모의결과를 바탕으로 천전 수위관측소 지점에서 계산된 수위값과 실측평균수위 77.14 m를 비교함으로써 하상저항 조도계수를 검증하였다.

HEC-RAS 모형으로부터 계산된 모의결과와 최상류단으로부터 4.5 Km 하류부, 세월교에 위치한 천전수위표에서 관측된 수위값을 서로 비교한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 모의된 수위는 관측값과 잘 일치하였고 주수로 부분의 흐름이

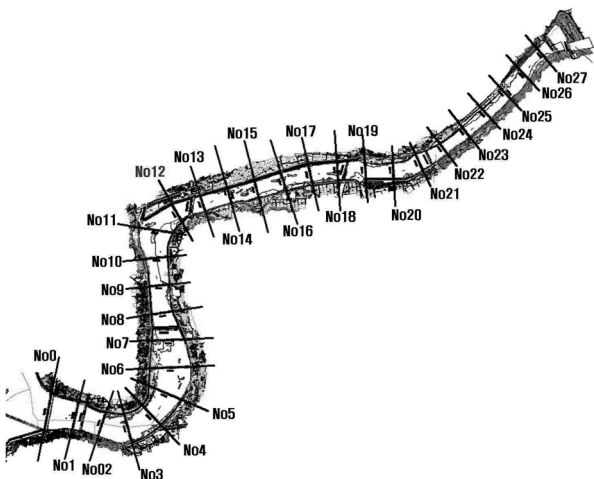


Fig. 4 Cross sections of the Soyang River for 1D hydraulic analysis

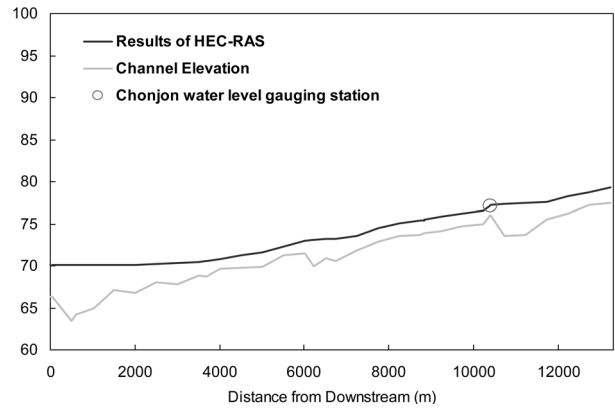


Fig. 5 Comparison of simulated and measured water surface elevation

지배적으로 발생하여 하천변에 위치한 식생의 영향은 거의 받지 않는 것으로 파악되었다.

4.2 식생에 의한 수위상승 모의

식생분포에 따른 범람양상을 분석하기 위하여 계획 방류량 5,500 m³/s와 보조여수로의 방류량이 추가된 최대방류량 7,500 m³/s에 대하여 모의결과를 분석하였다. 식생의 영향을 고려하기 위하여 저수로, 관목지, 그리고 교목지의 3개 구역으로 구분하고 Table 2에 제시된 Chow (1959)의 산정결과

Table 2. Manning roughness coefficients for various open channel surfaces(Chow, 1959)

Material	Typical Manning roughness coefficient
Natural stream channels	
Clean, straight stream	0.030
Clean, winding stream	0.040
Winding with weeds and pools	0.050
With heavy brush and timber	0.100
Flood Plains	
Pasture	0.035
Field crops	0.040
Light brush and weeds	0.050
Dense brush	0.070
Dense trees	0.100

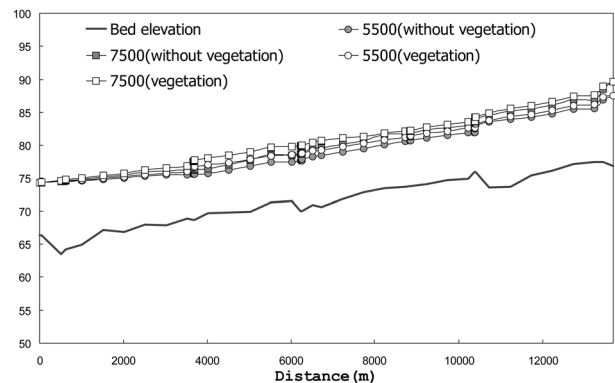


Fig. 6 Results of the simulated water surface elevation with and without considering vegetation effects

를 바탕으로 저수로의 경우 0.035, 관목 0.05, 그리고 교목의 경우 0.1의 조도계수를 입력해 동일 단면에 대하여 복합 조도계수를 반영하였다.

모의결과를 Fig. 6에 제시하였고 하류에서 약 4~6 km부근, 8번 단면이 수위차가 가장 큰 것으로 나타났다. 이 지점은 소양 제3교의 320 m 상류지점으로 우안 하중도 부근에 식생이 밀집한 영역의 직상류부에 해당하기 때문에 식생의 영향을 보다 직접적으로 받기 때문인 것으로 사료된다. 그 외 하류단 약 5~7 km 부근 관목이 밀집한 영역에서도 수위차가 크게 나타났으며 하도의 상류 우안 식생이 번성한 구간도 0.2~0.8 m의 수위차를 보인다.

4.3 2차원 모형의 적용

대상하천의 2차원 흐름해석을 위하여 2차원 유한요소 수심적분 프로그램인 RMA-2 모형을 이용하였다. RMA-2 모형은 미육군공병단(USCE)에서 처음으로 개발되었으며, 현재 WES(Waterway Experimental Station)에 의해서 지속적으로 관리되고 있다. RMA-2 모형은 하중도를 포함한 하천수로구간의 흐름, 본류와 지류의 합류부, 유수단면의 확대 및 축소를 포함한 하천구간의 흐름, 만곡수로등 하천의 수리동역학적 계산에 널리 이용되고 있다. RMA-2 모형은 전형적인 Galerkin 기중잔차기법을 채택한 유한요소 모형이며 완전음해법(fully implicit method)에 의해 형성된 행렬을 Newton-Raphson법으로 해석하므로 비선형 해석에 있어서 정확한 해를 제공한다.

대상구간의 유한요소 격자는 전 구간에 대하여 정방형의 사각형 격자로 구성하여 해당단면에서의 결과분석을 용이하게 하였으며 만곡지형 및 흐름단면의 수축구간에서는 하폭 증가 및 감소를 고려하기 위하여 삼각형 격자를 부분적으로 도입하여 작성하였다. 하도구간 전체에 대해 노드 수 10344개, 요소수 3427개로 각 격자의 크기는 흐름방향 및 흐름과 직각방향으로 약 40×15 m의 크기로 구성하였다. 물리적 단면의 타당성을 확보하기 위해 하상고의 경우 수치지도로부터 추출된 하상지형과 단면별로 실측된 측량 성과를 조합하여 역거리 가중치(IDW)기법을 적용하였으며 만곡부의 경우 지형 왜곡을 최소화하기 위하여 자체 보간을 실시하였다. 대상구간의 식생분포를 반영하기 위하여 기 작성된 식생분포도를 기반으로 1차원 수리해석과 마찬가지로 주수로, 교목, 및 관목으로 구분하여 작성한 격자를 Fig. 7에 제시하였다.

수치지도 상 제시된 제방고를 토대로 외부경계를 설정해



Fig. 7 Finite element mesh assigned different roughness coefficients considering vegetative distribution

Table 3. Upstream and downstream boundary conditions

Case	Discharge (m ³ /s)	Water surface elevation (EL. m)
Case1	5,500	74.43
Case2	7,500	75.31

주었으며 하류단 경계조건으로 소양강 댐의 방류시 산정된 의암댐의 저수위를 입력하고 수치모형의 안정화를 위해 일정 유량 주입에 수위를 점차적으로 감소시켜 정상상태에 도달하고 나서 흐름이 안정화 되면 단면별 결과를 추출 하였다. 하상재료별 외접성 계수의 경우 등방성 조건을 적용하여 1,000 Pascal-sec로 가정하여 입력하였고 Table 3에 제시된 2가지 경우에 대한 상·하류 경계조건을 적용하여 모의를 수행하였다.

Fig. 8(a)와 8(b)에 식생을 고려하지 않고 단일조도계수를 적용해서 모의한 경우와 식생을 고려해서 모의한 경우에 대한 유속분포도를 각각 제시하였다. 전체적으로 하폭이 좁은 구간에서 유속증가현상이 두드러지고 하폭이 증가함에 따라 유속이 감소하는 양상을 보였다. 식생을 고려하여 모의한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하면 식생분포가 존재하는 구간의 유속이 상대적으로 낮게 모의되어 하도에 존재하는 식생의 효과가 잘 반영되어 모의되었음을 알 수 있다.

4.4 모의결과 비교 및 분석

1차원 모형과 2차원 모의로부터 계산된 수위값에 대한 비교·검토를 위하여 Fig. 9에 각 모형으로부터 산정된 수위값을 제시하였다. 보조여수로 방류량 유무에 따라 계획홍수

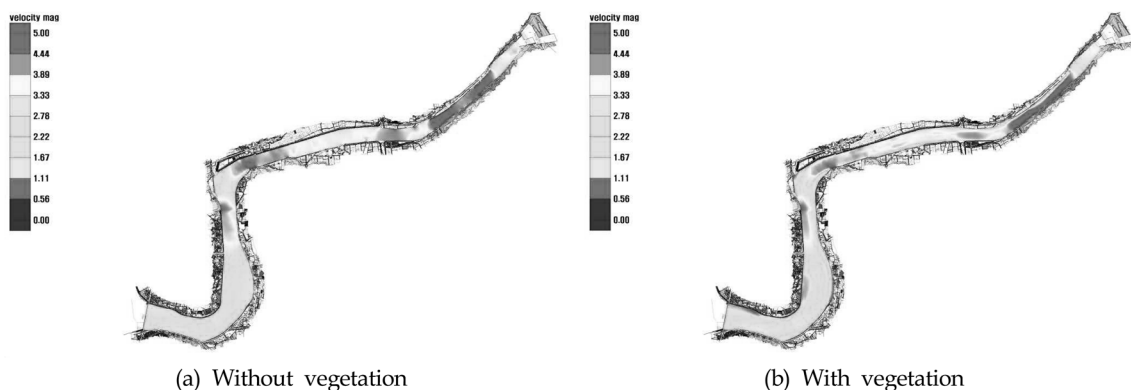


Fig. 8 Results of flow field in downstream of the Soyang Reservoir

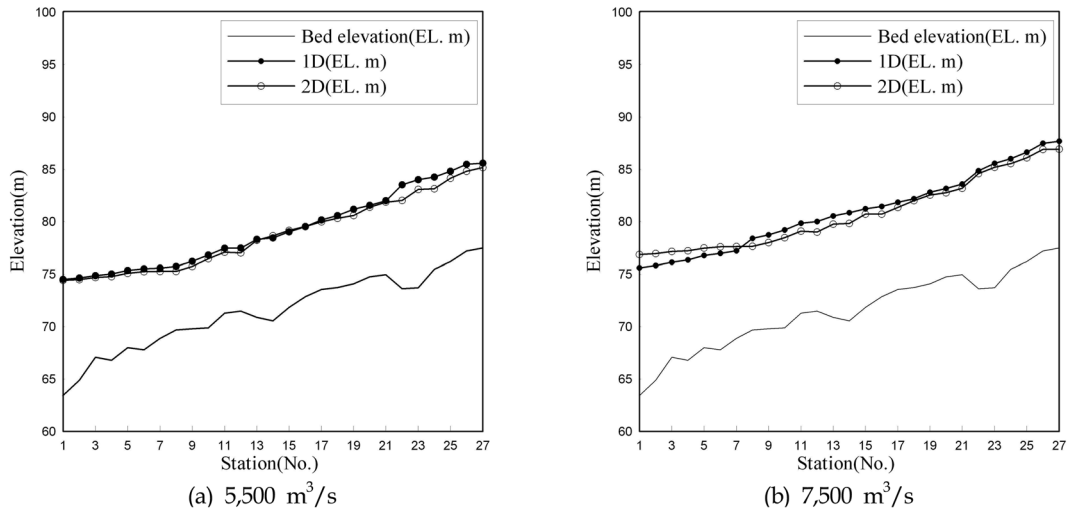


Fig. 9 Comparison of the water surface elevation simulated using 1D and 2D hydrodynamic model

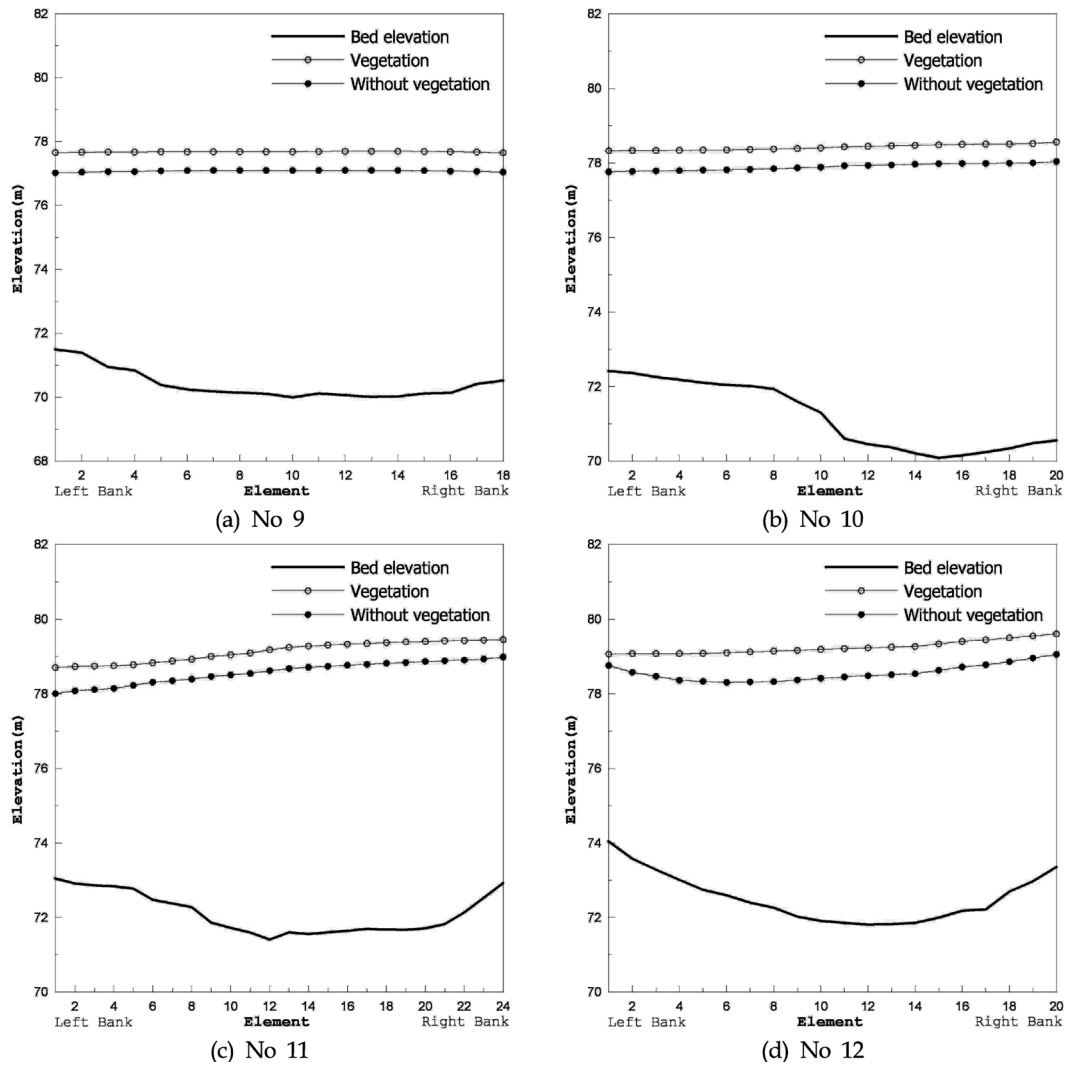


Fig. 10 Water elevation rise due to vegetation using 2D hydraulic simulation model

량과 최대홍수량으로 나누어 2가지 조건에 대하여 모의된 결과에 대하여 검토를 실시했으며 전체 구간에 대해 1차원과 2차원 모형 모두 전형적인 M2곡선의 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 계획방류량 5,500 m³/s를 적용하였을 경우 상류단 소구간을 제외하고 1·2차원 모형의 모의결과가 전체적으로 잘 일치하고 있으며 최대방류량 7,500 m³/s를 적용하였을 경우 하류단에서 2차원 모형의 결과값이 약 1~1.5 m 크게 산정되었다. 하지만 주요 분석대상 영역인 식생활착

구간 8~13번 구간에 대해서는 모의결과가 대체적으로 잘 일치하고 있다.

2차원 모형으로부터 계산된 모의결과를 활용하여 식생유무에 따른 단면별 수위변화를 검토하였다. 2차원 모의결과를 분석한 후 수위차이가 가장 큰 단면에 해당하는 NO.12 단면을 중심으로 횡단면 수위곡선을 도시 하였다. 만곡이 시작되는 12번 단면의 경우 저수로 및 우안 홍수터의 수위차가 좌안보다 약 0.1~0.7 m 크게 나타나는 것을 알 수 있었고

Table 4. Difference of the simulated water surface elevation with and without considering vegetation

Section number (No)	Main spillway discharge release (5,500 m/s)			Maximum discharge release (7,500 m/s)			Left bank EL. (m)	Right bank EL. (m)
	With vegetation (m)	Without vegetation (m)	Difference (m)	With vegetation (m)	Without vegetation (m)	Difference (m)		
1	74.420	74.430	-0.0099	75.312	75.312	0.0000	77.738	77.486
2	74.504	74.495	0.0093	75.487	75.455	0.0318	79.238	77.533
3	74.733	74.689	0.0444	75.796	75.742	0.0532	76.809	77.124
4	74.896	74.793	0.1031	76.035	75.898	0.1368	77.244	78.203
5	75.218	75.103	0.1147	76.421	76.307	0.1137	77.365	79.321
6	75.390	75.259	0.1318	76.664	76.497	0.1671	76.729	78.586
7	75.564	75.276	0.2881	77.212	76.534	0.6778	77.494	78.301
8	75.694	75.275	0.4189	77.286	76.534	0.7523	77.954	78.288
9	76.101	75.740	0.3601	77.678	77.078	0.6003	77.538	78.712
10	76.917	76.477	0.4395	78.420	77.894	0.5258	77.890	95.367
11	77.614	77.102	0.5122	79.128	78.569	0.5597	78.029	79.589
12	77.794	77.039	0.7548	79.246	78.562	0.6845	78.999	79.388
13	78.484	78.238	0.2454	80.006	79.538	0.4680	76.438	79.968
14	78.883	78.650	0.2323	80.485	80.097	0.3878	81.602	80.505
15	79.469	79.168	0.3014	81.128	80.750	0.3787	80.612	80.642
16	79.944	79.531	0.4126	81.608	81.167	0.4405	80.620	81.000
17	80.523	79.996	0.5275	82.239	81.648	0.5906	81.428	81.588
18	80.864	80.312	0.5519	82.618	81.981	0.6372	81.466	81.927
19	81.219	80.578	0.6405	82.946	82.247	0.6991	82.206	77.759
20	81.965	81.380	0.5853	83.643	83.038	0.6049	83.043	79.127
21	82.361	81.866	0.4947	83.995	83.588	0.4071	83.966	84.158
22	82.464	82.041	0.4231	84.143	83.642	0.5008	79.125	86.636
23	83.334	83.080	0.2542	85.226	84.769	0.4566	85.640	91.364
24	83.492	83.149	0.3438	85.545	85.013	0.5318	-	85.173
25	84.642	84.149	0.4930	86.800	86.019	0.7805	96.862	80.920
26	85.267	84.812	0.4555	87.528	86.752	0.7755	97.835	90.568
27	85.545	85.170	0.3751	87.756	87.081	0.6752	-	90.138

11번 단면의 경우도 우안부의 수심이 좌안부와 비교하여 상대적으로 크게 모의되었다. 이는 좌안부에 분포한 식생의 영향으로 유수방향이 우안부 쪽으로 치우쳐 나타난 결과로 판단된다. 하지만 식생을 고려하지 않은 동일 조도계수를 적용한 경우에도 이와 비슷한 현상이 나타나 만족부의 영향도 함께 반영이 된 것임을 알 수 있다. 특히 9번 단면의 경우 식생의 영향이 없이 홍수량이 유입되면 제방을 월류하지 않지만 식생이 고려되면 좌안 제방을 월류하는 것으로 나타나 식생의 제거 등을 통한 하도의 통수능 확보가 필요할 것으로 사료된다. 아래의 Table 4에 전체 결과를 정리하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 1차원 및 2차원 수치해석 모형을 활용하여 소양강댐 직하류 하천을 대상으로 수리해석을 수행하고 식생의 영향에 의한 통수능을 검토하여 제방월류 가능성을 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 소양강댐의 하류하천 14 km 구간에 대하여 계획 방류량

- 및 최대 방류량의 두 가지 경계조건으로 모의를 수행하였으며 식생의 영향을 고려한 통수능을 산정함으로써 수위 상승에 대한 월류가능성을 분석하였다.
2. 대상 구간에 분포된 식생조사를 위하여 현장 조사를 통해 밀도, 높이, 흉고직경 등에 대한 자료를 수집하였으며 수집한 식생분포자료를 활용하여 저수로, 교목부, 관목부로 구분하여 각각에 대한 조도계수를 산정하였다.
3. 산정된 조도계수를 범용 2차원 RMA2 유한요소 모형의 격자에 반영해 줌으로써 식생의 영향을 고려한 모의를 수행하였고 단일 조도계수를 적용한 모의결과와 비교 분석을 실시하였다.
4. 분석결과 식생을 고려한 계획 방류량을 적용하였을 경우, 19번, 20번 단면에서 유수가 제방을 월류하는 것으로 모의되었고 최대 방류량시 댐 직하류 구간인 최상류와 최하류단을 제외하고 거의 모든 구간에서 제방월류가 발생하는 것으로 모의되었다.
5. 식생유무에 따른 수위차이는 각 단면별로 상이하게 나타났으며 만족이 끝나고 하중도로 진입하기 전의 No.9단면

주변에서 좌측제방에서 월류가 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다.

6. 이러한 분석결과를 바탕으로 향후 식생의 밀도 및 식생의 형상, 그리고 식생의 잠김 등을 고려한 보다 상세한 모의를 수행하여 홍수기시 하도의 통수능에 대한 보다 더 정확한 예측을 하고 최근 문체시 되고 있는 수변식생에 대한 하도의 영향을 판단하고 적절한 관리 방안을 수립할 수 있을 것이다.

참고문헌

건설교통부(2002) 북한강수계 하천정비기본계획(보완).
김지성, 김극수, 김원, 노준우, 김호준(2009) 소양강댐 하류구간 자생 수목군에 의한 흐름저항 영향 평가. **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회,
우효섭(2001) 하천수리학, 청문각.
윤세의(1996) 하천 식수의 수리학, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제2호, pp. 27-38.
장창래(2006) 하천의 지형변동과 식생, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제39권, 제12호, pp. 52-58.
최성욱(1997) 식생을 고려한 개수로 흐름에서의 경계층이론, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 62-65.
최성욱, 윤병만, 우효섭, 조강현(2004) 댐 건설에 의한 유황 변화에 따른 하류 하도에서 하천지형학적 변화 및 식생피복의 변화: 황강 합천댐 사례, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제1호, pp. 55-66.
Andrews, E.D. (1984) Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 95, pp. 371-378.
Chow, V.T. (1959) *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, NY.
Committee on Hydromechanics (1963) Friction factors in open channels, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 89, No. HY2, pp. 97-143.
Dixon, M.D. and Turner, M.G. (2006) Regulated flow regimes on the Wisconsin River, USA, *River Research and Application*, Vol. 22, No. 10, pp. 1057-1083.
Hey, R.D. and Thorne, C.R. (1986), Stable channels with mobile gravel beds, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.

112, pp. 671-689.

Hunag, H.Q. and Nanson, G.C. (1997) Vegetation and channel variation: a case study of four small streams in southeastern Australia, *Geomorphology*, Vol. 18, pp. 237-249.
Hydrology Engineering Center (1998) *HEC-RAS river analysis system user's manual*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
Johnson, W.C. (1994) Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: Patterns and causes, *Ecological Monographs*, Vol. 64, pp. 45-84.
Johnson, W.C., Burgess, R.L., and Keammer, E.R. (1976) Forest overstory vegetation and environment on the Missouri River floodplain in North Dakota, *Ecological Monographs*, Vol. 46, pp. 59-84.
Kamada, M. and Okebe, T. (1998) Vegetation mapping with the aid of low-altitude aerial photography, *Applied Vegetation Science*, Vol. 1, pp. 211-218.
King, I.P. and Norton, W.R. (1978) *Recent applications of RMA's finite element models for two dimensional hydrodynamics and water quality*, in FEWR2: pp. 281-299.
Mahoney, J.M. and Rood, S.B. (1998) Stream flow requirements for cottonwood seedling recruitment in integrative model, *Wetlands*, Vol. 18, No. 4, pp. 634.
Masterman, R. and Thorne, C.R. (1992) Predicting influence of bank vegetation on channel capacity, *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 7.
Rood, S.B., Kalischuk, A.R., and Mahoney, J.M. (1998) Initial cottonwood seedling recruitment following the flood of the century of the Oldman River, Alberta, Canada, *Wetlands*, Vol. 18, No. 4.
Tsujiimoto, T. (1999) Fluvial process in streams with vegetation, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 37, No. 6, pp. 789-803.
Turner, R.M. (1974) Quantitative and historical evidence of vegetation changes along the upper Gila River, Arizona, *USGS Professional Paper* Vol. 655, No. H, pp. 20.
Wu, W. and Wang, S.S.Y. (2004) A Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of flow and sediment transport in open channels with vegetation, *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*, S. J. Bennett and A. Simon(ed.), pp. 267-282, AGU, Washington, D.C.

(접수일: 2009.12.23/심사일: 2010.1.13/심사완료일: 2010.1.13)