

## SMS 모형을 이용한 포천천 유역에서의 장기하상변동 분석

### An Analysis of Long-Term River Bed Changes using Surface-water Modeling System (SMS) Model: A case study of the Pochon stream basin

최민하\* · 이승오\*\* · 안재현\*\*\* · 윤용남\*\*\*\*

Choi, Minha · Lee, Seung Oh · Ahn, Jae Hyun · Yoon, Yong Nam

#### Abstract

More precise estimation of the bed change, primary cause of flood damage, has been recognized significant for designs of levees and other river facilities. In this study, the long-term bed change was examined as the application of the relatively new Surface-water Modeling System (SMS) Model because there has not been broad verification of the model empirically on river of South Korea. This 2-dimensional model was used to examine the bed change of Pochon Stream Basin, a tributary of Imjin River, where heavy rain damages annually occur. First, in order to verify the model, the simulating period was set from 1986 to 1998 because of the existence of the field measurements. Cross sectional field measurements of 1986 were used for the initial condition and output were compared and analyzed with the observed cross sectional data in 1998. As the results of the verification, the comparison in lateral and streamwise bed level between results from the model and the field measurements showed a reasonable agreement except for the some cases of local scours. However, in terms of the quantitative comparison, the change of the bed elevations for each cross section for 1998 was rather underestimated than that of the field measurements.

**Key words** : Flood, Long-term bed changes, 2-dimensional model, SMS

#### 요 지

범람의 주요한 원인 중 하나인 하상변동의 경향을 정확히 예측하고 분석하는 것은 제방의 설계나 하천시설물의 설계에 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 2차원 하상변동 모형인 SMS를 사용하여 해마다 게릴라성 호우로 인해 피해를 입고 있는 임진강의 지류인 포천천 유역에 대해 하상변동을 모의하였다. 지금까지 SMS 모형의 경우 우리나라의 하천구간에 대해 광범위하게 모형의 검증이 되어있지 않으므로 본 연구에서는 대상구간에 대해 86년 실측단면자료를 초기로 하여 장기하상변동을 모의하였으며, 모형의 결과를 98년 실측단면자료와 비교·분석함으로써 모형의 검증을 실시하였다. 모형의 검증 결과 횡방향과 종방향의 하상고 변동의 비교에서 일부 국부적인 하상의 세굴을 제외하고는 SMS 모형의 모의결과가 실측치에 근사함을 알 수 있었다. 하지만, 정량적인 비교에서는 각 단면별로 98년 실측치보다 모형에 의한 계산치가 하상 변동량이 다소 과소로 산정 되었다.

**핵심용어** : 범람, 장기하상변동, 2차원 모형, SMS

#### 1. 서 론

하상변동이란 하천의 일정구간에서 구간의 상류단면으로부터 유입하는 유입토사량과 구간의 하류단면을 통한 유출 토사량과의 차이에 의해 그 구간에 하상상승이나 하상저하가 발생하게 되는 현상을 말한다. 하상변동은 단기적인 측면에서는 하천에서의 취수, 배수의 하천관리에 직접적인 영향을 주며, 장기적인 측면에서는 하천 시설물의 안정, 홍수위, 홍수터와 같이 하천에 미치는 영향이 막대하다고 하겠다.

이러한 하천에서 발생하는 대규모의 하상변동을 예측하는 모형은 일반적으로 1차원 해석이 적용되어 왔는데 이러한 1차원 모형으로 하상변동을 예측할 경우, 하천의 사행의 진행이나 유사의 횡방향 분포는 고려할 수 없다. 또한 하상변동을 계산시 이동상 전체가 균일하게 상승 또는 하강하는 것으로 가정하기 때문에 흐름이 급변하는 곳에는 적용에 무리가 발생한다. 따라서 홍수터와 사주의 형성 및 소멸, 지류 유입부에서의 퇴적 등을 고려해야할 경우에는 2차원 모형의 개발이 필수적이라 하겠다.

\*미국 농무성(USDA-ARS) 수문원격탐사연구실(Hydrology and Remote Sensing Laboratory) Beltsville, MD, USA. 연구원 (E-mail:Minha.Choi@ARS.USDA.GOV)

\*\*정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 전임강사

\*\*\*정회원 · 서경대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\*(주) 삼안건설기술공사 상임고문

기존의 하상변동에 관한 국외의 연구는 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의한 수학적 모형의 개발이 주로 이루어져 왔으며, 미국 공병단에서 개발한 HEC-6 모형이 대표적인 하상변동 프로그램 중의 하나로서 가장 널리 사용되고 있다. '70년대에 들어 1차원 모형으로서 부정류 해석이 가능한 UUWSR모형(Chen과 Simons, 1975)이 개발되었고, '80년대 들어서는 Holly와 Karim(1983)에 의해 IALLUVIAL 모형이 개발되었으며, Yang(1986)에 의해 다지 하천에서의 하상변동 예측이 가능한 BRALLUVIAL 모형이 개발되었다. 그 후 Holly와 Rahuel(1990a, 1990b)에 의해 부정류 해석이 가능한 CHARIMA 모형이 제시되었으며, Park과 Jain(1986)은 하상상승과 하상저하에 관한 수치모형을 제시하였고, Chang과 Hill(1976)은 FLUVIAL-11 모형을 개발한 바 있다. '90년대에 들어 Tingsanchali (1996)은 실험실 연구를 통해 HEC-6 모형의 적용성 검토를 통해 급변부등류의 흐름에서는 하상변동 예측의 정확성이 다소 떨어진다고 보고한 바 있으며, Yang(1998)은 GSTARS 모형을 소개하고 이의 적용성을 검토하였다.

국내의 경우 하상변동에 관한 연구는 외국에 비해 절대적으로 빈약하며, 최근 들어 그 중요성이 부각되고 있는 실정이다. 1990년대 이르러 하상변동에 관한 연구가 활발히 이루어 졌는데 한국건설기술연구원(1991)은 HEC-6 모형을 충주댐하류와 대청댐 하류에 적용하여 모형의 적용성을 검토하였고, 또한 대청댐 하류의 금강에 적용하여 대청댐 축조에 따른 하류하상의 변화를 분석하였다. 김영성(1993)은 MOBED 모형을 금강 하류-대청댐 조정지대에서 공주에 이르는 구간에 대하여 적용하여 하상변동을 예측하였으며, 서일원 등(1995)은 준 2차원 모형인 GSTARS 모형을 금강 대청댐 하류구간과 한강 팔당댐 하류구간에 적용하여 장·단기, 하상변동을 해석하였다. 이재수와 윤용남(1995)은 CHARIMA 모형을 한강 인도교 지점부터 광장교 지점까지 적용하여 장단기간에 걸친 유사의 이동에 의한 하상변동을 모의하였다.

본 연구에서는 2차원 하상변동 모형인 SMS(Surface-water Modeling System) 모형을 사용하여 임진강 유역내 포천천의 하상변동을 모의하였으며, 모형의 검증에 위해 모형의 모의기간을 하상단면자료가 존재하는 '86년부터 '98년까지로 정하고, '86년 단면을 초기조건으로 하여 대상기간동안 모형을 실행시킨 후 '98년 실측단면과의 비교 및 검토를 수행하여 2차원 장기하상변동 모형의 적용성을 살펴보고자 하였다.

## 2. SMS 모형

SMS(Surface-water Modeling System) 모형은 2차원 동수역학적 모형(hydrodynamic modeling)으로서 미국 육군공병단의 WES(Waterways Experiment Station)와 미 연방도로국(U. S. Federal Highway Administration)이 연계하여 Brigham Young University의 Environmental Modeling Research Laboratory(EMRL)에서 개발하였으며, GFGEN 모형, RMA-2 모형, RMA-4 모형, SED-2D 모형 등으로 구성되어 있다. 모형의 간략한 정보는 아래와 같으며 자세한 모형의 설명은 참고문헌에 제시되어 있는 User's manual에 수록되어 있다

(Environmental Modeling Research Laboratory, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d).

### 2.1 GFGEN 모형

아스키 지형파일을 RMA-2에서 사용가능한 2진파일(binary file)의 형태로 바꾸어주는 일종의 전처리기로써, 유한요소망(finite element mesh)을 구성하는 격점(node) 및 요소(element)에 관한 정보를 읽어 들여 오류확인 및 계산 소요시간의 단축을 위해 격점 번호를 다시 매겨주는(renumbering) 기능을 담당한다.

### 2.2 RMA-2 모형

RMA-2 모형은 2차원 수심 평균한 유한요소 수치 모형으로서 2차원 흐름 영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하며, Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한요소의 해를 계산한다. RMA-2 모형의 지배방정식은 식 (1)과 같은 수심 적분한 유체의 연속방정식 및 식 (2)와 (3) 같은 2차원 운동량 방정식이며, 이들 식들은 가중잔차법(weighted residual method)을 이용한 유한요소법에 의해 해석된다. 공간에 대한 적분은 Gaussian 적분에 의하며 시간에 대한 도함수는 비선형 유한 차분 근사치에 의해 계산된다. 이에 대한 해는 완전 음해(fully implicit)이며 연립방정식은 Newton-Raphson 반복법에 의해 해를 구하게 된다. 마찰력은 Manning 방정식의 조도계수나 Chezy 방정식의 평균유속계수로 계산되고, 난류교환계수(혹은 와점성 계수)는 난류의 특성을 정하는데 사용되며, 정상류뿐만 아니라 부정류에서도 모의 가능하다.

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

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{(CMEh^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gvn^2}{(CMEh^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi - 2h\omega u \sin \phi = 0 \quad (3)$$

여기서  $x, y, t$ : 좌표축과 시간,  $g$ : 중력가속도,  $u, v$ :  $x, y$  방향의 수심 평균유속,  $\rho$ : 물의 밀도,  $h$ : 수심,  $a$ : 하상표고,  $\epsilon_{xx}$  =  $x$  방향으로의 법선 난류교환계수,  $\epsilon_{xy}$  =  $x$  방향으로의 접선 난류교환계수,  $\epsilon_{yx}$  =  $y$  방향으로의 접선 난류교환계수,  $\epsilon_{yy}$  =  $y$  방향으로의 법선 난류교환계수,  $n$ : Manning 조도계수,  $CME$ : SI 단위계 일 때 1.0, 영미식 단위계 일 때 1.486,  $\zeta$ : 경험적인 바람 전단응력계수,  $V_a$ : 풍속,  $\Psi$ : 풍향,  $w$ : 지구의 각속도,  $\phi$ : 적용대상 구간의 평균위도

### 2.3 SED-2D 모형

본 연구에서 사용한 SED-2D 모형은 2차원 정상(steady state) 및 동수역학(hydrodynamic)적인 유사이송과 하상변동을 모의할 수 있는 모형으로서 다음과 같은 기본 가정이 적용된다.

- ① 유사이송과정은 기본적으로 침식, 유입, 이송, 퇴적으로 이루어진다.
- ② 유수는 유사의 존재여부에 관계없이 기본적으로 침식, 유입, 이송, 퇴적능력이 있다.
- ③ 하상에서의 유사는 흐름에너지에 대한 힘이 침식에 대한 한계전단응력보다 작으면 움직이지 않는다.
- ④ 침식과 퇴사는 독립적으로 일어나기 때문에 침식률과 이송률이 같으면 모래입자가 움직일지라도 수위의 변화는 없다.
- ⑤ 점착성유사는 전단응력이 퇴적에 대한 한계력을 초과하는 동안 계속 부유 상태로 존재하며, 일반적으로 점착성 유사의 퇴적과 침식은 동시에 일어나지 않는다.
- ⑥ 점착성유사로 이루어진 하상의 구조는 시간의 흐름에 따라 변한다.
- ⑦ 유사이송의 대부분은 부유물이다.

SED-2D의 기본 유한요소 공식은 다음과 같은 중요계산으로 요약할 수 있다.

#### 1) 하상제원을 고려한 이송-확산 방정식

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + a_1 C + a_2 \quad (4)$$

여기서,  $C$ : 농도(kg/m<sup>3</sup>, ppm),  $t$ : 시간(sec),  $u$ : x축 유속(m/sec),  $x$ : 주 흐름방향(m)  $v$ : 축 유속(m/sec),  $y$ : x축에 수직인 방향(m),  $D_x$ : x축 방향의 유효확산계수(m<sup>2</sup>/sec)  $D_y$ : 축 방향의 유효확산계수(m<sup>2</sup>/sec),  $a_1$ : 하상제원(bed source)에 대한 상수(1/sec)  $a_2$ : 하상제원(bed source)의 평형농도부분(kg/m<sup>3</sup>/sec)

#### 2) 하상 제원

하상제원의 형태는 식(5)의 우측부분( $S = a_1 C + a_2$ )으로 나타내며, 모래나 점토에서 침식과 퇴적에 관한 식은 같다. 계수를 계산하는 방법은 유사의 형태나 침식이나 퇴적의 발생여부에 따라 다르다. 예를 들어, 모래 이송의 경우, 하상으로부터의 유사 공급은 흐름의 잠재 이송능력과 하상에서의 유사물질의 존재여부에 의해 제어되며 하상 제원에 관한 식은 다음과 같다.

$$S = \frac{C_{eq} - C}{t_c} \quad (5)$$

여기서,  $S$ : 하상제원,  $C_{eq}$ : 평형농도 (잠재이송),  $C$ : 유사농도,  $t_c$ : 이송에 영향을 미치는 특성시간

특성시간( $t_c$ )은 흐름농도가  $C$ 에서  $C_{eq}$ 까지 변하는데 소요되는 시간으로서 퇴적의 경우 침강속도와 관계가 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$t_c = C_d \frac{h}{v_s} \quad (6)$$

SMS 모형을 이용한 포천천 유역에서의 장기하상변동 분석

여기서,  $C_d$ : 퇴적계수,  $h$ : 수심,  $v_s$ : 침강속도

### 3) 하상 모델

하상제원을 고려한 이송-확산 방정식 (4)에 의해 계산된 유입(sink)/유원(source)이 하상모델에서는 반대로 유원(source)/유입(sink)의 형태로 적용된다. 하상모델에서는 각 시간간격 계산에 대해 Crank-Nicholson 가중치를 사용한다. 다시 말하면, 이전 시간과 현재 시간단계에서의 이송-확산을 식(4)를 이용하여 계산한 후 그 차이만큼 하상에 추가 (add) 혹은 이송 (remove)된다. 만약 하상제원이 증가하여 이송-확산방정식이 이전단계보다 유입(sink)되었다면, 이는 곧 하상모델에서는 이송(remove) 되는 것이다. 모형에서 모래하상은 침식불가의 유한 두께를 가진 저수지로 구성되어 있는 결로 간주되며, 점토하상은 일련의 층으로 구성되어 있다고 간주된다.

## 3. 대상구간 및 자료

### 3.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 임진강 유역 내에 위치한 포천천 유역이며, 포천천은 유로연장 32.0 km<sup>2</sup>, 유역면적 239.55 km<sup>2</sup>인 임진강-한탄강-영평천-포천천으로 이어지는 임진강의 제3지류이다. 포천천은 포천군 소흘읍 무봉리 천보산맥에서 시작하여 북동방향으로 평행하게 흐르며 고모천, 금현천, 우금천, 좌의천, 구읍천 및 명덕천과 우안에서 합류하고 명덕천 합류 후에는 북쪽으로 흐름이 바뀌며 포천군 영중면 양문리에서 영평천과 합류하는 하천으로, 본 연구에서는 영평천 합류점 (No.0)에서 상류방향으로 10.4 km 떨어진 신 신북대교(No.52)에서부터 시작하여 상류로 3.6 km 떨어진 지점(No.70)까지의 구간을 대상구간으로 이용하였다 (그림 1).

### 3.2 입력자료

본 연구에서는 장기하상변동 모의기간을 하천단면 측량자료가 존재하는 '86년에서 '98년까지로 정하였으며, '86년 하천단면을 초기조건으로 하여 지형자료를 구성하고 모형을 실행

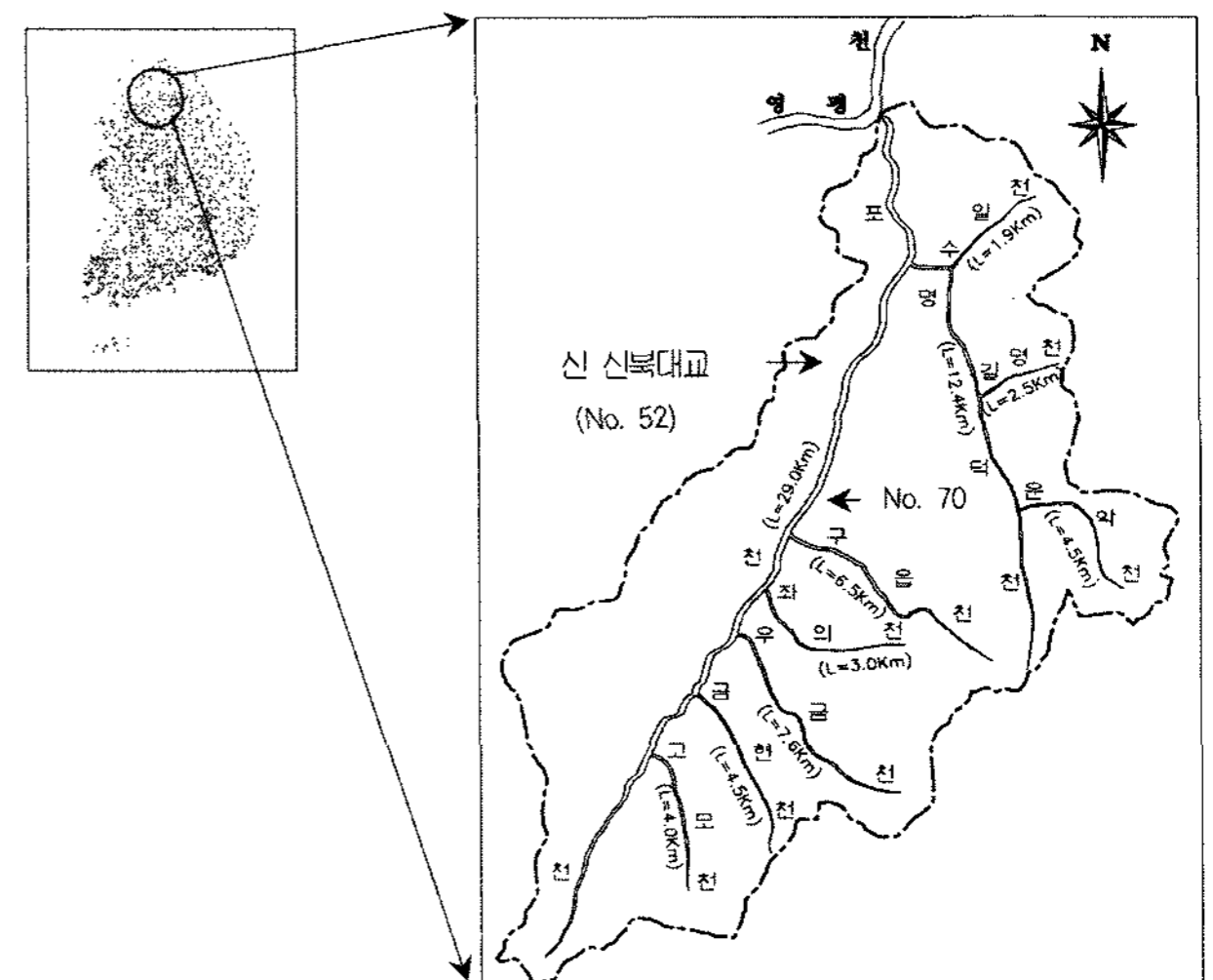


그림 1. 포천천 유역도

행시킨 후 '98년 실측 하천단면 자료와 비교하였다. 모형의 모의를 위해서는 대상구간의 유량 및 유사량 자료가 입력 자료로서 필요하다. 하지만 본 대상구간내의 모의기간 동안에 유량자료가 전무한 실정이고 적용 가능한 수위 관측소 또한 신 신북대교에 설치한 신북수위표의 수위자료가 유일하며 1997년부터 관측을 시작하였다. 따라서 본 연구에서는 TANK, SSARR, NWS-PC 모형중에서 한강과 금강 유역에 적용된 사례가 있으며 자연환경을 고려한 매개변수를 사용하는 NWS-PC 모형을 이용하여 유량자료를 생성하였다. 모형에 필요한 매개변수에는 크게 토양함수 상태를 모의하는 SAC-SMA(Sacramento Soil Moisture Accounting)모형의 매개변수와 유역의 지표 및 지하와 하도에서의 흐름을 추적하는 운동과 추적법의 매개변수가 있으며, SAC-SMA 모형의 매개변수 추정방법은 Armstrong (1978)방법으로 개략토양도, 지형도 등을 이용하여 직접 추정하는 것을 원칙으로 하였다. 운동과 추적모형의 매개변수는 유역의 지배면적 및 사면과 하도에서의 각각의 길이, 경사, 조도계수, 하천형상, 하도폭이며, 하천의 형상과 제방경사는 “포천천 하천정비기본계획(경기도, 1986, 1998)” 참고하였으며, 하천형상은 사다리꼴로, 제방경사는 1/1로 전 유역에 고정하여 사용하였다. 다른 매개변수들은 지형도를 이용하여 소유역 별로 구하였다. 모형의 매개변수 보정을 위해서는 건기와 우기를 모두 포함한 자료가 필요하지만 자료의 미비로 인하여 부득이하게 97년의 6월과 7월 자료만을 사용하였다. 관측치와 계산치의 유출해석결과는 초기의 침투 유출이 토양함수조건의 차이로 인하여 다소 과소 산정된 점을 제외하고는 전반적으로는 양호하게 산정되었다 (RMSE = 4.15 m<sup>3</sup>/sec, Bias = 1.53 m<sup>3</sup>/sec). 전체적인 수문 양상이 잘 일치하고 모형이 유역의 강우사상을 잘 반영하고 있어 매개변수의 보정이 양호하게 결정되었다고 판단하였으며 이로서 연구기간 86~97년까지의 유출을 모의하여 “포천천 하천정비기본계획(경기도, 1998)”에 수록되어 있는 Dawast 모형과 Kajiyama 모형의 결과와 비교하였다. NWS-PC 모형에 의한 장기 유출해석의 결과 평균유출률은 55.66%로 산정되었고 평균유출량은 95.87 · 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yr로 산정되었다. 이는 DAWAST에 의한 유출(89.11 · 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yr)보다는 약간 크

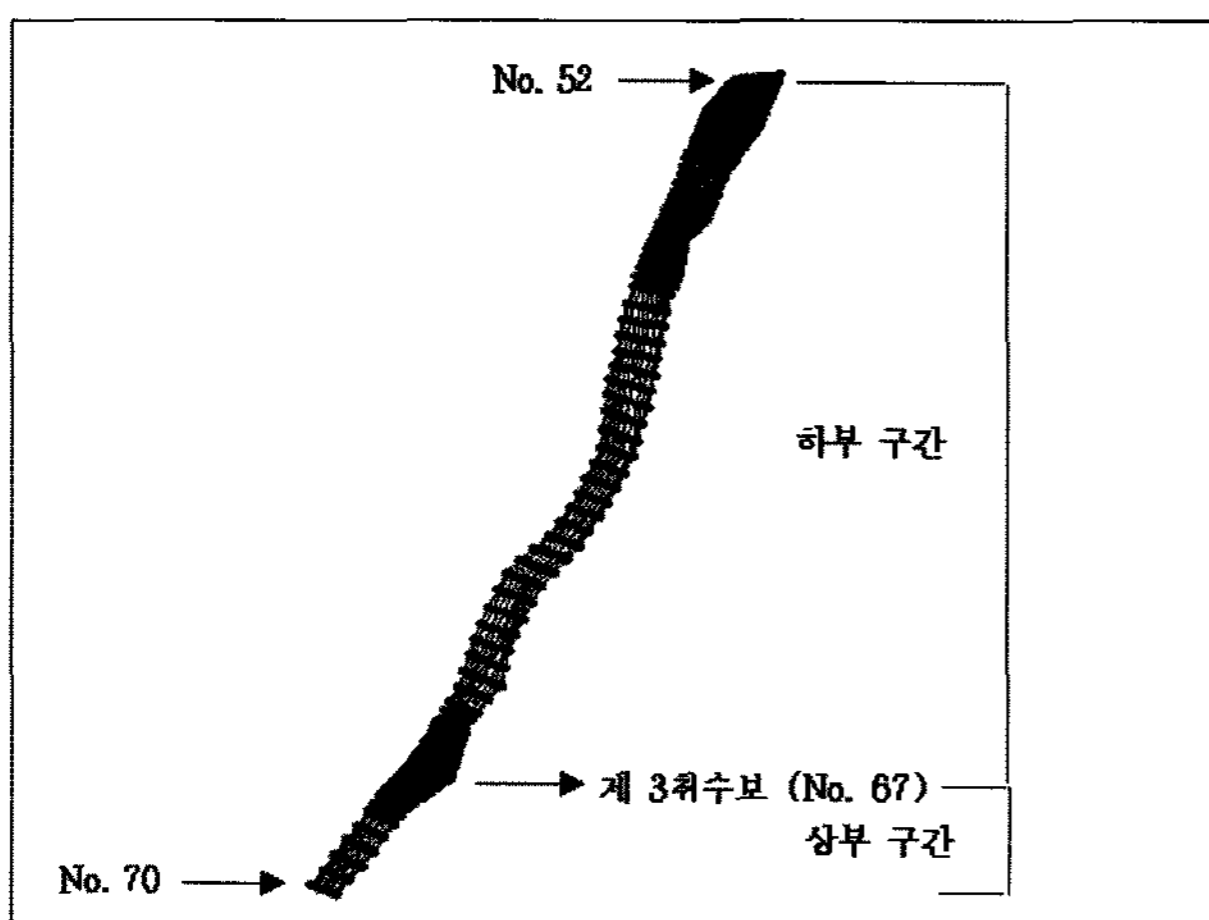


그림 2. 대상구간 유한요소망

게, Kajiyama에 의한 유출(107.29 · 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/yr)보다는 다소 작게 산정된 값으로써, 평균적인 의미에서 적절한 값이 산정된 것으로 판단되었다. 또한, 대상구간의 년평균 유출율이 약 55% 정도인 것을 감안한다면 적절한 유출량이 계산된 것으로 판단된다. 경계조건으로 필요한 수위 자료는 “임진강 유역 홍수피해 원인분석 및 항구대책 수립 용역보고서(건설교통부, 2001)”에 수록된 수위-유량곡선에 유량을 입력하여 수위를 역으로 환산하였으며, 부유사량 자료도 같은 보고서에 수록된 자료를 이용하였다.

대상구간내의 유한요소망은 “포천천 하천정비기본계획(경기도, 1986, 1998)”에 수록된 종·횡단 및 평면도 자료를 이용하여 구성하였으며, 총 11,263개의 노드(node)와 3,659개의 요소(element)가 생성되었다 (그림 2). 또한, SMS모형은 현재까지 흐름의 불연속(flow discontinuity)이 발생하는 콘크리트 구조물을 모의하지 못하므로 제3취수보가 위치하는 지점(No.67)을 기준으로 대상구간을 상부구간과 하부구간으로 나누어 각각의 유한요소망을 구성하였다 (그림 2).

#### 4. 장기하상변동 모의 및 분석

##### 4.1 RMA-2 모의

지형자료를 이용하여 상부와 하부의 유한요소망을 각각 구성한 후 GFGEN을 실행하고, 그 결과인 BIN 파일과 상·하류단 경계조건과 유역의 특성치인 Manning의 조도계수와 난류교환계수 (식 2 와 3)을 입력한 BC 파일을 이용하여 RMA-2를 실행하게 된다 (그림 3). 포천천 신북수위표 지점에서의 현장조사 결과 70.00 m<sup>3</sup>/sec 이하의 유량에서는 부유사 농도가 거의 채취되지 않았으므로 이를 기준유량으로 정하고, 12년간의 유출수문곡선에서 기준유량(70.00 m<sup>3</sup>/sec)이상의 유량을 이용하여 하상변동을 해석을 실시하였다 (표 1). RMA-2의 실행시 사용한 조도계수는 “포천천 하천정비기본계획(경기도, 1986)”에서 적용한 값인 0.033을 사용하였으며, 난류교환계수는 모형의 검정과정을 통해서 결정된 3000 Pascal-sec을 사용하였다. 상부구간에서의 하류경계조건인 제3취수보 지점(No.67)의 수위자료가 없기 때문에 전체구간에 대하여 RMA-2를 실행시켜 제3취수보 지점(No.67)의 수위값을 상부구간의 하류경계조건으로 사용하였다. 또한 HEC-RAS로 실행시킨 수위결과와 비교한 결과 두 모형에 의해 산정된 수위는 근사하게 모의됨을 알 수 있었다 (RMSE = 0.12 EL.m). 유량의 경우는 제3취수보를 기준으로 볼 때 변화가 없으므로 상부구간과 하부구간에 대해 동일하게 적용하였다.

##### 4.2 SED-2D 모의

###### 4.2.1 상부구간

먼저, '87년도의 유량자료를 사용하여 RMA-2 모형을 실행시킨 후 이의 출력파일을 이용하여 SED-2D를 실행시키면 침식과 퇴적으로 인하여 새로운 지형파일 (newgeo 화일)이 생성된다 (그림 3). 그 다음 새롭게 생성된 지형파일 (newgeo 화일)을 사용하여 그 다음해인 '88년도의 하상변동을 해석하며 이후 연도에 대해서도 이의 과정을 반복 하게 된다. 먼

표 1 유량에 대한 부유사 농도

| 일시       | 시간간격 | 유량(cms) | 부유사 농도(ppm) |
|----------|------|---------|-------------|
| '87 7.22 | 24   | 81.82   | 262         |
| '87 8.16 | 48   | 97.37   | 284         |
| '88 7.09 | 24   | 97.44   | 284         |
| '90 6.19 | 24   | 76.77   | 255         |
| '90 7.18 | 48   | 103.67  | 292         |
| '90 7.25 | 72   | 101.46  | 289         |
| '90 9.11 | 96   | 167.30  | 362         |
| '90 9.12 | 120  | 130.22  | 324         |
| '91 7.26 | 24   | 94.51   | 280         |
| '95 7.09 | 24   | 82.04   | 263         |
| '95 8.24 | 48   | 134.33  | 328         |
| '95 8.25 | 72   | 134.73  | 329         |
| '95 8.26 | 96   | 96.74   | 283         |
| '95 8.27 | 120  | 102.08  | 290         |
| '96 7.26 | 24   | 83.17   | 264         |
| '96 7.27 | 48   | 119.40  | 311         |
| '96 7.28 | 72   | 129.26  | 323         |

는 본 연구의 경우 유속의 범위가 0.71~1.42 m/sec의 범위를 나타내므로 100 m<sup>2</sup>/sec을 사용하였다. 대표입경(D<sub>50</sub>)은 2.3 mm 를, 비중은 2.65를 사용하였으며, 침강속도는 보편적으로 사용되어지는 Rubey 식( $v_s = \sqrt{(36v^2/D^2) + (2/3(\gamma_s - \gamma)/\gamma)gD} - 6v/D$ ) 여기서,  $v$ : 동점성계수,  $\gamma_s$ : 사립자의 단위중량,  $\gamma$ : 유체의 단위중량,  $g$ : 중력가속도,  $D$ : 사립자 직경) 으로 계산된 0.155 m/sec를 적용하였다. 그 외의 입력자료 중에서 하상변동에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 자료로 판단된 다음의 자료들은 Manual에서 권장하는 값을 사용하였다. Crank-Nicholson  $\theta$ 값은 디폴트값인 0.67, 모래하상의 골재형상계수는 0.67, 특성퇴적길이요소와 특성침식길이요소는 1과 10을 각각 사용하였다. 이송가능 모래크기의 경우 대상구간에 대한 자료가 없는 관계로 한국건설기술연구원(1990)에서 조사한 한국 하천의 대표적인 부유사 입경분포를 참조하여 0.07 mm를 사용하였다. 또한 하상 전단응력 공식은 Manning의 전단응력 공식을 사용하였다.

4.2.2 하류구간

하류구간에 대한 모형실행 과정은 상부구간과 동일하며 해당연도에 대하여 각각 부정류해석을 실시하였다. RMA-2 모형의 경계조건은 유량의 경우 상부구간에서와 같이 사용하였는데 이는 상부구간과 하부구간 사이에 지류의 유입과 같은 유량의 증가가 발생하지 않으므로 동일하게 적용하였으며, 수위는 신북수위표 지점에서의 수위-유량곡선에서 역으로 환산한 수위자료를 사용하였다.

'87년도에 대한 RMA-2 모의에서 전체구간에서의 모의에서와 동일하게 초기 홍수위를 95 m에서 점차적으로 감소시켜가며 모의하게 되는데 신북수위표 지점의 수위가 84.4 m로 모의되었고 모든 구간에서 비교적 양호한 수위분포도를 나타내었다. 또한 유속은 대략 0.5~1.5 m/sec의 분포를 나타내었으며, No.63 지점과 구 신북대교 지점에서는 비교적 높은 유속을 나타내었는데, 구 신북대교 지점에서의 유속증가는 단면적의 축소로 인해 발생한 것으로 판단된다. RMA-2의 동력학적 결과파일을 이용하여 SED-2D를 실행하였는데 모형에 사용된 모든 입력계수는 상부구간의 모의에 사용한 값과 동일한 값을 사용하였고 부유사농도도 유량이 동일하므로 같은 값을 사용하였다. 이와 같이 '87년도의 입력자료에 의해 하상변동이 된 새로운 지형파일을 이용하여 88년도의 하상변동 모의를 상부구간과 동일하게 모의하였으며, 이후 연도에 대해서도 RMA-2와 SED-2D를 순차적으로 모의하였다.

5. 장기하상변동 분석 결과

SED-2D의 모의결과 상부구간과 하부구간에서 대체로 침식이 우세하였다. 상부구간과 하부구간의 연도별 하상변동고는 표 2와 같다. 12년간의 부유사농도 분포 합계는 상부구간은 1.379~3.299 ppt이며 하부구간은 1.610~9.580 ppt로 산정되었다. 또한 하상변동고는 상부구간은 0.046~0.761 m이며 하부구간은 0.308~1.549 m로 산정되었다. 표 2에서 부유사 농도 분포와 하상변동고를 관찰해보면 같은 경향을 나타내는 것을

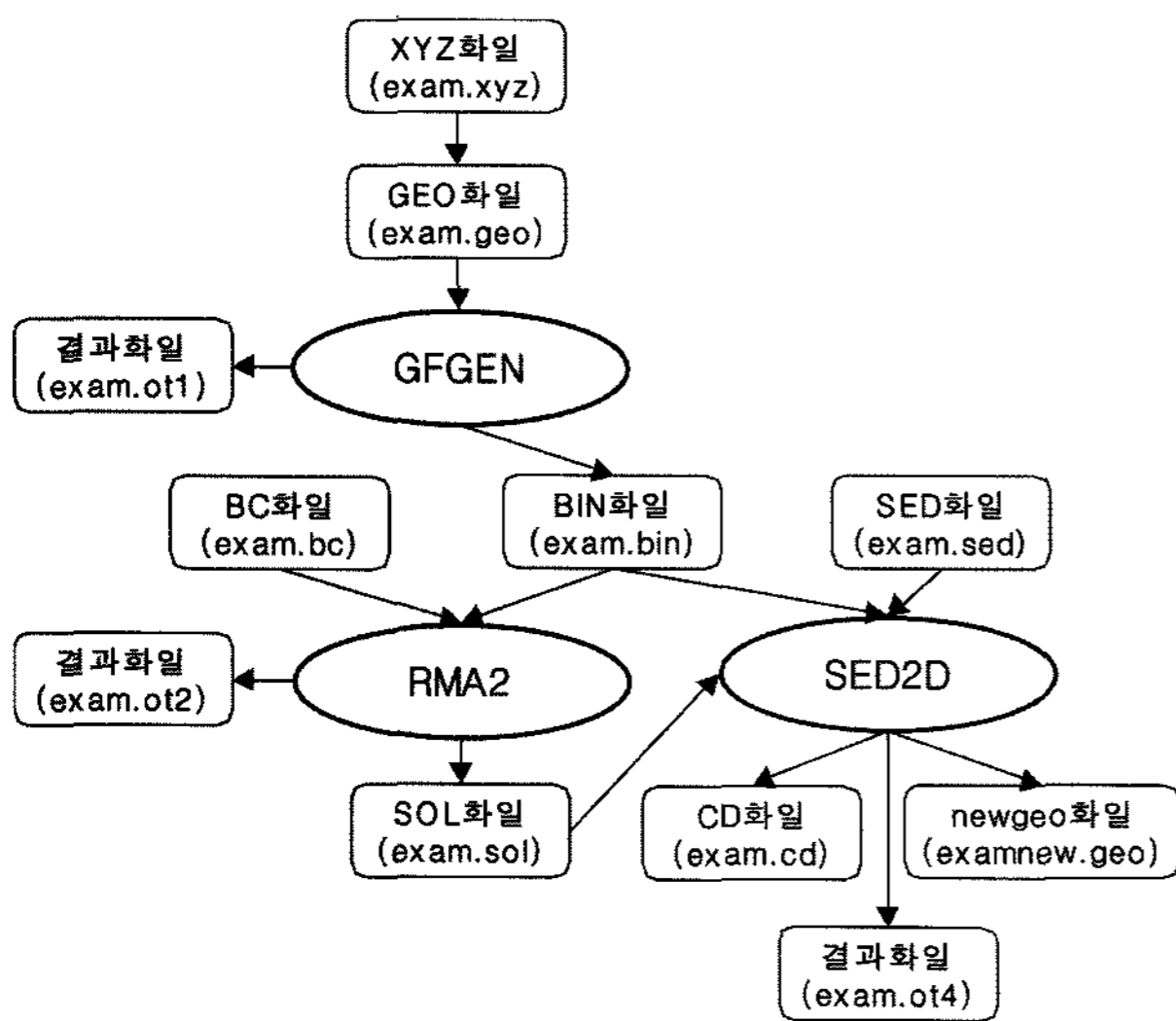


그림 3. SMS 모형의 실행과정

저 1987년 유량과 수위자료를 이용하여 시간간격을 24시간으로 하여 48시간까지 RMA-2를 실행시켰으며, RMA-2의 제3취수보의 수위가 시간간격 48시간에서의 유량 97.37 m<sup>3</sup>/sec일 때 90.74(EL.m)로 전체구간에서의 제3취수보 지점의 수위인 90.71(EL.m)에 거의 근접하였다. 유속은 대략 0.71~1.42 m/sec의 분포를 나타내었다. 홍수류의 흐름방향도 타당하게 모의됨으로서 RMA-2의 모의가 양호하게 실행되었다고 판단하고 이의 출력파일 (sol 파일) 을 이용하여 유사이동 모의를 수행하였다 (그림 3).

위의 자료에서 유량에 따른 부유사 농도는 앞에서 언급한 것처럼 “임진강 유역 홍수피해 원인분석 및 항구대책 수립 용역보고서(건설교통부, 2001)”에 수록된 부유사-유량 자료와의 관계를 회귀 분석 ( $Q_s = 35.82Q^{0.45}$  여기서,  $Q$ : 유량(m<sup>3</sup>/s),  $Q_s$ : 부유사농도 (ppm)) 하여 산정하였다 (표 1). 유사확산계수

표 2. SED-2D 실행결과

| 연도  | 상부구간(No.67~No.70) |              | 하부구간(No.52~No.67) |              |
|-----|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
|     | 부유사농도분포(ppt)      | 하상변동고(m)     | 부유사농도분포(ppt)      | 하상변동고(m)     |
| '87 | 0.260~0.507       | 0.010~-0.090 | 0.280~1.680       | 0.008~-0.149 |
| '88 | 0.279~0.521       | 0.000~-0.050 | 0.260~1.530       | 0.015~-0.085 |
| '90 | 0.150~0.650       | 0.012~-0.231 | 0.270~1.620       | 0.075~-0.425 |
| '91 | 0.276~0.467       | 0.005~-0.045 | 0.260~1.530       | 0.010~-0.090 |
| '95 | 0.150~0.650       | 0.012~-0.220 | 0.270~1.620       | 0.075~-0.425 |
| '96 | 0.264~0.504       | 0.007~-0.125 | 0.270~1.600       | 0.125~-0.375 |
| 합계  | 1.379~3.299       | 0.046~-0.761 | 1.610~9.580       | 0.308~-1.549 |

표 3. 측정별 최심하상고

| 측점(No) | 누가거리(m) | 실측 최심하상고(EL.m) |        | 모의된 최심하상고(EL.m) | 실측 최심하상고 변동(m) | 모의 최심하상고 변동(m) |
|--------|---------|----------------|--------|-----------------|----------------|----------------|
|        |         | '86 실측         | '98 실측 |                 |                |                |
| 52     | 10,400  | 82.12          | 81.48  | 81.81           | -0.64          | -0.31          |
| 신신북대교  | 10,440  | 82.10          | 81.56  | 82.21           | -0.54          | 0.11           |
| 53     | 10,600  | 83.45          | 81.94  | 82.65           | -1.51          | -0.80          |
| 54     | 10,800  | 84.15          | 82.03  | 83.34           | -2.12          | -0.81          |
| 55     | 11,000  | 83.77          | 82.23  | 83.19           | -1.54          | -0.58          |
| 구신북대교  | 11,100  | 83.52          | 82.78  | 82.41           | -0.74          | -1.11          |
| 56     | 11,200  | 84.99          | 82.96  | 83.87           | -2.03          | -1.12          |
| 57     | 11,400  | 84.37          | 83.73  | 84.02           | -0.64          | -0.35          |
| 58     | 11,600  | 84.37          | 84.07  | 84.09           | -0.30          | -0.28          |
| 59     | 11,800  | 84.68          | 84.06  | 84.60           | -0.62          | -0.08          |
| 60     | 12,000  | 85.26          | 83.99  | 83.99           | -1.27          | -1.27          |
| 61     | 12,200  | 85.83          | 84.14  | 84.39           | -1.69          | -1.44          |
| 62     | 12,400  | 86.22          | 84.80  | 84.99           | -1.42          | -1.23          |
| 63     | 12,600  | 86.73          | 85.30  | 85.91           | -1.43          | -0.82          |
| 64     | 12,800  | 87.20          | 86.99  | 86.41           | -0.21          | -0.79          |
| 65     | 13,000  | 87.58          | 86.02  | 86.80           | -1.56          | -0.78          |
| 66     | 13,200  | 87.32          | 87.31  | 86.41           | -0.01          | -0.91          |
| 제3취수보  | 13,400  | 90.11          | 90.11  | 90.11           | -              | -              |
| 68     | 13,600  | 89.67          | 88.94  | 88.97           | -0.73          | -0.70          |
| 69     | 13,800  | 89.64          | 89.34  | 88.99           | -0.30          | -0.65          |
| 70     | 14,000  | 89.69          | 88.61  | 89.14           | -1.08          | -0.55          |
| 평균     |         |                |        |                 | -0.97          | -0.69          |

파악할 수 있다. 부유사농도 분포와 하상변동고는 90년과 95년에 비교적 크게 모의되었으며, 이는 해당연도에 대홍수로 인하여 유출이 크게 발생하였으며, 이로 인하여 비교적 심한 하상변동이 발생한 것으로 판단된다.

실측 최심하상고의 변동량과 SMS 모형에 의해 계산된 최심하상고의 변동량을 표 3에 나타내었으며, 종방향 최심하상고의 변동을 그림 4에 나타내었다. 표 3을 보면 신 신북대교 지점에서 실측최심하상고는 침식 (-0.54 m)되었지만 계산최심하상고는 퇴적(0.11 m)된 것으로 모의되었다. 또한 제3취수보 하류부분에서 실측치는 거의 침식(-0.01 m)되지 않았지만 계산치는 상당한 침식(-0.91 m)이 발생한 것으로 모의하였다.

하지만 신 신북대교 지점과 제 3취수보 하류부분을 제외한 모든 구간에서 실측최심하상고와 계산최심하상고의 변동양상은 거의 일치하며, 그림 4를 보면 하상고 변동의 전체적인 경향에 있어서 SMS 모형의 모의결과가 실측치에 매우 근사함을 알 수 있다. 그림 5에 주요측점별 횡방향 하상 변동고를 도시하였는데 일부 국부적인 하상의 세굴을 제외하고는 하상의 횡방향 변화의 전체적인 경향에 있어서 SMS 모형에 의한 계산치가 실측치와 매우 근접함을 알 수 있다.

각 단면별로 하상변동량을 알아보기 위해 단면별로 침식량과 퇴적량을 구하여 단면과 단면사이의 하상변동량을 양분법을 사용하여 구하였으며 결과는 표 4와 같다. 각 단면별로

98년 실측치보다 모형에 의한 하상변동 계산치가 과소로 산정되었으면 알 수 있다. 이러한 과소양상은 하상변동 모형의 주요한 입력자료인 유량이 NWS-PC 모형에 의해 과소 산정되어 생기는 현상으로 파악된다. 특히, 침투유출량의 과소산정은 하상변동 과소산정의 주요한 원인으로 사료된다. 모형의 또 다른 주요 입력자료인 부유사농도, 유사확산계수, 이송가능모래크기, 모래층 두께, 침강속도의 값들에 대한 모형의 민감도를 파악하기 위해 “포천천 하천정비기본계획(경기도, 1986)”에서 산정한 50년 빈도 홍수량을 채택하여 모형을 구동하였다. 이때 주어진 입력 자료들을 일정비율씩 증가 및 감소(-50%~50%)시켜 가면서 민감도 분석을 실시한 결과, 부유사농도를 기준치 보다 -30%~50% 작은 값을 입력했을 경우 침식이 우세했으며 그 이상으로 입력했을 경우 퇴적이 우세하였다. 또한 이송가능모래크기를 기준치 보다 -30%~50%

작은 값을 입력했을 경우 침식이 우세하였으며 그 이상에서는 퇴적이 우세하였다. 모래층 두께, 침강속도, 유사확산계수의 경우 기준치 이상과 이하의 경우에 모두 퇴적이 우세하였다. 유사확산계수의 경우에는 입력값의 변화와는 상관없이 하상변동고 폭이 일정하였다.

결론적으로, 5개의 입력자료 중 부유사농도, 이송가능 모래크기의 변화에 따라 결과에 상당한 영향을 미침을 알 수 있었으며, 반면에 모래층 두께, 침강속도와 유사확산계수는 결과에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다. 본 연구의 경우, 이송가능 모래크기는 대상구간에 대한 자료의 미비로 한국 하천의 대표값을 사용함으로써, 실측치와의 하상변동 비교에서 상당한 차이를 가져왔을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

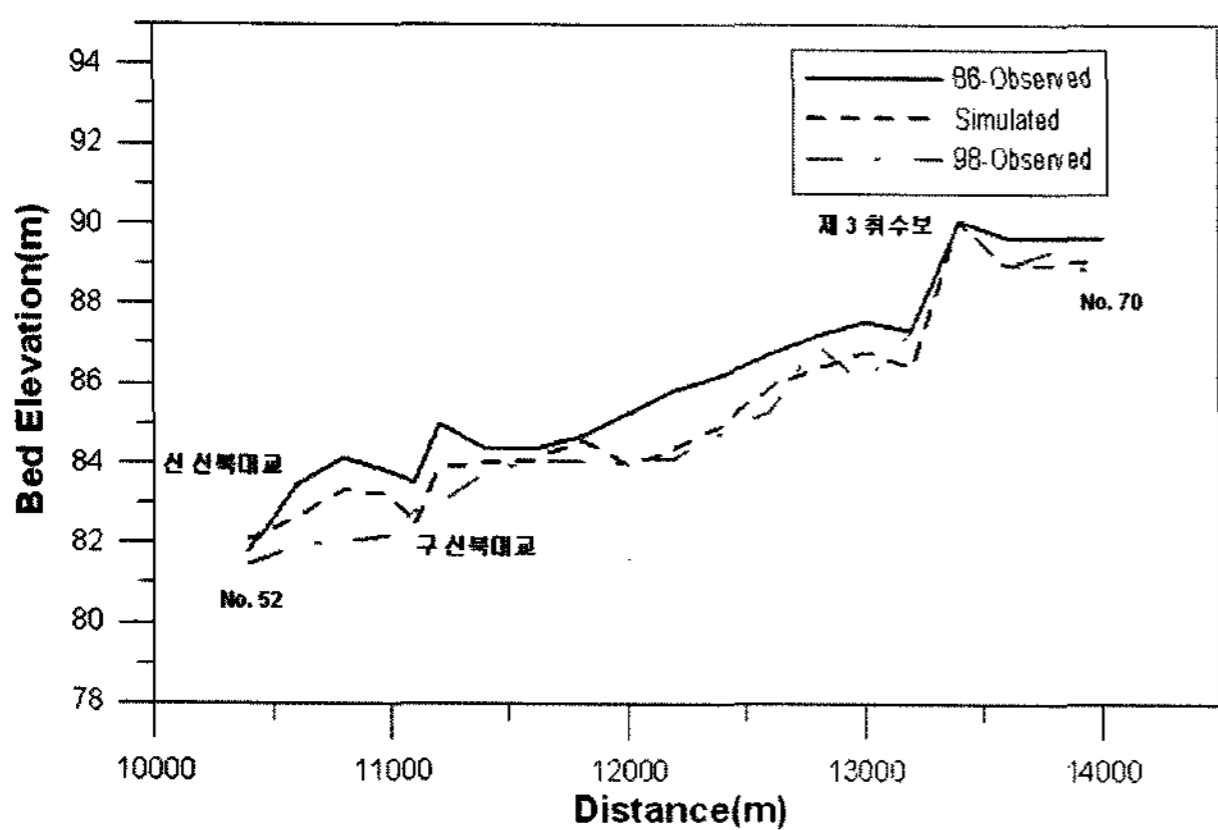


그림 4. 종방향 최심하상고의 변화 비교

임진강의 지류인 포천천 유역의 대상구간(No.52~No.70)에서 장기하상변동을 모의하기 위해 '87년도부터 SED-2D 모형을 실행하였으며, 이의 결과로서 생성된 새로운 지형파일을 그 다음 해인 '88년도에 사용하였고 이후 연도에도 동일하게 적용함으로써 연속적으로 하상변동을 모의하였다.

SED-2D 모형에서 산정된 최종적인 하상변동고는 상부구간은 0.046~0.761m, 하부구간은 0.308~1.549m로 산정되었으며 전체구간에서 침식이 우세하게 발생하였다. 특히, 구선북대교 지점에서 침식이 크게 발생하였다. 모형의 검증에 위해 '98년 실측최심하상고와 모형에서 산정된 최심하상고를 비교해 도시하였는데, 하상고 변동의 전체적인 경향에 있어 모형의 모의결과가 실측치에 근사함을 알 수 있었으며, 국부적으로

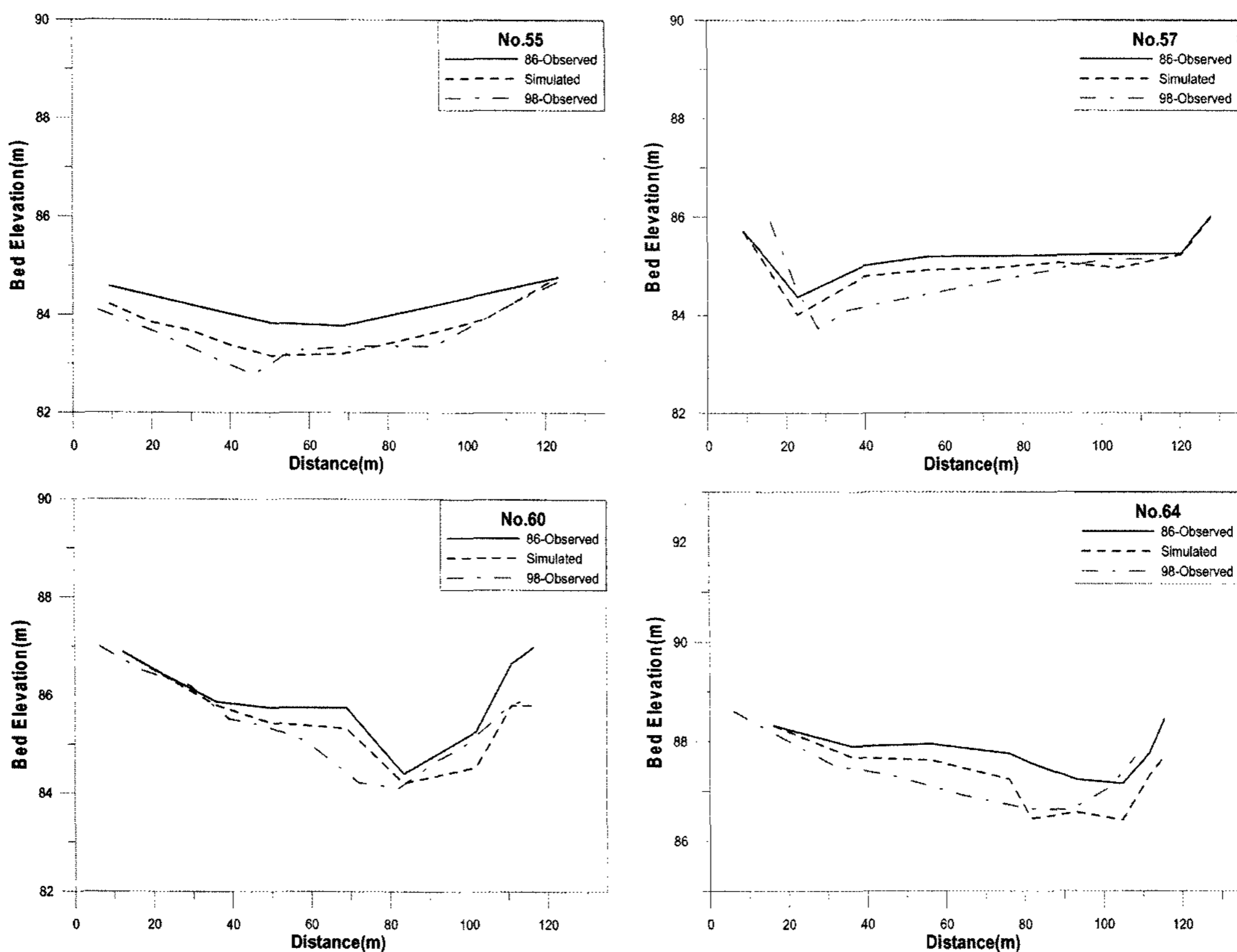


그림 5. 측정별 횡방향 하상변동고 비교

표 4. 측정별 하상변동량

| 측점(No.) | 누가거리(m) | 실측 하상변동량(tonne) |         |           | 계산 하상변동량(tonne) |        |           |
|---------|---------|-----------------|---------|-----------|-----------------|--------|-----------|
|         |         | 침식량             | 퇴적량     | 변동량       | 침식량             | 퇴적량    | 변동량       |
| 52      | 10,400  | -               | -       | -         | -               | -      | -         |
| 신신북대교   | 10,440  | -6582.6         | 275.6   | -6307.0   | -3307.2         |        | -3307.2   |
| 53      | 10,600  | -32096.8        | 2268.4  | -29828.4  | -15497.2        |        | -15497.2  |
| 54      | 10,800  | -39882.5        | 1855.0  | -38027.5  | -17728.5        |        | -17728.5  |
| 55      | 11,000  | -45845.0        | 0.0     | -45845.0  | -27295.0        |        | -27295.0  |
| 구신북대교   | 11,100  | -22511.8        | 0.0     | -22511.8  | -13647.5        |        | -13647.5  |
| 56      | 11,200  | -20497.8        | 622.8   | -19875.0  | -9394.3         |        | -9394.3   |
| 57      | 11,400  | -30952.0        | 0.0     | -30952.0  | -16960.0        |        | -16960.0  |
| 58      | 11,600  | -30581.0        | 4028.0  | -26553.0  | -14018.5        |        | -14018.5  |
| 59      | 11,800  | -23532.0        | 8268.0  | -15264.0  | -16509.5        |        | -16509.5  |
| 60      | 12,000  | -19875.0        | 0.0     | -19875.0  | -20113.5        |        | -20113.5  |
| 61      | 12,200  | -39220.0        | 0.0     | -39220.0  | -18735.5        |        | -18735.5  |
| 62      | 12,400  | -52311.0        | 0.0     | -52311.0  | -23982.5        |        | -23982.5  |
| 63      | 12,600  | -54961.0        | 0.0     | -54961.0  | -22790.0        | 2676.5 | -20113.5  |
| 64      | 12,800  | -44573.0        | 0.0     | -44573.0  | -21544.5        |        | -21544.5  |
| 65      | 13,000  | -45712.5        | 0.0     | -45712.5  | -25095.5        |        | -25095.5  |
| 66      | 13,200  | -35987.0        | 4849.5  | -31137.5  | -23214.0        |        | -23214.0  |
| 제 3취수보  | 13,400  | -7234.5         | 0.0     | -7234.5   | -12190.0        |        | -12190.0  |
| 68      | 13,600  | -16297.5        | 1431.0  | -14866.5  | -14813.5        |        | -14813.5  |
| 69      | 13,800  | -17384.0        | 14257.0 | -3127.0   | -27295.0        |        | -27295.0  |
| 70      | 14,000  | -9725.5         | 15714.5 | 5989.0    | -26712.0        |        | -26712.0  |
| 합계      |         | -595762.4       | 53569.8 | -542192.7 | -370843.7       | 2676.5 | -368167.2 |

로 신신북대교 지점과 제3취수보 하류부분을 제외한 전체구간에서 실측치가 침식된 부분은 모형도 침식된 것으로 모의하였다. 주요지점에 대해 횡방향 하상변동고를 실측치와 비교하여 도시하였는데, 전체적인 경향에서 모형에 의한 하상변동고의 양상이 실측치에 근사하게 나타났으나 하상변동량은 과소하게 산정되었다. 전체구간의 실측 총 하상변동량은 -542192.7 tonne이며, 계산 총 하상변동량은 -368167.2 tonne로 산정됨으로서 실측 총 하상변동량의 47.26%을 나타내었다. 이러한 하상변동의 과소 현상은 하상 변동 모형의 주 입력 자료인 유량이 NWS-PC 모형에 의해 다소 과소 산정되어 생기는 것으로 사료된다. 특히, 침투유출량의 과소산정은 하상변동 과소산정의 주요한 원인으로 사료된다. 또한, 이송 가능 모래크기의 실측자료의 미비로 사용한 한국 하천의 대표값 사용도 주요한 원인으로 파악된다. 본 연구를 통하여 2차원 모형으로 하상변동을 모의함으로써 기존의 1차원 모형으로 모의할 수 없었던 부분들에 대한 개선이 가능할 것으로 판단되나, 범람의 주요한 원인인 하상변동을 2차원 모형으로 정확히 예측하고 분석하기 위해서는 유량과 유사량 자료의 정확한 실측과 이의 확보가 선행되어야 할 것이다. 또한 다양한 수문기상/지형조건을 가진 유역에 적용함으로써 모형의 광범위한 검증이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

건설교통부 (2001) 임진강유역 홍수피해 원인분석 및 항구대책수립 용역 보고서.  
 경기도 (1986) 포천천 하천정비기본계획 보고서.  
 경기도 (1998) 포천천 하천정비기본계획 보고서.  
 김영성 (1993) MOBED를 이용한 하상변동의 예측, 석사학위논문, 서울대학교.  
 서일원, 김대근, 이재형 (1995) GSTARS 모형을 이용한 하상변동 해석. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1679-1687.  
 이재수, 윤용남 (1995) 한강분류의 하상변동에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권, 제4호, pp. 875-884.  
 한국건설기술연구원 (1991) 하상변동 예측모형의 비교분석 보고서.  
 Armstrong, B. L (1978) Derivation of initial soil moisture accounting parameters from soil properties for the National Weather Service River Forecast System, NOAA Tech. Memo. NWS HYDRO-37, Office of Hydrology, Washington D. C.  
 Chang, H. H. and Hill, J. C. (1976) Computer Modeling of Erodible Flood Channels and Deltas. J. of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 102, HY10.  
 Chen, Y. N. and Simons, D. B. (1975) Mathematical Modeling of Alluvial Channels. Symposium on Modeling Techniques, ASCE, Vol. 1, San Francisco.  
 Environmental Modeling Research Laboratory (2000a) SMS(Surface-Water Modeling System) GFGEN version 4.27 User's Manual. Brigham Young University.  
 Environmental Modeling Research Laboratory (2000b) SMS(Sur-



- face-Water Mode-ling System) RMA-2 version 4.3 User's Manual. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000c) SMS(Surface-Water Mode-ling System) SED-2D-WES version 4.3 User's Manual. Brigham Young University.
- Environmental Modeling Research Laboratory (2000d) SMS(Surface-Water Mod-e-l--ing System) tutorials version 7.0. Brigham Young University.
- Holly, F. M. Jr. and Karim, M. F. (1983) Computer Simulation Programs of the Degradation of the Missouri River between Gavins Point Dam and Iowa's Southern Border. Iowa Institute of Hydraulic Research, Report No. 276.
- Holly, F. M. Jr. and Rahuel, J. L. (1990a) New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modeling, Part 1: Numerical and Physical Principles. *J. of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 4.
- Holly, F. M. Jr. and Rahuel, J. L. (1990b) New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modeling, Part 2: Test Applications. *J. of Hydraulic Research*, Vol. 28, No. 5.
- Park, I. and Jain, S. C. (1986) River-Bed Profiles with Imposed Sediment Load. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 4.
- Tingsanchali, T. (1996) Experimental investigation and analysis of HEC-6. *J. of Hydrological Processes*, Vol. 10, No. 5.
- Yang, C. T. (1998) Simulation and Prediction of River Morphologic Changes Using GSTARS 2.0. *International Conference on Hydro-Science and Engineering*, Cottbus/Berlin, Germany.
- Yang, J. C. (1986) Numerical Simulation of Bed Evolution in Multi-Channel River Systems, Ph. D. Thesis Dissertation, The University of Iowa, Iowa City, Iowa.

- ◎ 논문접수일 : 2007년 12월 18일
- ◎ 심사의뢰일 : 2007년 12월 18일
- ◎ 심사완료일 : 2008년 02월 18일