

하천규모에 따른 식생모델의 홍수위 검토

Flood Stage Evaluation for Vegetated Models in River Scales

이종석* · 김병찬**

Lee, Jong-Seok · Kim, Byeong-Chan

Abstract

This study aims to evaluate for flood stage on vegetated patterns by clearance space rate (CSR) using the numerical models divided into large, medium and small river in river scales with watershed area or design flood discharge. Using the HEC-RAS (1D) and RMA-2 (2D) numerical models, evaluated results of the design flood stages before vegetated modeling of these rivers which CSR in the 1D are obtained over 100% at all points in large river and medium river of except upper part 2 sections, but small river is showed about average 46.0%. It is judge that evaluated results in the 2D are obtained average 101.5% in large river, 96.7% in medium river, 71.1% in small, respectively and because of 1D mainly used to formulate of the river's master plan. However, after vegetated modeling, CSR in case of 1D showed with 91.8% in large river, 74.2% and 38.3% in medium and small rivers, respectively and 2D showed with 95.5% in large river, 86.72 and 37.0% in medium and small rivers, respectively. It is estimate that evaluated results using the 2 numerical models by the vegetated modeling are less affected the CSR for large river in a large area more than the cross section area in medium and small rivers.

Keywords : flood stage evaluation, vegetated models, clearance space rate(CSR), river scales, numerical models

요 지

본 연구는 하천의 유역면적 또는 계획홍수량에 따라 하천 규모를 대·중·소하천으로 구분하고, 이들 하천에 대한 식생모델을 구축하여 수치모형을 이용해 제방고 여유율(CSR)을 기준으로 홍수위를 검토하였다. 식생모델 구축전 1차원 HEC-RAS와 2차원 RMA-2 모형을 이용하여 분석한 결과와 기본계획홍수위와 비교한 결과, 1차원의 경우 제방고 여유율은 대하천 모든 단면과 중하천 상류부 2개 단면 외에는 100% 이상이었으나, 소하천은 평균 46.0% 정도로 나타났다. 2차원 대하천의 경우는 평균 101.5%, 중하천은 96.7%, 소하천은 평균 71.1%로 나타났는데, 이는 하천기본계획수립 시 주로 1차원 모형을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 식생모델 적용 시 1차원에서는 대하천의 경우 평균 제방고 여유율은 91.8%, 중·소하천은 각각 74.2%, 38.3%로 나타났고, 2차원에서 대하천은 95.5%, 중·소하천은 각각 86.7%, 37.0%로 나타났다. 이는 대하천이 중·소하천 보다 유수단면적이 커 식생모델 적용 시 제방고 여유율의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 홍수위 검토, 식생모델, 제방고 여유율(CSR), 하천규모, 수치모형

1. 서 론

산업화와 도시화 이전인 1960년대 우리나라 대부분의 하천은 자연상태에 가까운 자연하천이었다. 그 후 급속한 도시·산업화와 함께 이들 하천들은 이수과 치수의 하천재해 방재목적으로 정비되었다. 1970년대에는 도시 소하천을 대상으로 하천복개가 이루어졌고, 1980년대에는 도시과밀화와 교통문제의 대두로 하천부지를 본래의 하천기능과는 관계없이 주차장이나 하상도로 등으로 전용되었다. 그러다가 1990년대 들어 환경의 중요성이 강조되어 도시하천을 중심으로 하천 환경 개선사업이 시작되면서 저수로의 호안공과 고수부지의 산책로 등 하천공원화가 이루어졌다(권순국 등, 2008; 이종

석, 2010). 근래 들어 하천의 환경기능을 살리기 위해 하천 서식처의 보전과 복원을 위해 자연에 가까운 하천으로 복원 하려는 노력에 힘입어 생태하천으로 변모되고 있다. 그러나 홍수관리 측면에서의 식생은 하천의 흐름저항을 크게 하여 홍수 시 수위를 증가시키는 악영향을 미치기도 한다. 그러므로 식생으로 인해 발생된 흐름저항은 홍수위 안정성에 직접적인 영향을 미치므로 이때의 수리특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

개수로에서의 식생에 의한 흐름변화는 수리실험, 수치모형 그리고 수리실험과 수치모형을 병행하는 방법 등으로 해석할 수 있다. Petryk와 Bosmajian(1975)은 실제로 식생을 하여 운동량방정식을 이용하여 정수식생에 관해 연구하였으며,

*정희원 · 교신저자 · 한밭대학교 토목공학과 교수 (E-mail : ljs96@hanbat.ac.kr)

**한밭대학교 토목공학과 겸임교수 (E-mail : bckim777@naver.com)

Thompson과 Robertson(1976)은 운동량방정식으로부터 유도되는 흐름저항 산정식을 회귀분석에 의해 유도하였다. Kouwen과 Li(1980)는 개수로 실험 장치를 통해 대부분의 절치를 경험에 의존하여 차원해석을 하였고, Darby(1999)는 민감도 분석을 이용하여 식생이 홍수위에 미치는 영향을 분석하였으며, Temple(1999)는 식생이 없는 주수로와 식생이 있는 홍수터의 복합조도를 산정하는 다양한 기법을 제안하고 비교하였다. Stone과 Shen(2002) 및 Yen(2002)은 곧은 식생을 이용, 운동량방정식으로부터 유속산정공식을 유도하여 개수로 흐름의 저항을 연구하였고, Wilson 등(2003)은 수중 유연식물의 형상에 따른 개수로나 흐름, Yuki 등(2005)은 자갈하천의 홍수터와 강기슭 위의 홍수영향, Muscle와 Cruise(2006)은 고정 비잡수 식생에 의한 큰 홍수터내 저항의 함수관계, Vladimir 등(2008)은 소하천내 수초식생에 의한 수리학적 저항에 관한 현장연구를 하였다.

한편, 이준호와 윤세의(2007) 및 양원준과 최성욱(2007)은 수리실험을 통하여 항력가중계수 영향 분석 등 다양한 실험 방법을 이용하여 개수로내 흐름에 대한 영향 분석을 하였다. 하천시설기준에는 인공하천인 경우, 하상재료를 기본항목으로 조도계수 0.016~0.050, 자연하천은 하천 위치와 규모, 분포하고 있는 식생(잡초, 관목), 하상재료에 따라 조도계수 0.018~0.055를 사용하도록 규정하고 있다(한국수자원학회, 2009; 송중근 등, 2009). 다양한 하천식생은 기하학적 형태나 분포특성이 매우 상이하므로 흐름의 영향을 받아 발생하는 형태도 직립, 변형, 요동 등의 형태로 나타나는데, 식생에 의한 연직 2차원 흐름의 영향, 식생에 의한 수평 2차원 흐름의 영향 및 식생높이와 식생밀도를 수심의 함수로 식생의 흐름저항과 연관시킨 식생-밀도법 등이 있다(국토해양부·한국건설기술평가원, 2009).

본 연구에서는 하천의 유역면적 또는 홍수량의 크기에 따라 하천을 대·중·소규모 하천으로 구분하고, 이들 하천규모별로 현장 및 문헌조사를 통해 자연적으로 자생하고 있는 식생들의 종류와 분포밀도 등을 조사·분석하여 통수능에 장애가 되지 않는 현재 상태의 식생분포밀도를 가진 유형별 최적의 하천을 대조하천(reference stream)으로 하였다. 이 대조하천은 식생밀도와 분포상태 등의 조건을 100%로 하고, 분포비율에 따른 조도계수의 상관분석을 통해 하천규모별로 각 1개의 식생모델을 구축하였다. 이렇게 하여 구축된 식생모델은 식생추가로 인한 흐름저항 등의 원인에 의한 홍수위 변화에 따른 수리학적 안정성 확보가 필요하게 된다. 본 연구에서는 금강수계내의 하천을 대상으로 연구구간을 선정하고, 선정된 대·중·소 연구 대상하천의 수로구간에 하천규모에 따라 식생의 종류와 밀도분포를 고려해 식생모델을 구축하였으며, 조도계수는 연직 2차원방법(건설교통부, 2007)으로 산정하였다. 또한 홍수위 검토는 적용된 식생모델에 의한 홍수위 변화분석을 위해 선정된 연구구간의 수리학적 기초 자료는 하천기본계획을 참고하였고, 구체적인 지형정보 확보를 위해서는 수치지도를 이용하였다. 이들 수리학적 특성 자료와 지형정보는 1차원 HEC-RAS와 2차원 SMS의 RMA-2 수치모형을 이용한 제방고 여유율(clearance space rate; CSR)로 홍수위 검토를 수행하는데 기초자료로 활용하였다.

홍수위 검토는 연구대상 하천의 하천기본계획서 상에 제시

된 계획홍수량에 의해 산정된 홍수위를 기준 계획홍수위와 하천설계기준상의 제방 여유고로 정의되는 제방고 여유율(CRS)의 크기로 이루어졌다. 이와 같은 범용 및 상용프로그램을 이용한 연구결과는 자연형 하천의 식생복원에 관한 실무적 측면에서 식생의 밀도 등을 조도계수를 도입해서 해결함으로써 하천복원의 업무현장에 가이드라인으로서 미력하나마 제공할 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

하천규모별 식생모델의 홍수위 검토는 1차원 HEC-RAS와 2차원 SMS의 RMA-2 수치모형을 사용하였으며, 이들 모형의 개념을 간단히 소개하면 다음과 같다.

2.1 HEC-RAS 모형

HEC-RAS 모형은 미육군공병단 수문기술센터에서 개발하고 있는 차세대 수문해석 전산프로그램 중 하나이며, 1차원 정상부등류 해석 프로그램으로 널리 사용되었던 HEC-2 모형의 윈도우 버전이다. HEC-RAS 모형은 자연하천이나 인공하천에서 정상류 상태의 1차원 점면류 수면곡선을 계산하기 위해 개발되었다. 이 모형은 상류와 사류 및 혼합류 형상의 수면곡선 계산이 가능하며, 교량이나 암거 등의 하천 구조물로 인한 수면곡선의 변화를 검토하는데 사용되고 있다. 계산절차는 표준측차법에 Manning 공식을 이용하고, 마찰에 의한 손실 및 구조물의 영향분석을 수행할 수 있다. 수리분석은 교량의 수축 및 국부 세굴을 산정하여 도시할 수 있고, 결과는 2차원 또는 3차원적 화면출력이 가능하며, 사용자가 이용하기 편리하도록 구성되어있다(USACE, 2002).

2.2 SMS 모형

SMS 모형은 미국 Brigham Young 대학의 환경모형연구실과 미공병단내의 수로실험국 및 미연방고속철도청 등에서 개발한 프로그램으로 GFGEN, RMA-2, RMA-4, SED-2D 등의 부모형으로 구성되어 있다. 이중 RMA-2 모형은 하천의 흐름 특성을 분석하는데 전후 처리가 가능한 GUI(Graphical User Interface) 형식으로 개발된 수치모형이다. 이는 2차원 수치모형으로 수치 계산량이 많은 복잡한 흐름 문제해결에 효과적으로 적용할 수 있다. 2차원 해석을 위한 지배방정식의 해석기법은 유한차분법 또는 유한요소법이 적용될 수 있는데 유한차분법은 주로 2차원 흐름문제에 대해서 널리 사용되고 있지만 대부분의 연구는 하구부와 항만지역 등에 제한되어 왔다. 유한요소법은 공학적인 구조물 근처의 상세한 흐름특성의 분석, 하천합류부의 연구, 하구부 연구 및 하천의 수로 흐름과 같이 실제적이고 연속적인 형상의 홍수터 지역을 나타내기 위해 복잡한 지형을 효과적으로 해석하는데 유용하다(Brigham Young University, 2000).

2.3 조도계수

하천의 조도계수는 흐름에 대한 하도의 저항정도를 나타내는 것으로 중요한 수리학적 변수 중의 하나이다. 조도계수 산정 방법은 과거로부터 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이는 사용 목적과 적용에 따라 상이하다(건설교통부, 2005).

2.3.1 일반적 계산

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 수위 차이가 최소가 되도록 최적의 조도계수를 산정하는 역산법이다(이신재와 박상우, 2006). Chow(1959)는 여러 가지 실험 자료와 관측 자료로부터 하도의 재료, 식생상태 등을 고려하여 개략적인 조도계수를 추정할 수 있도록 제시하였다. Azmon(1992)은 수집된 자료를 이용하여 Manning 조도계수를 산정하고 그 결과를 비교하였다.

2.3.2 식생영향 계산

식생 설치에 따른 수리학적 영향을 분석하기 위한 계산 방법에는 조도계수 이용 방법, 유속계산 방법, 식생에 의한 저항치 산정 방법, 표준계산방법, 경계면에서의 저항치 계산하는 방법 등이 있다. 식생 및 분할단면에 의한 전단저항 발생은 그 경계층에서 점성을 가진 두 유체간의 마찰저항 때문이고, 수목과 유체사이에서 경계혼합이 발생하는 조건은 수목군이 제방 가까이 있는 경우와 하도의 중간부에 있는 경우 및 저수로와 고수부지 사이 등으로 나누어 계산한다. 개수로 흐름에서의 식생이 흐름에 미치는 영향 등 실험과 이론에 관한 조도계수의 산정방법은 서론에서 언급한바와 같이 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다(건설교통부, 2003). 본 연구에서는 다음에서 소개할 연직 2차원 수리해석 방법을 통해 식생에 의한 조도계수의 변화를 산정하였다.

2.3.3 연직 2차원 계산

건설교통부(2007)는 나무에 의한 수리학적 영향 검토 방법을 제시하였다. 그 중 연직 2차원 수리해석 방법에 의한 부등류 계산은 나무 군락의 영향을 1차원 및 수평 2차원 수리해석에 의한 경우보다 비교적 간단히 계산할 수 있도록 제시하였다. 경계전단력 이용법은 나무군락을 고려한 수리계산, Manning의 조도계수, 단면형상에 의한 흐름저항, 나무군락과 흐름사이의 전단력, 유속분포 조사 등의 순서로 진행된다. 경계전단력 이용법에 쓰이는 식생이 있는 하천의 수리계산은 Manning, Darch-Weisbach, Chezy 유속공식을 이용한다.

분할단면의 한 측면에 나무가 분포하고 나머지 측면에 수목이 없는 경우의 나무가 흐름에 미치는 영향을 고려해야 하는데 이때의 나무가 있는 고수부지의 마찰계수 λ_f 는 다음 식으로 구한다.

$$\lambda_f = 4 \left(\log \frac{V_m}{V_f} \right)^2 \frac{R_f b_f}{h_f b_m} \quad (1)$$

여기서 $b_m = A_m/h_f$ 이고, $R_f = A_f/P_f$ 에서 h_f 는 고수부지 수심이고, 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.

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

$$R_m = \frac{\lambda_m A_m}{\lambda_m P_m + \lambda_f h_f} \quad (3)$$

나무에 의한 저항과 동수반경을 계산하여 나무가 없는 분할단면의 유속을 계산한다. 이 때 분할단면의 한쪽 측면에만 나무가 있을 경우 동수반경, 마찰계수, 유속은 각각 다음 식으로 구한다.

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_f} \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_f}{\lambda_m P_m + \lambda_f h_f}} \quad (5)$$

$$V_m = \sqrt{\frac{8gR_m S}{\lambda}} \quad (6)$$

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

$$R_m = \frac{A_m}{P_m + h_{f1} + h_{f2}} \quad (7)$$

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_m}} = \sqrt{\frac{P_m + h_{f1} + h_{f2}}{\lambda_m P_m + \lambda_{f1} h_{f1} + \lambda_{f2} h_{f2}}} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 이용하여 나무가 있는 단면의 평균유속을 계산하고, 단면적을 곱하여 각 단면의 유량을 구한다. 그리고 각 단면 유량을 합하여 주어진 수위를 갖고 흐름 수 있는 전체유량을 계산한다. 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 수리학적 영향을 파악할 수 있다.

3. 홍수위 검토

본 연구에서의 연구대상 하천은 하천법을 적용받는 하천으로 하천의 유역규모를 기준으로 유역면적 또는 계획홍수량의 크기에 따라 1,000 km² 초과 또는 10,000 m³/s 이상일 때를 대하천(large river), 10~1,000 km² 또는 5,000~10,000 m³/s인 경우를 중하천(medium river)으로 구분하고, 하천법의 적용 또는 준용을 받지 아니하고 소하천정비법의 적용을 받는 1~10 km² 또는 5,000 m³/s 미만인 경우를 소하천(small river)으로 각각 구분하였다(국토해양부·한국건설기술연구원, 2009). 이렇게 구분된 대상하천은 하천규모에 따라 식생의 수종과 밀도를 고려하여 식생모델을 구축하고 홍수위를 검토하였다. 구축된 식생모델의 밀도는 하천규모별로 현장 및 문헌조사를 통해 자연적으로 자생하고 있는 식생들의 종류에 따라 100 m²당의 수종별 식재 분수로 정의하였으며, 밀도별 조도계수의 산정은 '2.3.3 연직 2차원 계산'에서 언급한 것과 같이 국내의 홍수터 수목관리 기술개발(한국건설기술연구원, 2007) 방법을 이용하였다.

또한, 홍수위 검토는 연구대상 하천의 하천기본계획상에 제시된 계획홍수량에 의해 산정된 홍수위를 기준 계획홍수위로 하여 비교·검증하였다. 즉, 본 연구에서 구축한 식생모델로 하천복원이 이루어졌다고 할 때 하천설계기준상의 제

방 여유고에 대한 기준 계획홍수위에서 식생모델 적용 시 수치모형에 의해 산정된 홍수위를 뺀 백분율에 100을 더한 [제방고 여유율=100+(기준 계획홍수위-식생모델 적용 시 수치모형에 의한 홍수위)/제방 여유고]×100%] 값을 제방고 여유율(CSR)로 정의해 홍수위를 검토하였다.

3.1 식생 모델

대하천은 금강 하류구간(국가하천)으로 충남 공주시 옥룡동 공주대교(36° 27' 40", 127° 08' 24")를 중심으로 상하류 약 3 km 구간이며 상류에 신공주대교, 공주대교, 하류에는 신금강대교 등이 위치해 있다. 대상구간은 전체적으로 복단면 형태로 우측 제방으로는 국도가 위치하며, 공주대교와 금강대교 사이의 우측 홍수터에는 체육시설, 비닐하우스 등의 시설이 설치되어 있다(건설교통부, 2002). 중하천은 금강 상류구간(국가하천)으로 충북 영동군 양산면 죽청교(36° 09' 38", 127° 41' 16") 상하류 부근의 약 1 km 구간이다. 중하천은 좌·우안으로 경작지가 발달해있는 전형적인 농촌하천의 형태를 보이고 있다(건설교통부, 2002). 소하천은 용수천 구간(지방하천)으로 충남 공주시 반포면 동학교(36° 21' 55", 127° 15' 26") 부근의 상하류 약 200 m 구간을 선정하였고, 좌·우안에 주거지와 농경지가 형성되어 있다(충청남도, 1990).

그림 1은 하천규모별로 자연상태에 가까운 식생여건을 광범위하게 현장조사·측정을 통해 구축한 식생모델이며, 이는 그림 1(a)와 같이 연구대상 수로구간 중 대하천 2,790 m, 중하천 1,220 m, 소하천 100 m 검사구간의 주수로를 제외한 좌우측수로에 초지류, 관목류, 아교목 및 교목류 100 m² 당 식생종류에 따라 표 1과 같은 밀도를 그림 1(b)~(d)와 같이 분포시켜 구축하였다.

그림 1(b)와 같이 대하천 구간은 평수위 수로폭 약 250

표 1. 각 하천별 식생모델에 사용된 수종과 밀도

하천	수종특성	수종밀도	
		관목	교목
대하천	본수	2.4	0.88
	평균직경(m)	0.080	0.138
중하천	본수	2.6	1.1
	평균직경(m)	0.080	0.199
소하천	본수	2.0	1.4
	평균직경(m)	0.067	0.147

m, 평균수심이 약 3 m이며, 홍수위는 수로폭 420 m, 수심은 약 15 m이다. 연구대상 구간의 식생모델은 표고 20~25 m 지역엔 버드나무, 왕버들, 선버들, 참느릅나무 등 교목 및 아교목이 설치되었다. 또한, 홍수터에 주로 자생하는 관목은 갯버들, 개키버들이고, 우안에 32번 국도가 위치하고 있다. 그림 1(c)는 중하천 구간으로 평수위의 수로폭은 약 80 m, 평균수심이 약 1 m이며, 홍수위는 수로폭 210 m, 수심은 약 7 m이다. 연구대상 구간의 식생모델은 표고 112~120 m 지역엔 버드나무, 산나무, 신나무 등 교목 및 아교목이 설치되었다. 홍수터에 주로 자생하는 관목은 짚래꽃, 개키버들 등이 있다. 그림 1(d)는 소하천 구간으로 평수위의 수로폭은 약 6 m, 평균수심이 약 0.3 m이며, 홍수위는 수로폭 22 m, 수심은 약 2.3 m이다. 연구대상 구간의 표고 121~123 m 지역엔 산나무, 버드나무, 산뽕나무 등 교목 및 아교목이 설치되었다. 홍수터에 주로 자생하는 관목은 갯버들, 선버들, 짚래꽃 등이 있다.

3.2 식생 전후의 홍수위

대·중·소하천의 연구대상 구간에 HEC-RAS와 RMA-2

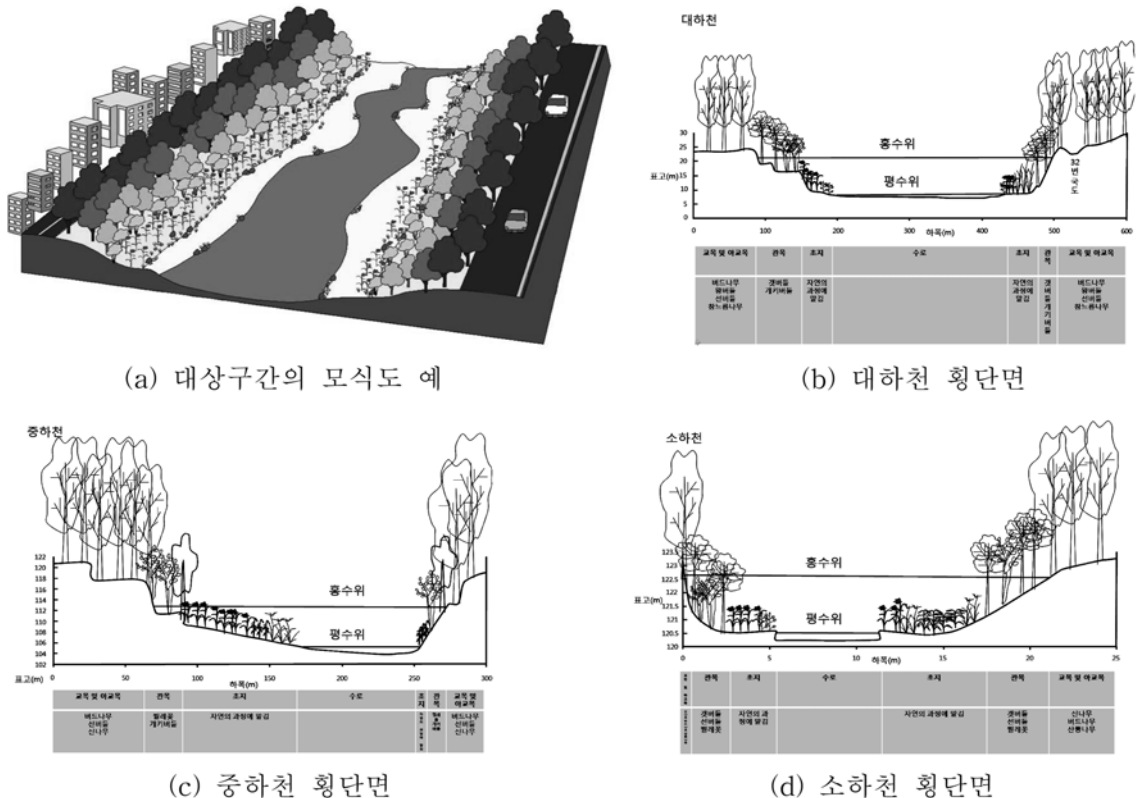


그림 1. 하천규모별 식생모델

모형을 이용하여 식생 전후의 홍수위 변화를 비교·분석하였다. 각 하천별 기점홍수위 단면자료는 하천관리 지리정보 시스템의 자료를 활용하여 지형자료를 구축하였으며, 결측구간이 있는 경우 실측하여 횡단면자료를 구축하였다. 대하천의 기점홍수위 단면은 하폭 약 750 m, 평수위는 8.06 m, 100년 빈도 홍수위는 19.18 m가 사용되었고, 중하천의 기점홍수위 단면은 하폭 약 500 m, 평수위는 105.9 m, 150년 빈도 홍수위는 112.1 m, 소하천의 기점홍수위 단면은 하폭 약 25 m, 평수위는 120.22 m, 100년 빈도 홍수위는 122.82 m가 HEC-RAS와 RMA-2 모형의 경계조건으로 각각 사용되었다.

3.3 HEC-RAS 모형에 의한 홍수위 검토

HEC-RAS 모형에 필요한 입력자료는 표 2와 같이 지형자료와 수문자료 등이 있으며, 그 중 가장 기본적이고 중요한 것은 경계조건, 조도계수, 기점홍수위 및 계획홍수량 등이다.

3.3.1 대하천

표 2의 조도계수를 이용하여 식생 전후의 HEC-RAS 모형에 의한 산정결과는 그림 2와 같이 수위 상승량은 평균 0.34 m로 약 2%정도의 상승폭을 나타냈다. 식생 전후 상류단의 유속분포와 유량을 비교해 보면 조도계수가 높아진 좌우측 수로의 경우 평균유속이 크게 감소하여 통수능이 저하되어 홍수위의 상승을 발생시킨다는 것을 확인할 수 있었다. 수로구간의 각 단면별로 홍수위 검토결과는 표 4와 같다.

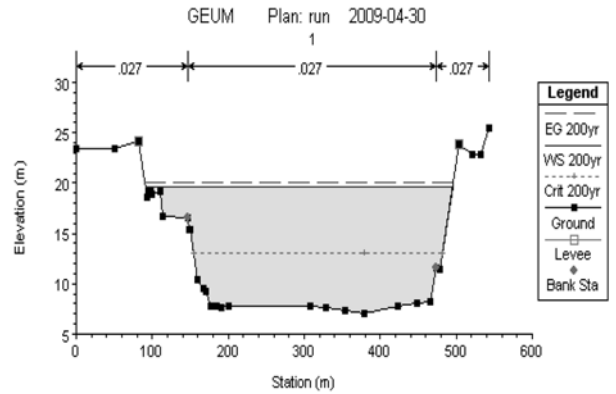
3.3.2 중하천

표 2의 조도계수를 이용하여 식생 전후의 HEC-RAS 모형으로 적용결과는 그림 3과 같이 수위 상승량은 평균 0.47 m의 비교적 큰 차이를 보였는데, 이는 다른 구간보다 식재구간이 비교적 넓게 분포하기 때문인 것으로 판단된다. 수로구간의 각 단면별로 홍수위 검토결과는 표 4와 같이 비교하였다.

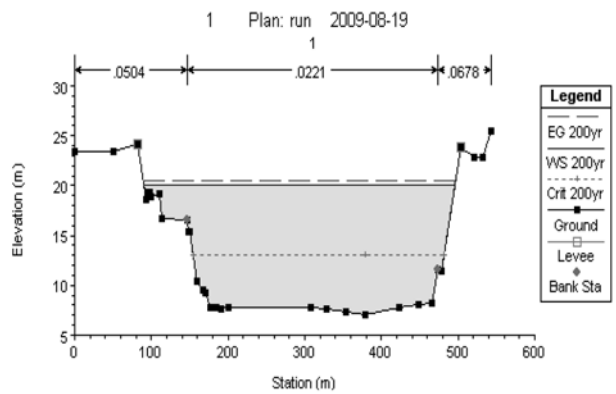
3.3.3 소하천

표 2의 조도계수를 이용하여 식생 전후의 HEC-RAS 모형으로 산정한 결과, 그림 4와 같이 수위 상승량은 평균 0.27 m 정도로 나타났다. 그러나 이 지역은 계획홍수위보다 제방고가 낮은 지역으로 1990년 이후 하천정비기본계획이

미 수립되어 있어 복원모형 계획에 있어서 식생 설치 이전에 홍수위에 대한 치수 대책이 우선적으로 필요한 것으로

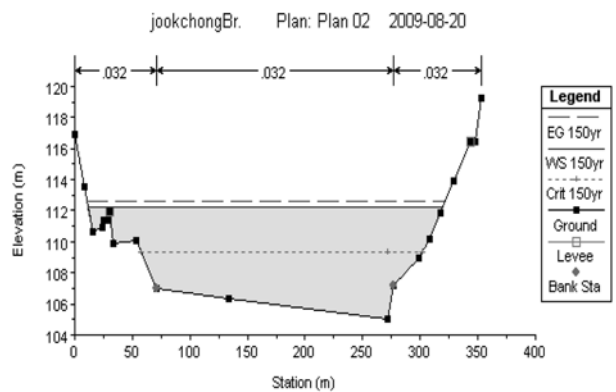


(a) 식생 전

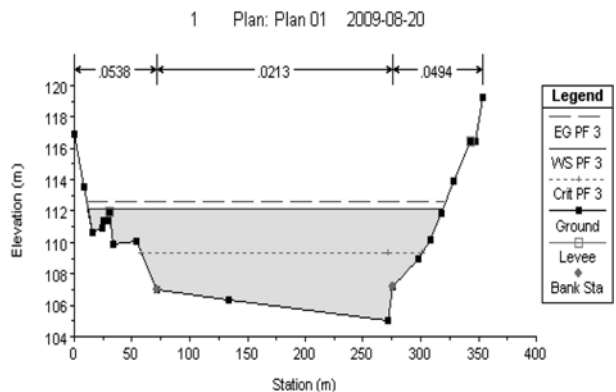


(b) 식생 후

그림 2. 대하천의 식생 전후 홍수위 비교



(a) 식생 전

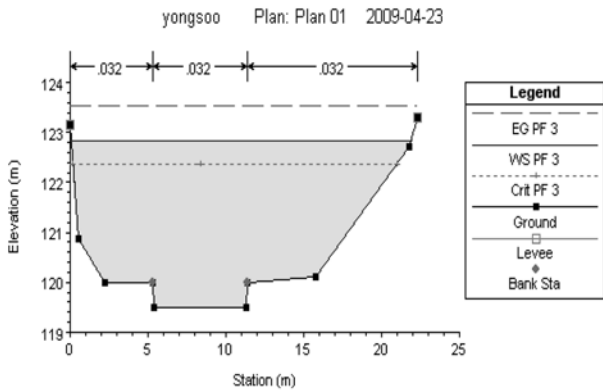


(b) 식생 후

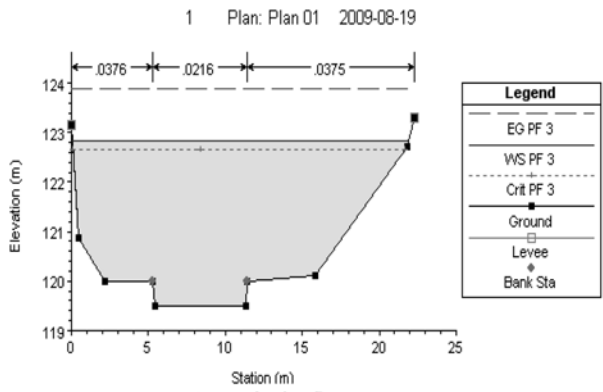
그림 3. 중하천의 식생 전후 홍수위 비교

표 2. HEC-RAS 모형에 사용된 경계조건

수리특성		하천	대하천	중하천	소하천
계획홍수위(EL.m)			19.18	112.10	122.82
계획홍수량(m ³ /s)(빈도)			11,800(100년)	3,960(150년)	195(100년)
하상경사			1/5,000	1/1,191	1/245
조도계수	식생 전		0.0270	0.0320	0.0320
	식생 후	좌수로	0.0540	0.0538	0.0376
		주수로	0.0221	0.0213	0.0216
		우수로	0.0678	0.0494	0.0375



(a) 식생 전



(b) 식생 후

그림 4. 소하천의 식생 전후 홍수위 비교

생각된다. 수로구간의 각 단면별로 홍수위 검토결과는 표 4와 같다.

3.4 RMA-2 모형에 의한 홍수위 검토

3.4.1 유한요소망 구성

각 하천별 지형자료는 하천기본계획의 종·횡단면 자료와 1:5,000 수치지도를 이용하였다. x, y좌표는 한국 TM 중부 원점으로, z좌표는 횡단면자료의 표고값을 사용하여 CAD작업을 통하여 구축하였다. 대상구역내의 유한요소망은 좌·우안 식재구역의 유한요소망을 분리하여 복원모형의 식재구역을 보다 더 정확하게 입력할 수 있게 하였다. 유한요소망은 GFGEN 프로그램을 통해 자동으로 생성하였고 요소편집 과정을 통해 각 하천별로 10회 이상의 산정과정을 통해 수정과 보완을 하여 결과 값의 정확도를 높일 수 있었다.

본 연구에서는 흐름방향이 요소크기를 대·중하천은 20 m로 SMS 모형에서 권장하는 값으로 하였으며, 소하천은 대상구간이 약 100 m정도로 비교적 작기 때문에 요소의 크기를 3 m로 좀 더 세밀하게 구성하였다. 또한 유한요소망은 대하천의 경우 12,041개의 절점과 4,034개의 요소로 구성하고, 요소는 412개의 삼각형 요소와 3,622개의 사각형 요소로 구성하였다. 이는 요소의 크기가 평균 20 m×20 m이다. 중하천의 경우 3,966개의 절점과 1,313개의 요소로 구성하고, 요소는 155개의 삼각형 요소와 1,158개의 사각형 요소로 구성하였고, 요소의 평균크기는 대하천과 같이 20 m×20 m의 크기로 격자망을 구성하였다. 소하천의 경우 1,858개의 절점과 576개의 요소로 구성하고, 요소는 1개의 삼각형 요소와 575개의 사각형 요소로 구성하였다.

표 3. RMA-2 모형에 사용된 경계조건

수리특성	하천	대하천	중하천	소하천
난류확산계수(N·s/m ²)		1,500	1,000	1,000
유량조건 (m ³ /s)		11,800	3,960	195
수위조건 (EL.m)		19.18	112.1	122.82

3.4.2 경계조건의 결정

RMA-2 모형에서는 상류단 경계조건은 유입유량을 사용하고 하류단 경계조건은 수위값을 사용하는데, 본 연구에서는 하천기본계획에 수록된 대상구간의 빈도별 계획홍수량과 계획홍수위를 사용하였다. 또한 대상구간의 흐름특성을 산정하기 위한 조도계수는 HEC-RAS 모형과 같은 값을 사용하여 비교할 수 있도록 하였다. 난류확산계수는 일반적으로 계산과정 중 안정성의 문제가 생기지 않는 지정범위에서 값을 취해야 한다. 그 이유는 난류확산계수가 너무 높으면 안정된 계산이 가능하지만 적합한 흐름 분포를 나타내지 못하는 경향이 있고 너무 낮은 경우에는 계산이 불안정해지기 때문이다.

그러므로 본 연구에서는 SMS 모형에서 권장하는 값 범위 내에서 흐름이 안정될 때까지 값을 변화시켜 표 3의 값을 사용하였다. 식생 후 조도계수 값은 유한요소 소망 구축 시 미리 나눠 놓은 수로구간을 이용하여 단면 좌우 안에 식생 설치구역과 식생이 설치되지 않는 주수로 구역을 구분해 각각 연직 2차원 모형을 적용하였다.

3.4.3 대하천

대하천 대상구간의 RMA-2 모형에 의한 수리특성을 검토한 결과는 그림 5(a), (b)와 같은 유속분포를 보였고, 관측구간의 평균유속을 비교한 결과 식생을 설치하여 조도계수의 값에 변화를 준 좌우안의 유속은 2.67 m/s에서 1.95 m/s로 약 27%정도 감소하였다. 식생을 설치하지 않은 주수로의 유속은 2.78 m/s에서 3.21 m/s로 약 15%정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 식생 전에는 유속 값이 존재하지 않았던 요소에서 식생 후 유속 값이 발생한 모습을 볼 수 있었는데 이는 식생의 영향으로 그 구간까지 수위가 올라온다는 것을 알 수 있다. 그림 5(c), (d)는 RMA-2 모형에서의 식생 후 중형만 수면곡선을 나타낸 것으로 2차원 모형이기 때문에 1차원 HEC-RAS 모형과 달리 하천흐름의 직각방향인 횡단 수면곡선에서 수위차가 약 0.05 m 정도도 약간의 차이가 나타나는 것을 산정할 수 있었다.

3.4.4 중하천

중하천 대상구간의 RMA-2 모형에 의한 수리특성을 검토한 결과는 그림 6(a), (b)와 같은 유속분포를 보였고, 관측구간의 평균유속을 비교한 결과 식생을 설치하여 조도계수의 값에 변화를 준 좌·우안의 유속은 평균 1.46 m/s에서 1.01 m/s로 약 25%정도 감소하였다. 그러나 식생을 설치하지 않은 주수로의 유속은 평균 3.04 m/s에서 3.21 m/s로 약 8%정도 증가하는 것으로 나타났다. 그림 6(c), (d)는 각각 식생 후의 중형만 수면을 나타낸 것으로 HEC-RAS 모형과 달리 하천흐름의 직각방향인 횡단 수면곡선에서 수위차가 약 0.05 m 정도로 나타나는 것을 산정할 수 있었다.

3.4.5 소하천

소하천 대상구간의 RMA-2 모형에 의한 수리특성을 검토한 결과는 그림 7(a), (b)와 같은 유속분포를 보였고, 관측구간의 평균유속을 비교한 결과 식생을 설치하여 조도계수의 값에 변화를 준 좌·우안의 유속은 평균 3.27 m/s에서 3.01 m/s로 감소하였고 식생을 설치하지 않은 주수로의 유속은 3.23 m/s에서 3.29 m/s로 약간 증가하는 것으로 나타났다. 그림 7(c), (d)는 각각 식생 후의 중·횡

단 수면을 나타낸 것으로 HEC-RAS 모형과 달리 하천흐름의 직각방향인 횡단곡선에서 수위차가 나타나는 것으로 산정되었다.

3.5 홍수위 검토결과

1차원 HEC-RAS 및 2차원 RMA-2 수치모형에 의한 연구대상하천의 수로구간에 대한 식생모델의 홍수위 검토결과를 종합하여 표 4 및 그림 8에 나타내었다.

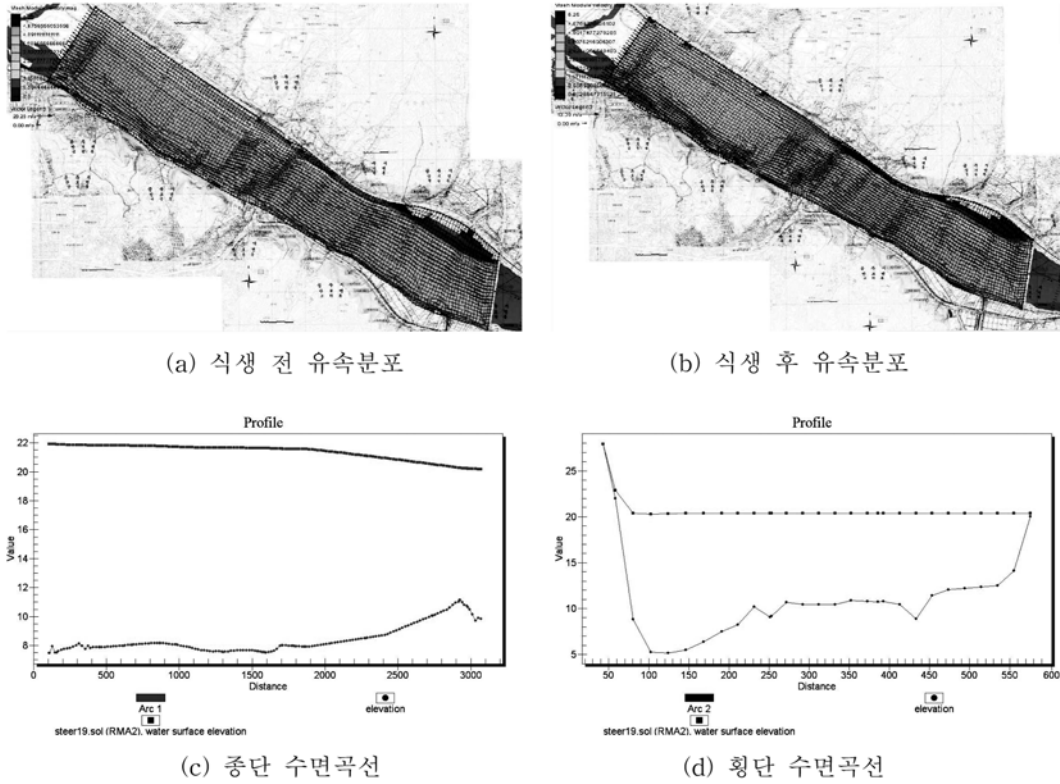


그림 5. 대하천의 RMA-2 모형에 의한 수리특성 검토

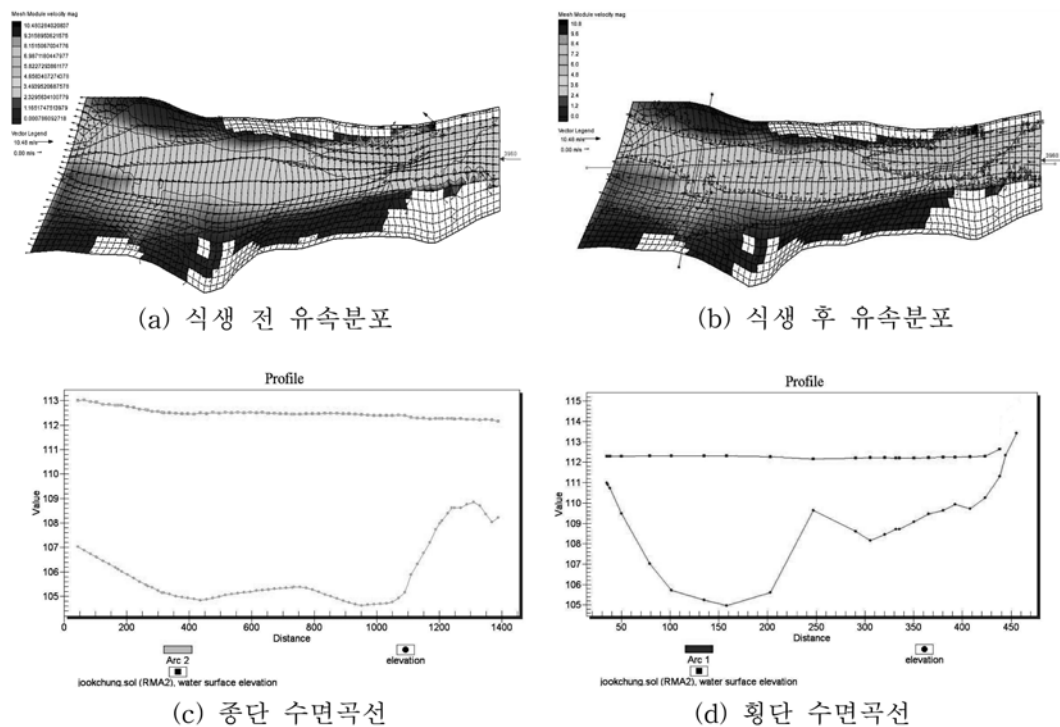
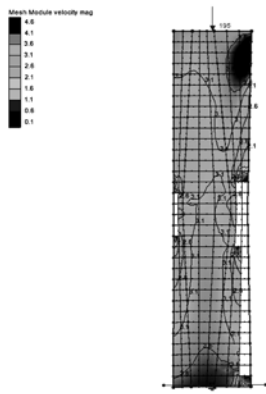
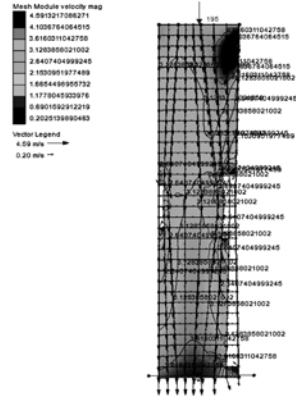


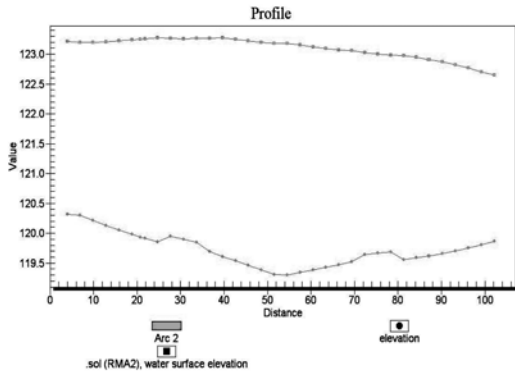
그림 6. 중하천의 RMA-2 모형에 의한 수리특성 검토



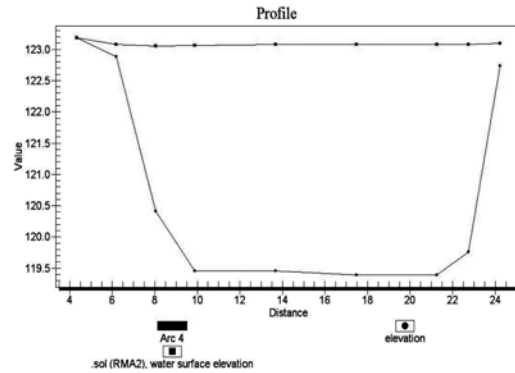
(a) 식생 전 유속분포



(b) 식생 후 유속분포



(c) 종단 수면곡선



(d) 횡단 수면곡선

그림 7. 소하천의 RMA-2 모형에 의한 수리특성 검토

표 4. 홍수위 검토결과

하천	내용	거리(m)	계획홍수위 (단위:EL. m)	HEC-RAS		RMA-2	
				식생 전	식생 후	식생 전	식생 후
대하천 (계획홍수량; 11,800 m ³ /s)		0	19.21	19.21	19.21	19.38	19.38
		430	19.23	19.21	19.28	19.39	19.40
		940	19.28	19.26	19.45	19.41	19.42
		1,450	19.37	19.35	19.79	19.44	19.48
		1,990	19.44	19.40	19.85	19.45	19.50
		2,040	19.57	19.53	20.01	19.43	19.67
		2,440	19.78	19.73	20.16	19.56	19.79
		2,790	19.83	19.61	20.22	19.60	19.95
		평균	19.46	19.38	19.68	19.46	19.57
중하천 (계획홍수량; 3,960 m ³ /s)		0	112.10	112.10	112.32	112.10	112.10
		180	112.10	112.07	112.45	112.13	112.22
		350	112.11	112.17	112.53	112.20	112.41
		570	112.37	112.26	112.66	112.38	112.53
		860	112.51	112.34	112.87	112.52	112.61
		1,020	112.53	112.59	113.26	112.55	112.74
		1,220	112.67	112.76	113.52	112.72	112.89
		평균	112.34	112.33	112.80	112.37	112.50
소하천 (계획홍수량; 196 m ³ /s)		0	122.82	122.82	123.10	122.82	122.82
		50	122.82	123.29	123.21	123.08	123.18
		100	122.82	123.00	123.63	123.10	123.22
		평균	122.82	123.04	123.31	123.00	123.07

표 4에서와 같이 대하천의 수로구간 2,790 m에 대한 홍수위 검토결과는 HEC-RAS 모형에서 식생전의 경우는 모든 단면에서 기본 계획홍수위 보다 작은 값으로 보여 표 5(한국수자원학회, 2009)에 의한 제방고 여유율은 100% 이상으로 나타났으나, 식생모델 적용 후에는 상류단 시점을 제외한 모든 단면에서 최대 97.5~최소 78.0%로 평균 87.8%를 보였다. 중하천에서는 수로구간 1,220 m의 HEC-RAS 모형에서 식생전의 상류부 2개 단면을 제외한 모든 단면에서 기본 계획홍수위 보다 작은 값으로 분석되어 제방고 여유율은 100%에 가까웠으나, 식생모델 적용 후에는 시점부터 모든 단면에서 최대 81.7~최소 29.2%로 평균 74.2%를 보였다. 소하천에서는 수로구간 100 m의 HEC-RAS 모형에서 식생전의 제방고 여유율은 최대 70.0~최소 21.7%, 평균 46.0% 정도로 낮게 나타났으며, 식생모델 적용 후에는 시점을 제외한 모든 단면에서 38.3%로 나타났다.

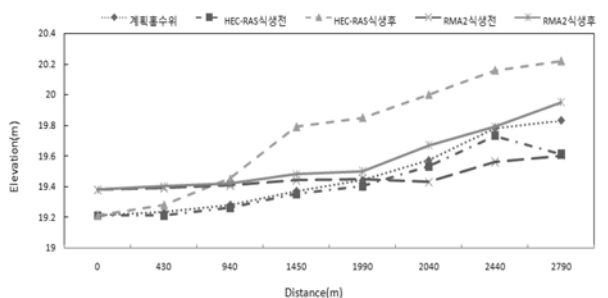
또한, RMA-2 모형에 의한 식생전의 제방고 여유율은 대하천의 경우는 최대 111.5~최소 91.5%로 평균 101.5%, 중

하천은 최대 97.5~최소 95.8%로 평균 96.7%, 소하천은 평균 71.1%로 각각 나타났는데, 이는 기본 계획홍수위 산정 시 주로 사용되고 있는 1차원 HEC-RAS에 의해 산정된 결과이기 때문에 차이가 많이 나는 것으로 판단된다. 식생모델 적용 후에는 모든 단면에서 최대 99.5~최소 91.5%로 평균 95.5%를 나타냈다. 중하천에서는 식생전 하류부 시점 외의 모든 단면에서 최대 99.2~최소 92.5%로 나타났으며, 식생모델 적용 후에는 시점을 제외한 모든 단면에서 최대 91.7~최소 81.7%로 평균 86.7%를 나타냈다. 소하천에서는 식생전의 경우는 시점을 제외한 2개의 단면에서 평균 55%의 제방고 여유율을 보였고, 식생모델 적용 후에는 약 37%로 나타났다.

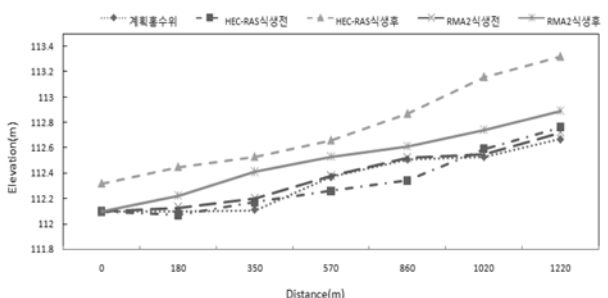
본 연구에서 1, 2차원 2개의 모형을 이용하여 식생모델 적용 시 홍수위를 검토한 결과, 제방고 여유율의 평균치는 대하천의 경우 91.9%로 나타났고, 중하천의 경우는 80.5%, 소하천의 경우는 38.0%로 각각 나타났다. 이와 같은 결과는 대하천의 경우가 중·고하천의 경우보다 우수단면적이 훨씬 커서 식생모델의 적용에 따른 제방고 여유율 변화의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 판단된다.

표 5. 계획홍수량에 대한 여유고

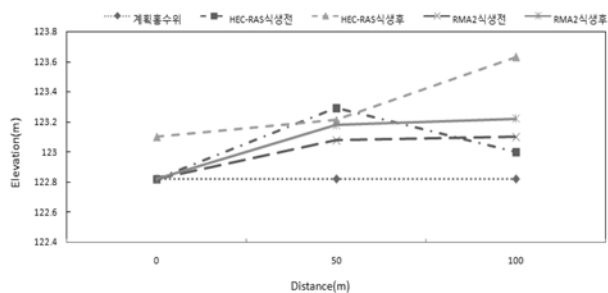
계획홍수량(m ³ /s)	여유고(m)	계획홍수량(m ³ /s)	여유고(m)
200미만	0.6이상	2,000이상~5,000미만	1.2이상
200이상~500미만	0.8이상	5,000이상~10,000미만	1.5이상
500이상~2,000미만	1.0이상	10,000이상	2.0이상



(a) 대하천



(b) 중하천



(c) 소하천

그림 8. 대상하천의 홍수위 검토 결과

4. 결 론

본 연구에서는 금강수계 내의 하천규모별 대·중·소규모 하천을 대상으로 1·2차원 HEC-RAS와 RMA-2 수치모형을 이용하여 대상하천별로 구축된 식생모델의 홍수위 검토를 제방고 여유율을 도입하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 식생 전 1차원 모형에 의한 제방고 여유율 검토 결과, 대하천은 모든 단면에서 100% 이상으로 나타났고, 중하천은 상류부 2개 단면을 제외한 모든 단면에서 100%에 가까웠으며, 소하천은 평균 46.0% 정도로 낮게 나타났다. 2차원 모형에서는 대하천의 경우 평균 101.5%, 중하천은 평균 96.7%, 소하천은 평균 71.1%로 각각 나타났는데, 이는 하천기본계획수립 시 주로 1차원 HEC-RAS 모형이 사용되기 때문에 제방고 여유율의 차이가 많이 나는 것으로 판단된다.
2. 식생모델 적용 후 1차원 모형에 의한 제방고 여유율은 대하천의 경우 상류단 시점을 제외한 모든 단면에서 최대 97.5~최소 78.0%로 평균 87.8%, 중하천은 모든 단면에서 최대 81.7~최소 29.2%로 평균 74.2%, 소하천은 38.3%로 나타났다. 2차원 모형에서는 대하천의 경우 모든 단면에서 최대 99.5~최소 91.5%로 평균 95.5%, 중하천에서는 하류부 시점 외의 모든 단면에서 최대 91.7~최소 81.7%로 평균 86.7%, 소하천은 약 37%로 나타났다. 이와 같이 식생모델 적용 후에 제방고 여유율이 낮은 하류구간 지점은 무제부 또는 기존 제방 높이가 낮은 지점이므로 제방의 축조나 보강이 필요할 것으로 판단된다.
3. 1, 2차원 모형을 이용하여 식생모델 적용 시 홍수위를 검토한 결과, 제방고 여유율의 평균치는 대하천의 경우 91.9%로 나타났고, 중하천의 경우는 80.5%, 소하천의 경우는 38.0%로 각각 나타났다. 이와 같은 결과는 대하천의 경우가 중·소하천의 경우보다 우수단면적이 훨씬 커서

식생모델의 적용에 따른 제방고 여유율 변화의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비 지원(06건설핵심B01 제4-1세부과제; 수리안정성 검토)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부(2002) **금강수계 하천정비기본계획**. 대전지방국토관리청.
건설교통부(2003) **섬진강수계 하천정비기본계획(보완)**, 익산지방국토관리청.
건설교통부(2005) **하천설계기준 · 해설**.
건설교통부(2007) **하천에서 나무심기 및 관리에 관한 기준(안)**. pp. 47-76.
국토해양부, 한국건설기술평가원(2009) **건설기술혁신사업 제3차년도 연차보고서**. 하천계획 · 평가 및 적용관리기법개발.
권순국, 강찬수, 고덕구, 김홍상, 노재경, 박성재, 박승우, 송재우, 심명필, 우효집, 이기준, 최 용(2008) **사람과 물(Humans and Water)**. 농업생명과학연구원 학술총서 10, 서울대학교 출판부, pp. 286-292.
송중근, 김병찬, 이종석(2009) 하천식생 복원모형의 홍수위 분석과 하상변동 예측. 2009년도 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 509-513.
양원준, 최성욱(2007) 침수조건 상태의 유연한 식생이 식재된 개수로 흐름의 횡단면 특성. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제6B호, pp. 641-650.
이신재, 박상우(2006) 수위-유량자료가 부족한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구. **한국수자원학회 논문집**, 제39권 제12호, pp. 985-996.
이종석(2010) **하천공학 및 설계**. 도서출판 새론.
이준호, 윤세의(2007) 개수로에서 식생에 의한 수리특성 변화에 관한 실험적 연구. **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권 제3호, pp. 265-276.
충청남도(1990) **용수천 하천정비기본계획**.
한국건설기술연구원(2007) **홍수터 수목관리 기술개발**. pp. 20-42, p. 82.
한국수자원학회(2009) **하천설계기준 · 해설**.
Azmon, B. (1992) Manning coefficient of roughness-a case study along soreq stream. 1971-1981, *J. of Hydro.*, Elsevier, Vol.

132, pp. 361-377.
Brigham Young University (2000) *SMS (Surfacewater Modeling System) User's Manual*.
Chow, V.T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, NY.
Darby, E.D. (1999) Effect of riparian vegetation of flow resistance and flood potential. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 125, No. 5, pp. 443-454.
Kouwen, N. and Li. R.M. (1980) Biomechanics of vegetative channel linings. *J. of the Hydra. Division, ASCE*, Vol. 106, No. 6, pp. 1085-1103.
Musleh, F.F. and Cruise, J.F. (2006) Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 132, No. 2, pp. 163-171.
Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975) Analysis of flow through vegetation. *J. of the Hydra. Division, ASCE*, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002) Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 128, No. 5, pp. 500-506.
Temple, D.M. (1999) Flow resistance of grass-lined channel bank. *Applied Engrg. in Agriculture, ASAE*, Vol. 15, No. 2, pp. 129-133.
Thompson, G.T. and Roberson, J.A. (1976) A theory of flow resistance for vegetated channels. *Transaction of the ASAE*, Vol. 19, No. 2, pp. 288-293.
USACE (U. S. Army Corps of Engineers) (2002) *HEC-RAS River Analysis System-User's Manual*. USACE, Davis, CA.
Vladimir Nikora, Scott Larned, Nina Nikora, Koustuv Debnath, Glenn Cooper, and Michael Reid (2008) Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: field study. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 134, No. 9, pp. 1,326-1,332.
Wilson, C.A.M.E., Stoesser, T., Bates, P.D., and Pinzen, A.B. (2003) Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 129, No. 11, pp. 847-853.
Yen, B.C. (2002) Open channel flow resistance. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 128, No. 1, pp. 20-39.
Yuji Toda, Syunsuke Ikeda, Kentaro Kumagai and Takeshi Asano (2005) Effects of flood flow on flood plain soil and riparian vegetation in a gravel river. *J. of Hydra. Engrg., ASCE*, Vol. 131, No. 11, pp. 950-960.

(접수일: 2010.7.1/심사일: 2010.7.27/심사완료일: 2010.8.20)