

## 하천식생 복원모형의 홍수위 분석과 하상변동 예측

### Flood Stage Analysis and Prediction of River Bed Change for Stream Corridor Restoration Model with River Vegetation

송중근, 김병찬, 이종석  
한밭대학교

Song Joong-Geun, Kim Byeong-Chan,  
Lee Jong-Seok  
Hanbat National Univ.

#### 요약

현대사회는 하천에서부터 시작되었다고 할 정도로 우리 삶의 중심에 있는 자연의 중요한 일부라고 할 수 있다. 하천은 단순한 치수와 이수뿐만 아니라 다양한 자연 그대로의 환경적 잠재 기능을 복원하는 방향으로 전환되고 있다. 이러한 하천 복원의 필수적 요소는 식생이나 이것은 하천의 흐름저항을 크게 하여 홍수시 수위를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 식생에 따른 조도계수의 변화와 흐름저항으로 인한 수리학적 특성을 이해하는 것은 하천복원에서 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 하천식생 복원모형에서의 홍수위 분석과 하상변동을 예측하고자 한다. 이를 위해 공주대교 상·하류 구간에 HEC-RAS와 RMA-2 모형을 적용하여 홍수위 분석을 실시함과 동시에 SED-2D 모형을 적용하여 하상변동을 예측하였다.

#### Abstract

The modern times is as special as from the river, the river is very important of our life. The importance to preserve the river environment has been issued and the river developing method is being changed to use potential function of nature as well as flood control. Essential element of the river restoration is a vegetation. The flow resistance by vegetation along the river banks is greatly increase the flood stage. Therefore, the flow resistance due to vegetation in the river and roughness coefficient changes to understand the hydraulic characteristics is an important elements in the river restoration. The purpose of this study is to analyze the flood stage and the aspects of riverbed changes due to the corridor restoration with river vegetation. In order to simulate the flood stage and riverbed changes, HEC-RAS, RMA-2, and SED-2D model were applied for the upstream and downstream in study reaches, respectively.

## I. 서론

최근까지 우리는 하천의 이수와 치수기능만을 중심으로 하천을 정비하여 생물이 서식 할 수 있는 생태적 기능, 자정기능과 친수기능, 즉 하천의 이용적 기능만큼 중요한 환경적 기능이 결여된 하천이 늘어나 현재 하천 복원에 대한 관심이 높아지고 곳곳에서 하천복원 사업이 이루어지고 있다. 그러나 하천복원 사업은 서로 상충되는 이용적 기능과 환경적 기능을 모두 고려해야 한다는 어려움이 되고 있다. 특히 하천형태를 자연상태로

되돌렸을 때, 이미 농경지와 거주지로 변해버린 홍수터에 대한 수리 안정성 확보는 하천복원모형을 검증하는데 있어서 매우 중요한 항목이라 할 수 있다. 하지만 지금까지 하천관리의 일환으로 하천구간 내 흐름특성과 하상변동을 분석하고 예측하는 일은 대부분 1차원 모형만을 적용하여 왔다. 그러나 1차원 모형은 단면내의 횡방향 변화를 파악할 수 없으며 하상변동 모의는 하천사행의 진행이나 유사의 횡방향 분포 등의 영향을 고려할 수 없으며, 또한 횡단면 전체가 균일하게 상승 또는 저하하는 것으로 가정하기 때문에 흐름이 급변하는 곳

에 적합하지 않다. 그러므로 하천 단면의 확대 및 축소 구간, 교량구간, 지류 합류구간 그리고 만곡부 구간에 대한 횡방향 흐름특성과 하상변동 양상을 파악하기 위해서는 2차원 모형의 적용이 필요하다[1].

따라서 본 연구의 목적은 대상하천에 HEC-RAS와 SMS를 적용하여 식생 전·후의 홍수위 분석과 하상변동을 예측하는 것이다.

## II. 모형의 기본이론

SMS(Surfacewater Modeling System)는 미국 Brigham Young 대학의 환경모형연구실(Environmental Modeling Research Lab.)과 미공병단(USACE)내의 수로실험국(WES, Water-way Experimental Station), 그리고 미연방고속철도청(FHWA, Federal Highways Administration) 등에서 개발한 프로그램으로서 지속적인 개발을 통해 현재 Ver.10.0이 상용화되고 있다. 또한 SMS는 GFGEN, RMA2, RMA4, SED2D 등으로 구성되어 있으며 하천의 흐름을 분석하는데 전후 처리가 가능하게 하는 GUI(Graphical User Interface)형식으로 개발된 수리 모형이다. GFGEN 모형은 ASCII 지형파일을 RMA2 모형에서 사용가능한 binary file의 형태로 전환시켜주는 일종의 전처리기로 유한요소망을 구성하는 격점(node) 및 요소(element)에 관한 정보를 읽어 들여 오류 확인 및 계산 소요시간단축을 위해 격점 번호를 다시 부여한다. RMA2 모형은 RMA(Resource Management Associates)에 의해 개발된 2차원 유한요소 모형으로 모형의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 수심방향으로 적분함으로써 유도된 2차원 천수방정식을 Galerkin의 가중잔차법(weighted residual method)에 의하여 하천의 흐름특성을 분석한다. 2차원 천수방정식의 지배방정식은 식 (1)의 연속방정식과 식 (2) 및 식 (3)의 운동량방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $x, y$ 는 좌표축이며,  $t$ 는 시간(sec),  $g$ 는 중력 가속도( $m/sec^2$ ),  $u, v$ 는 각각  $x, y$ 방향의 수심 평균유속( $m/sec$ ),  $\rho$ 는 물의밀도( $kg/m^3$ ),  $h$ 는 수심(m),  $a$ 는 하상표고(m),  $\tau_x, \tau_y$ 는 각각  $x, y$ 방향으로 작용하는 마찰응력( $N/m^2$ ),  $\epsilon$ 는 확산계수( $N \cdot sec/m^2$ )이다.

SED2D 모형은 WES에 의해 개발된 STUD-H프로그램의 개정판으로 모래하상과 점토질하상에 대하여 하상변동과 부유사농도를 분석할 수 있는 모형이다. 그러나 한가지의 대표유효입경만을 고려할 수 있으므로 여러가지의 입경을 갖는 경우에는 여러 입경에 따라 각각 모의를 수행하여야 한다. 또한, SED2D 모형은 자체적으로 유속을 계산하지 못하므로 RMA2와 연계하여 유사 이동 모의를 하여야 한다. SED2D는 이송-확산 방정식으로 부유사농도와 하상변화를 모의하고 정류(steady flow)뿐만 아니라 부정류(unsteady flow)의 모의가 가능하며, 이송-확산 방정식은 식 (4)와 같다[2].

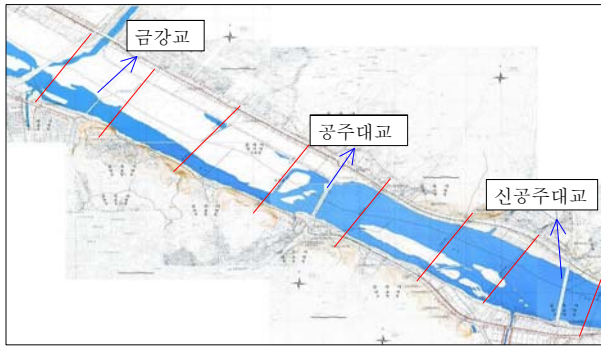
$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \alpha_1 C + \alpha_2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $C$ 는 농도( $kg/m^3$ ),  $t$ 는 시간(sec),  $u$ 는  $x$ 방향 유속( $m/sec$ ),  $v$ 는  $y$ 방향 유속( $m/sec$ ),  $x$ 는 주 흐름방향(m),  $D_x$ 는  $x$ 방향의 유효확산계수( $m^2/sec$ ),  $D_y$ 는  $y$ 방향의 유효확산계수( $m^2/sec$ ),  $\alpha_1$ 는 하상제원에 대한 계수( $1/sec$ ),  $\alpha_2$ 는 하상제원에 대한 평형농도( $kg/m^3 / sec$ )이다[1].

## III. 2차원 수치모형의 적용

### 1. 대상구역

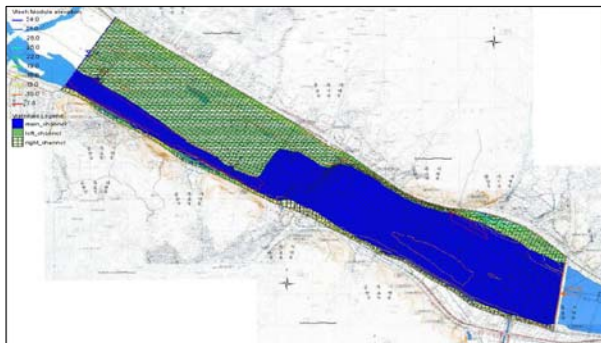
본 연구의 대상구간은 그림 1과 같이 공주대교 상·하류구간인 신공주대교(No.88+030)에서 금강교(No.85+220)까지 약 3km구간이다.



▶▶ 그림 1. 대상구간

### 2. 지형자료의 구성

SMS의 지형자료는 금강수계 하천정비기본계획의 종·횡단면 자료와 1:5,000 수치지도를 이용하여 x, y 좌표는 Korea TM 중부원점으로, z좌표는 횡단면자료의 표고값을 사용하여 CAD작업을 통하여 구축하였다[2]. 대상구역내의 유한요소망(mesh)은 12,041개의 절점과 4,034개의 요소로 구성되며, 요소는 412개의 삼각형 요소와 3,622개의 사각형 요소로 구성하였고 좌·우안 식재구역의 유한요소망을 분리하여 식재 후의 변화된 조도 값 입력을 가능하게 하였다. 유한요소망은 프로그램에서 자동으로 생성되는데 분석자의 수작업에 의한 mesh 편집과정을 통해 모의과정에서 수차례 수정과 보완을 한다면 결과 값의 정확도를 높일 수 있다.



▶▶ 그림 2. 유한요소망 생성

### 3. RMA2 분석

RMA2 모형에서 상류단 경계조건은 유입유량을 사용하고 하류단 경계조건은 수위값을 사용하는데, 본 연구에서는 금강수계 하천정비기본계획[2]에 수록된 대상구간의 100년 빈도 계획홍수위(11,800m<sup>3</sup>/sec)와 계획홍수위(EL.19.18m)를 사용하였다. 대상구간의 흐름특성을 모의하기 위한 1차원 HEC-RAS와 2차원 RMA2에 사용되는 조도계수 또한 기본계획에서 제시한 실측자료인 0.027을 일괄적으로 적용하였다. 난류교환계수의 산정은 일반적으로 계산과정 중 안정성의 문제가 생기지 않는 범위에서 낮은 값을 취해야 한다. 그 이유는 난류교환계수가 너무 높으면 안정된 계산이 가능하지만 적합한 흐름 분포를 나타내지 못하는 경향이 있고 너무 낮은 경우에는 계산이 불안정해지기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 SMS에서 권장하는 값 범위 내에서 흐름이 안정 될 때까지 값을 변화시켜 적용한 결과 좌·우수로에는 1,500N·sec/m<sup>2</sup>, 주수로에는 1,000N·sec/m<sup>2</sup>으로 결정하였다.

### 4. SED2D 분석

대상하천의 하상변화를 알아보기 위해 2차원 하상변동 모형인 SED2D 모형을 적용하였다. SED2D 모형의 경계조건인 부유사 농도는 국가수자원관리종합정보시스템의 공주관측소 유사량 실측성과자료를 이용하여 0.25kg/m<sup>3</sup>로 산정하였다. 대표입경은 부유사 농도와 함께 하상변동을 모의함에 있어 중요한 입력 자료로서, 본 연구에서는 금강수계 하천정비기본계획[3]에 수록된 하상토 입도분포를 이용하여 대표입경(D<sub>50</sub>) 1.7mm로 산정하였다. 유사확산계수는 사용자 지침서에 수록된 값을 바탕으로 100m<sup>2</sup>/sec를 사용하였다.

부유사에 대한 침강속도는 식 (4)의 Gibbs의 경험식을 사용하여 계산된 0.242m/sec를 사용하였다.

$$\omega = \frac{-6\mu + \sqrt{2/3\gamma(\rho_s - \rho)D^2D_g + 36\mu^2}}{\rho D_g} \quad (4)$$

여기서 D<sub>g</sub>(cm)= 0.02322 + 0.1488D 이고, ω는 침강속도(cm/sec), D는 입자 직경(cm), ρ는 밀도(g/cm<sup>3</sup>), μ는 점성계수(g/m·sec)이다. 이송가능한 모래크기는

금강수계 하천정비기본계획에 수록되어 있는 하상도 입경분포를 참조하여 0.25mm를 사용하였으며, 모래층의 두께는 1.0m를 사용하였다. 그리고 하상 전단응력 공식은 Manning의 전단응력 공식을 사용하였다[3].

그 밖에 SED2D 모형의 입력 자료는 결과 값에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 자료로 다음의 자료들은 사용자 지침서에서 권장하는 값을 사용하였다. 비중은 2.65를 사용하였으며, Crank-Nicholson  $\theta$  값은 0.67, 모래하상의 골재형상계수는 0.67, 특성퇴적길이요소와 특성침식길이요소는 각각 1과 10을 사용하였다. 모의 시간은 24시간으로 하였고 매 30분마다 계산을 실시하였다.

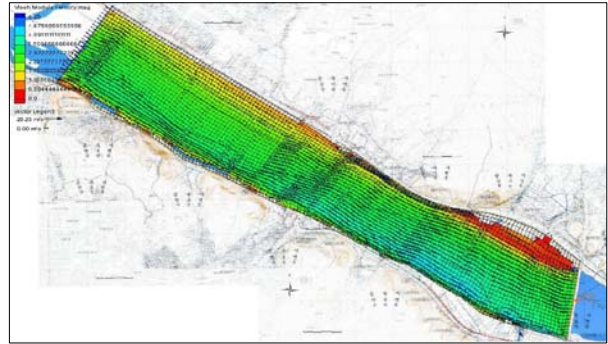
#### 4. 식생 설치 후 조도계수의 산정

본 연구의 대상구간은 우안에는 둔치가 있고 좌·우안의 제방에는 도로가 있는 전형적인 도시하천으로 복단면 수로의 형상을 보이고 있다. 하천 식생에 따른 수리학적 설계기법에서 인공모형식생 실험을 통하여 복단면 수로의 홍수터에 대한 조도계수를 산정 하였는데, 3.5% 밀도의 식재 구역의 경우 그 범위는 0.063~0.085로 산정되었고, 이에 따른 인공모형의 수위 상승량은 교목의 경우에는 최대 4% 관목의 경우에는 최대 6%로 나타났다[4].

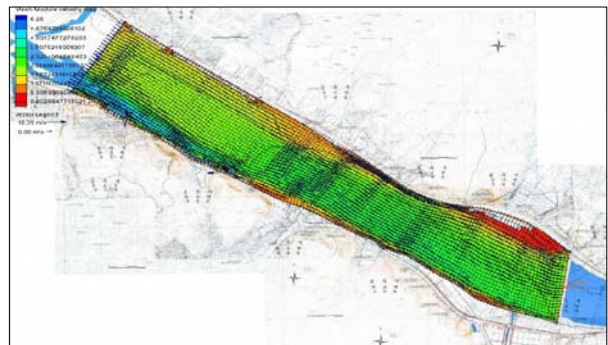
본 연구에서는 식생을 설치하는 홍수터에 대한 조도계수를 모형실험에 의해 산정된 최대값 0.085보다 큰 0.100으로 결정하여 흐름 특성을 분석하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

RMA2 모형으로 대상구간의 흐름특성을 분석한 결과 그림 3, 4와 같은 유속분포를 보였다. 식생을 설치하여 조도계수의 값에 변화를 준 좌·우안의 유속은 2.67m/sec에서 1.95m/sec로 약 27% 정도 감소한 반면, 식생을 설치하지 않은 주수로의 유속은 2.78m/sec에서 3.21m/sec로 약 15% 정도 증가하는 것으로 나타났다.



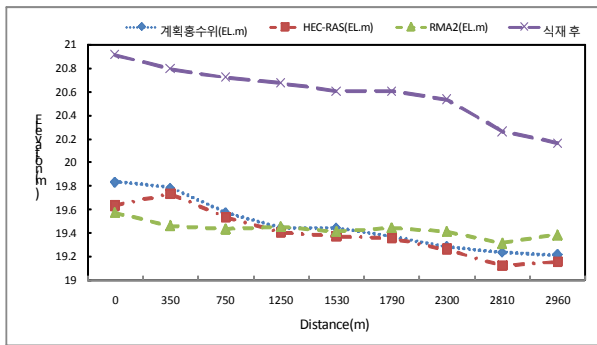
▶▶ 그림 3. 식생 전 유속분포



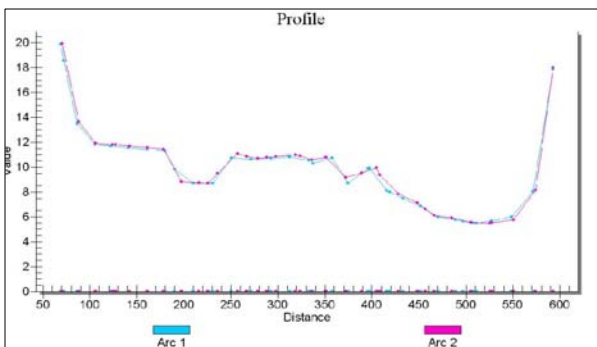
▶▶ 그림 4. 식생 후 유속분포

홍수위의 검토는 그림 5와 같이 1차원 모형인 HEC-RAS와 비교·분석 하였다. 그 결과, 식생 전 HEC-RAS의 모의 결과와 RMA2의 모의 결과가 각 단면별 계획홍수위와 0.05m~0.56m의 차이를 보였으며, 식생 후 RMA2를 이용한 홍수위 검토결과 각 단면별로 평균 1.15m 약 5.3%의 수위 상승을 보이는 것으로 나타났다.

SED2D 모형의 상부 경계조건인 방류량의 부유사농도는 대사 유역의 부유사 농도와 동일하게 하였고 24시간 동안 30분 간격으로 모의를 하였다. 결과적으로는 대상구간 전체적으로 퇴적성 경향이 짙은 것을 모의 할 수 있었다. 퇴적으로 인한 하상의 상승은 -0.058m~최대 0.23m의 상승폭을 보였으며 대부분의 구간이 No.85+070 지점과 같이 큰 폭의 변화는 일어나지 않는 것으로 모의되었다(그림 6참조).



▶▶ 그림 5. 홍수위 산정 비교



▶▶ 그림 6. No.85+070 지점에서의 하상변동 비교

## V. 결론

본 연구는 공주대교 상·하류 구간을 대상으로 SMS와 HEC-RAS를 이용하여 하천의 동수역학적 흐름해석을 실시하였다. 산정된 홍수위를 비교·분석하여 모델의 적합성을 검토하고, 식생 후의 홍수위에 대한 수리적 안정성을 분석하였다.

(1) 1차원 수리모형 HEC-RAS와 달리 2차원 수리 모형은 단면축소부와 같이 하상지형의 변화가 심하게 발생하는 곳에서의 지점 유속 및 수위 분포를 잘 모의할 수 있었다.

(2) 공주대교 하류 구간의 지반고는 EL,15.60m~19.40m로 계획 홍수위 보다 낮고, 우측 제방 도로(국도 32호선)는 EL,18.10m~19.90m로, 본 연구에서 산정한 식생 후의 100년 빈도 홍수위(EL,20.16m~20.91m)보다 낮아 제방을 개선해야 할 것으로 모의되었다.

(3) SED2D 모형을 이용하여 연구대상구간에 100년 빈도 홍수량을 24시간 지속적 유입하여 단기하상변동을 모의한 결과, 침식과 퇴적이  $-0.058\text{m} \sim 0.23\text{m}$ 로 대부분 구간에서 퇴적이 이루어지는 것으로 나타났다. 이는 연구대상구간이 직선화된 도시하천으로 지형의 큰 변화가 없고, 사행부나 만곡부가 없으므로 인해 전체적으로 적은 양의 퇴적이 일어난 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 대상구간 내에 있는 3개의 교량을 무시한 것으로 향후, 교대와 교각부의 세굴이나 퇴적 등 흐름특성 변화 등을 추가로 모의한다면 더욱 더 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

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

## ■ 참고 문헌 ■

- [1] 신광섭, 정상만, 이주현, 송범, “공주대교 상·하류구간에 대한 흐름특성과 하상변동 모의”, 한국방재학회논문집, 제8권, 제2호 pp.119-127, 2008.
- [2] Brigham Young University, SMS(Surfacewater Modeling System) User's Manual, 2000.
- [3] 건설교통부, 대전지방국토관리청, 금강수계 하천정비 기본계획(금강, 갑천, 유등천, 미호천, 논산천, 노성천, 강경천), 2002.
- [4] 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 하천 식생에 따른 수리학적 설계기법, 2006.