한국방재학회논문집
제6권 1호 2006년 3월
pp. 69 ~ 81

용담댐 방류에 따른 하상변동 예측

Prediction of River Bed Change due to Yongdam Dam Discharge

김 영 복* / 정 승 권** / 심 순 보***
Kim, Young Bok / Jung, Seung Kwon / Shim, Soon Bo

Abstract

The purpose of this study is to identify the downstream influences due to the dam discharge by using 2-dimensional model, SMS(Surface water Modeling System). RMA-2 and SED-2D in SMS were applied to Yongdam multipurpose dam watershed located in Gum river basin. Through the simulation, erosion and deposit quantitative analysis of sinuous channels and scour pattern analysis of bridges have been done. A differences erosion depths between deposit are simulated as -102.4 mm~54.2 mm at No.176(1.4 km) and -104.1 mm~28.9 mm at No.146(7.4 km), sinuous channel. The river bed at Kamdong bridge in straight channal is simulated as uniform erosion. However, the river bed at Dumdul bridge in sinuous channal has been shown as different erosion depths at each sides. Consequently, the parts that could not be simulated on the existing 1-dimensional model, can be improved results by using a 2-dimensional model, about weakness points for hydraulic modeling such as extreme bend, tributary confluence.

key words : Dam Discharge, SMS, RMA-2, SED-2D

요 지

본 연구에서는 댐하류부에서 댐의 방류량에 따른 하상변동을 예측하기 위하여 SMS 모형을 사용하여 2차원 분석을 실시하였다. 용담다목적댐 하류유역인 금강 상류지역에 RMA-2 및 SED-2 모형을 이용하여 수리분석 및 유사이동을 통한 하상변동 모의를 실시한 결과 만곡수로에 대한 횡단면 침식 및 퇴적의 정량적 경향, 교각부근에서 세굴경향의 시각적 분석이 가능하였다. 만곡부인 No.176(1.4 km)지점에서는 -102.4 mm ~54.2 mm, No. 146(7.4 km)지점에서는 -104.1 mm~28.9 mm 정도의 한 횡단면 내에서 침식과 퇴적의 차이가 발생하였고, 직선수로의 감동교(No.164+100)에서는 비교적 균일한 침식이 발생했으나, 만곡수로에 위치한 덤덜교(No.146+50)에서는 만곡의 영향으로 우측의 침식이 활발한 것을 모의 할 수 있었다. 홍수시 댐방류량에 대한 하류부의 대책 수립에 있어서 만곡수로, 교량, 지류합류지점과 같은 1차원 분석으로는 미흡한 취약지구에 대해 2차원적인 분석을 실시하는 것이 타당하다고 판단된다.

핵심용어 : 댐방류량, SMS, RMA-2, SED-2D

1. 서 론

유사이동의 경우에 국내에서 수행된 하상변동 예측에 관한 연구들은 대부분 1차원 모형에 의한 것이므로 하천 사행의 진행이나 유사의 횡방향 분포 등의 영향을 고려할 수 없었으며, 또한 하상변동 계산시 횡단

* 정회원 · 국립방재연구소 연구원 (e-mail : wingof@nema.go.kr)
** (주)웹솔루스 수자원시스템사업부 팀장
*** 충북대학교 토목공학과 명예교수

면 전체가 균일하게 상승하는 것으로 가정하기 때문에 흐름이 급변하는 곳에 적용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 하천에 위치하는 취수구 주위의 하상변동, 홍수터나 사주의 형성 및 소멸, 지류 유입부에서의 퇴적 등의 문제 해결을 위해서는 2차원 분석이 필요하다.

하천정비기본사업 등에 의한 영향을 제대로 평가하기 위해서는 홍수 또는 호우사상에 대한 하상변동 효과를 정확하게 예측하는 것이 필수적이다. 홍수에 의한 하상에서의 유사이송은 하상변동을 가져오며 안정하도의 설계나 유역관리, 수해방지를 위해서는 하상변동의 정확한 예측이 요구되므로 2차원 하상변동을 모의하여 빈도별 홍수시 댐 방류량이 하류부에 미치는 영향을 파악하는 과정이 필요하다.

국내 하상변동에 관련된 연구는 외국에 비해 절대적으로 빈약하며, 현재에 들어 그 중요성이 다소 부각되고 있는 실정이다. 90년대에 이르러 하상변동에 관한 연구가 활발하게 이루어졌는데 서일원 등(1994)은 준 2차원 모형인 GSTARS 모형을 한강 인도교 지점으로부터 광장교 지점까지 적용하여 장·단기간에 걸친 유사의 이동에 의한 하상변동을 모의 하였다. 제갈선동(1997)은 BRISTAR 모형을 창릉천에서 강동대교 하류지점까지 적용하고 실측치를 이용하여 하상변동모의 결과를 비교하였다.

이주용(1999)은 스탠포드 대학에서 개발한 SEDSIM 모형을 사용하여 임진강의 영평천유역에 적용하였다. 그러나 현재까지 하상변동을 예측하는데 있어 필요한 실측자료가 매우 미비한 실정이며 특히, 중소하천에서는 호우기간 중의 시간별 유량 및 유사량의 실측 자료가 극히 제한되어 있는 실정이다.

2. 하상변동 모의 기법

2.1 개요

SMS(Surface water Modeling System)는 전처리, 분석과정, 후처리과정을 Window 상에서 편리하게 운영할 수 있도록 개발되었다. 전처리과정은 동수역학 모형을 실행하기위해 필요한 입력자료인 지형파일 및 경계조건파일을 작성하는 것과 ASCII 문서편집기로 작성된 자료를 그래픽하게 처리하는 것을 말하며, 분석과정은 동수역학적 기본원리의 모형들을 가지고 적절한 지표수 모델링을 수행하는 과정을 말한다. 분석에 필요한 경계조건에서의 단면자료와 유한요소망, 유한차분격자는 SMS내에서 작성되어 저장되고, 이 파일들은 수리해석, 오염물이송, 유사이송의 분석에 사용된다. 모형들은 각각의 점, 격자 또는 구간에서의 수면고, 유속, 오염농도, 유사농도 등의 결과 파일을 만들고, SMS에서는 산정된 결과 값을 여러 가지 형태의 그래픽으로 표현 할 수 있으며, 시간에 따른 동영상으로도 표현이 가능하다.

그림 1은 본 연구에 적용된 SMS 모형의 분석과정을 나타낸 것으로 부모형으로 RMA-2와 SED-2D를 사용하였다. SED-2D는 모형내에서 수위와 유속을 계산하지 못하기 때문에 RMA-2에서 계산된 수위와

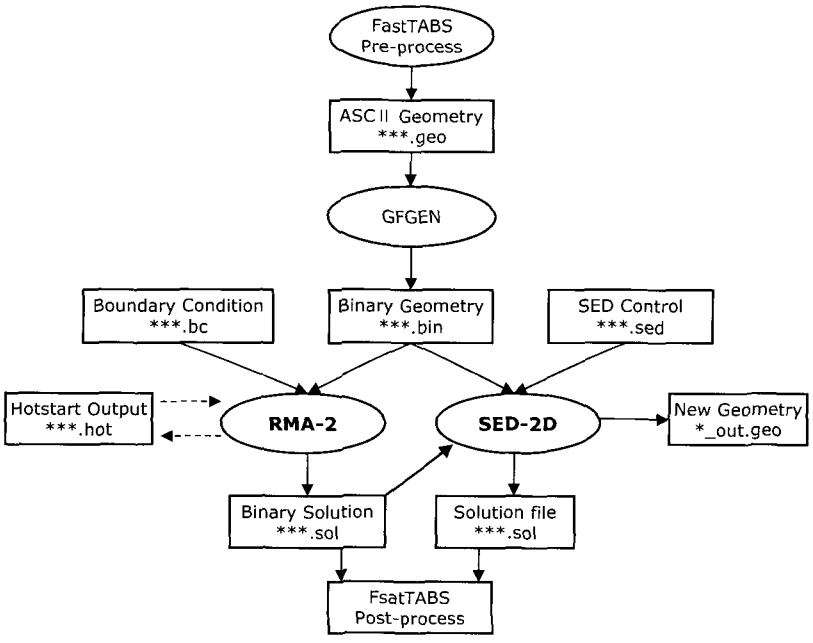

그림 1. SMS 모형의 하상변동 모식도

유속값을 사용한다. 이 때 SED-2D에서 계산되는 하상의 침전이나 퇴적으로 인해 흐름에 막대한 영향을 미치지 않는다는 기본 가정이 주어져 있다. 만약, SED-2D에서 계산되는 하상의 변화가 흐름에 막대한 영향을 미친다면 SED-2D에서 생성된 새로운 하천지형을 이용하여 RMA-2에서 수위와 유량을 계산하고 이를 다시 SED-2D에서 모의함으로써 정상류뿐만 아니라 부정류 흐름에서도 분석이 가능하도록 구성된다.

2.2 RMA-2 모형

2.2.1 개요

유한요소 2차원 모형인 RMA 모형은 1973년 미국의 Resource Management Associate, Inc.의 Norton 등에 의해 하천 및 하구의 유속분포를 예측하기 위해 개발된 유한요소 수치모형으로 개발되었다. King은 이를 수정·보완하여 RMA 모형이란 이름으로 1988년에는 UNIX Version 4.0을 발표하였고, 1994년에는 PC Version 5.0을 발표하였다.

RMA-2는 SMS 모형의 수리분석과정을 위한 부모형으로서 2차원 흐름 영역에서 자유표면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하고, Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한요소의 해를 계산하며, 와점성계수(Eddy viscosity coefficient)는 난류의 특성을 정하는데 사용하되, 정상류 뿐만 아니라 부정류에서도 모의 가능하다.

2.2.2 기본이론

RMA-2 모형은 식(1)의 연속방정식과 식(2) 및 식(3)과 같은 운동량 방정식을 지배방정식으로 하는 2차원 천수방정식을 Galerkin의 가중잔차법(Weighted residual method)에 의하여 해석하는 유한요소모형이다.

• 연속방정식

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

• 운동량방정식

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

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

여기서, u,v는 x,y 방향의 유속성분, h는 수심, t는 시간, g는 중력가속도, a는 하상표고, ϵ는 확산계수 그리고, τ_x,τ_y는 x,y 방향으로 작용하는 마찰응력항이다.

마찰응력항은 식(4), 식(5)와 같이 바닥마찰, 바람영향 및 Coriolis 효과를 나타낸다.

$$\tau_x=\frac{gu}{C^2h}(u^2+v^2)^{1/2}-\frac{\zeta}{h}V_a^2\cos\psi-2\omega v\sin\phi \qquad (4)$$

$$\tau_y=\frac{gv}{C^2h}(u^2+v^2)^{1/2}-\frac{\zeta}{h}V_a^2\cos\psi-2\omega u\sin\phi \qquad (5)$$

여기서, C는 Chezy 계수, ζ는 경험적인 바람응력계수, V_a는 풍속, ψ는 풍향, ω는 지구의 각속도 그리고, ϕ는 적용대상 지역의 평균 위도이다.

유한유소는 1차원 혹은 2차원일 수 있으며 곡선 형태일 수도 있다. 형태 방정식은 유속에 대한 2차 방정식이며, 수심에 대한 선형 방정식이다. 공간에 대한 적분은 Gaussian 적분에 의하며 시간에 대한 도함수는 비선형 유한차분 근사치에 의해 계산된다. 이에 대한 해는 완전 음의 해이며 연립방정식은 Newton-Raphson 반복법에 의해 산정된다.

각 격자별 초기조건은 관리수위를 기준으로 하여 수위가 극치일 때 x,y방향의 유속을 각각 0으로 하여 계산하도록 되어있다. 이 조건은 실제 상태와 동일하지 않기 때문에 초기계산 결과는 그 오차의 영향을 받게 되어 정확성에 문제가 있으므로 일정 계산 시간이 경과한 후의 결과가 이용되어야 한다.

2.3 SED-2D 모형

2.3.1 개요

SED-2D는 STUD-H라고 불리우는 프로그램의 개정판으로서 초기의 STUD-H 프로그램은 1974년에 University of California, Davis의 Dr. R. B. Krone과 Dr. Ranjan Ariathurai가 개발하였다. 그 후 1993년에 STUD-H 프로그램은 SED-2D (version 1.2)으로 개정되었으며 여러기관의 재정적 지원으로 1998년까지 지속적으로 수정·보완되어 왔다. 현재 SED-2D의 주요한 개정사항은 늪지대의 간

극률에 대한 호환성과 점토질 하상에 대한 모의(version 2.0), 1차원 요소분석(version 3.0), 조류(tidal flow)에 대한 자동경계기능과 확산계수의 자동계산 옵션(version 4.0)등이다.

SED-2D는 모래하상과 점토질 하상에 대한 모의가 가능하지만, 유효입경을 고려함에 있어 단 하나의 대표 유효입경만을 선택할 수 있으므로 각각의 다른 유효입경에 대해서는 모형실행을 각각 따로 수행하여야 한다.

2.3.2 기본이론

가. 이송-확산 방정식

기본 이송-확산 방정식은 1977년에 Ariathurai, MacArther 그리고 Krone에 의해 제안되었다.

$$\frac{\partial C_{on}}{\partial t}+u\frac{\partial C_{on}}{\partial x}+v\frac{\partial C_{on}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x\frac{\partial C_{on}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(D_y\frac{\partial C_{on}}{\partial y})+\alpha_1 C_{on}+\alpha_2 \quad (6)$$

여기서, C_{on}는 농도(kg/m^3), t는 시간(sec), u는 x방향 유속(m/sec), v는 y방향 유속(m/sec), x는 주흐름방향(m), y는 x 방향과 직각인 방향(m), D_x는 x방향의 유효확산계수(m^2/sec), D_y는 y방향의 유효확산계수(m^2/sec), α_1는 하상제원(source term)에 대한 계수(1/sec) 그리고, α_2는 하상제원(source term)의 평형농도(kg/m^3/sec=$-\alpha_1 C_{eq}$)이다.

나. 하상전단응력

$$\tau_b=\rho(u^*)^2 \quad (7)$$

여기서, ρ는 물의 밀도, u^*는 전단속도이다.

전단속도(u^*)는 로그속도 공식이나 Manning 전단응력 공식, Jonsson-type 방정식, Bijker-type 방정식 등 여러 공식을 선택·적용하여 산정되도록 구성되어 있다.

(1) 로그속도공식

$$\frac{\bar{u}}{u^*}=5.75\log(3.32\frac{u^*h}{v}) \quad (8)$$

여기서, $\bar{u}$는 평균 유속, h는 수심 그리고, v는 동점성 계수이다.

(2) Manning 전단응력 공식

$$u^*=\frac{\sqrt{g}\,\bar{u}n}{CME h^{1/6}} \quad (9)$$

여기서, g는 중력가속도, n은 Manning 조도계수 그리고, CME = SI 단위계 일 때 1.0, 영미식 단위계일 때 1.486이다.

(3) Jonsson-type 방정식

$$u^*=\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{f_w u_{om}+f_c\bar{u}}{u_{om}+u}\right)\left(\bar{u}+\frac{u_{om}}{2}\right)} \quad (10)$$

여기서, f_w는 파(wave)에 대한 전단응력 계수, u_{om}는 파(wave)의 최대 궤도 속도 그리고, f_c는 흐름에 대한 전단응력 계수이다.

(4) Bijker-type 방정식

$$u^*=\sqrt{\frac{1}{2}f_c\bar{u^2}+\frac{1}{4}f_w u_{om}^2} \quad (11)$$

다. 하상제원

하상제원의 형태는 식(6)의 우측부분($S=\alpha_1 C_{on}+\alpha_2$)으로 나타내며, 모래나 점토에서의 침식과 퇴적은 같다. α계수를 계산하는 방법은 유사의 형태나 침식이나 퇴적의 발생여부에 따라 다르게 적용된다.

모래 이송의 경우, 하상으로부터의 유사의 공급은 흐름의 잠재 이송능력과 하상에서의 물질의 활용도에 의해 제어되며 하상 제원은 다음식과 같다.

$$S=\frac{C_{eq}-C}{t_e} \quad (12)$$

여기서, S는 하상제원, C_{eq}는 평형농도, C는 유사농도 그리고, t_c는 이송에 영향을 미치는 특성시간이다.

모래의 평형농도(C_{eq})를 계산하는 많은 이송공식이 있으며, 그 중에서 Ackers-White공식이 사용되고 있다.

특성시간(t_c)은 흐름농도가 C에서 C_{eq}까지 변하는데 소요되는 시간이다. 퇴적의 경우, 특성시간(t_c)은 침강속도와 관계가 있으며 식(13)에 의해 결정된다.

$$t_c = largeof\left[C_d\frac{h}{V_s} or DT\right] \quad (13)$$

여기서, t_c는 특성시간, C_d : 퇴적 계수, h는 수심, V_s는 유사입자의 침강 속도 그리고, DT는 계산시간 간격이다.

세굴의 경우는 식(14)에 의해서 결정된다.

$$t_c = largeof\left[C_e\frac{h}{u} or DT\right] \quad (14)$$

여기서, C_e는 유입계수이다.

점토 이송의 경우 점토하상의 퇴적률은 Krone방정식으로 계산된다.

$$S = \frac{-2V_s}{h}C\left(1-\frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad \text{for} \quad C < C_c \quad (15)$$

$$S = \frac{-2V_s}{h}C^{5/3}\left(1-\frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad \text{for} \quad C > C_c \quad (16)$$

여기서, τ는 전단응력, τ_d는 퇴적에 대한 한계 전단응력 그리고, C_c는 한계 농도 = 300 ㎎/L이다.

침식율은 Partheniades결과를 간단히 적용하여 계산되며 하상제원은 다음식과 같다.

$$S = \frac{P}{h}\left(\frac{\tau}{\tau_e}-1\right) \quad (17)$$

여기서, P는 침식률 상수, τ_e는 침식에 대한 입자의 한계 전단응력이다.

라. 하상 모형

하상변동 계산은 각 시간단계에 대해 Crank-Nicholson 가중치를 주어 계산하며, 모래하상은 침식이 불가능한 유한 두께를 가진 저수지로 구성되어 있다고 가정한다. 유사는 식(6)의 유입/유원값에 의해 결정된 비율로 하상에 추가되거나 이동된다. 점토하상은 일련의 층으로 구성되어 있으며, 각각의 층들은 두께, 밀도, 연령, 체적전단강도 그리고, 종류의 특성을 가지고 있다.

3. 적용 및 고찰

3.1 대상유역

금강 상류지점인 전라북도 진안군 용담면 월계리에 건설된 용담다목적댐은 높이 70 m, 길이 498 m, 총 저수용량 8억 1천 5백만 ㎥의 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐으로 이루어졌다.

본 연구의 대상구간은 용담댐을 기점으로 댐하류 8.2 ㎞ 까지의 구간을 선정하였다. 본 구간은 심한 사행을 나타내며, 감동교(No.164+110)와 덤덜교(No. 146+50) 두 개의 교량이 위치하고, 7.6 ㎞ 지점에서 안창천(No.150)과 합류한다.

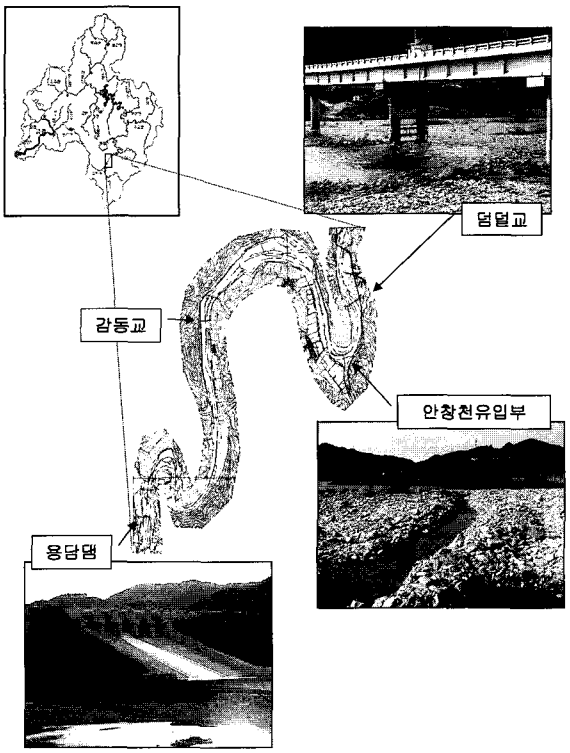

그림 2. 연구대상유역

3.2 수리분석모형의 적용

3.2.1 유한요소망

전체구간은 총 6,204개의 절점과 총 2,188개의 요소망으로 구성된다. 그림 3은 SMS를 이용해 구축한 유한요소망을 보여준다. 교량부분과 합류지점에서는 더 세밀한 흐름 분석을 위하여 조밀한 요소망을 적용하였다.

3.2.2 입력자료

가. 지형자료

본 연구에 사용되는 SMS 프로그램의 지형자료는 "금강 진안천 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)"의 종·횡단면 자료와 1:5,000 수치지도를 이용하여 구축하였다.

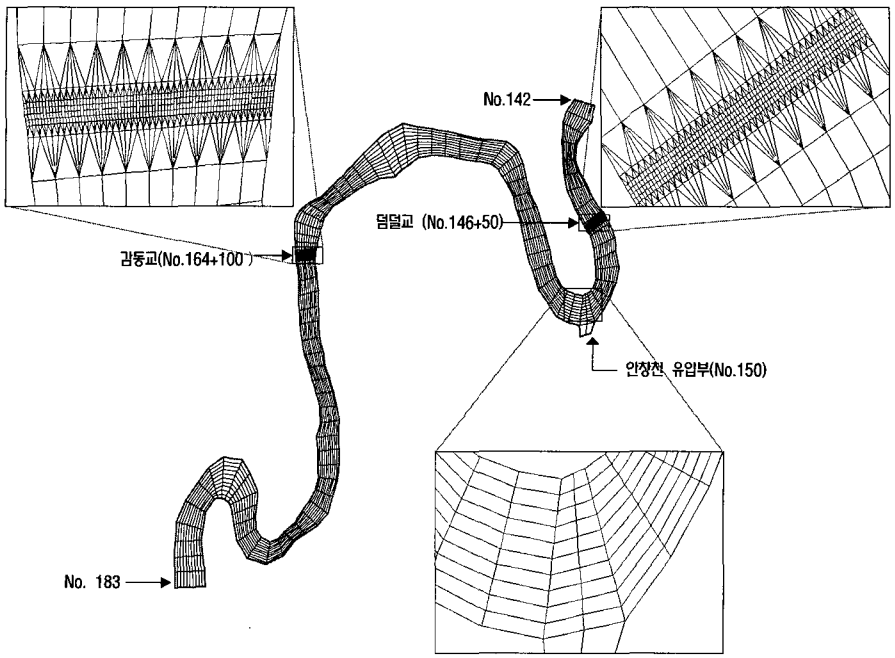

그림 3. 대상구간의 유한요소망

표 1. 용담댐의 빈도별 방류량

구 분	빈 도				
	30년	50년	80년	100년	150년
유입량(㎥/sec)	4,130	4,500	4,840	5,000	5,290
방류량(㎥/sec)	2,285	2,480	2,650	2,735	3,015
일정비(%)	51.8%				

나. 경계조건 및 초기조건

RMA-2에서는 일반적으로 상류 유입부에서는 유량경계조건을 사용하고 하류부 경계조건으로는 수위경계조건을 사용한다. 상류 유입부의 경계조건인 댐방류량은 "금강 진안천 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)" 에서 홍수조절방법인 Rigid Rom으로 표 1와 같이 용담댐의 홍수조절효과를 검토한 결과를 사용하였다.

하류부의 경계조건은 "금강 진안천 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)" 에 수록된 빈도별 홍수위에서 대상구간 하류부 경계지점(No.142)의 수위를 사용했고, 수온은 20℃를 사용하였다. RMA-2에서 초기 홍수위는 유한요소망의 최고하상표고보다 높은 값을 사용하여 계산을 수행하게 된다. 지류인 안창천의 유입량은 "금강 진안천 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)" 에 수록된 빈도별 홍수위에서 50년 빈도 홍수량인 240 cms를 일괄적으로 적용하였다.

다. 난류교환계수

난류교환계수는 와점성계수라고도 하며, 대상구간에 알맞은 난류교환계수를 산정하기 위하여 80년 빈도 계획홍수위와 표 2에 수록된 값을 바탕으로 일반적으로 난류교환계수 접근에 사용하는 1,000 N · sec/㎡, 1,500 N · sec/㎡, 2,000 N · sec/㎡, 3,000 N · sec/㎡ 그리고, 4,000 N·sec/㎡를 적용한 모형의 수위를 비교하였다.

그림 4는 난류교환계수에 따라 RMA-2의 결과로 분석된 홍수위를 나타낸 그래프이다. 1,000 N · sec/㎡와 4,000 N · sec/㎡는 하류경계 조건으로 사용한 80년 빈도의 홍수위에 많이 벗어나고, 1,500 N · sec/㎡, 2,000 N · sec/㎡ 그리고 3,000 N · sec/㎡는 비교적 비슷한 값을 가진다. 난류교환계수의 값이 높을수록 모형의 흐름분포를 잘 나타내주지 못하는 단점을 가지고 있고, 낮은 값일수록 하상변동을 위한 부정류흐름을 분석할 경우 해가 불안정하기 때문에 중간 값인 2,000 N · sec/㎡을 사용하기로 하였다.

일반적으로 실제 하천 적용에 있어서 한가지 값을 동일하게 사용하지만, 한가지 값을 동일하게 사용할 경우에는 만곡부에서의 유속분포를 잘 나타내주지 못하는 단점을 보였다. 그리고, 전체적으로 2,000 N · sec

표 2. 하천에 따른 난류교환계수

Conditions	ε value (lb · sec/ft^2)	ε value (N · sec/m^2)
shallow river (slow current)	5 ~ 25	240 ~ 1200
shallow river (fast current)	25 ~ 50	1200 ~ 2400
deep Estuary (small elements)	50 ~ 100	2400 ~ 4800
deep Estuary (large elements)	200 ~ 300	9500 ~ 14400
wetland with tidal wetting and drying	100 ~ 200	4800 ~ 9500
flow separation around structures	1 ~ 5	50 ~ 240

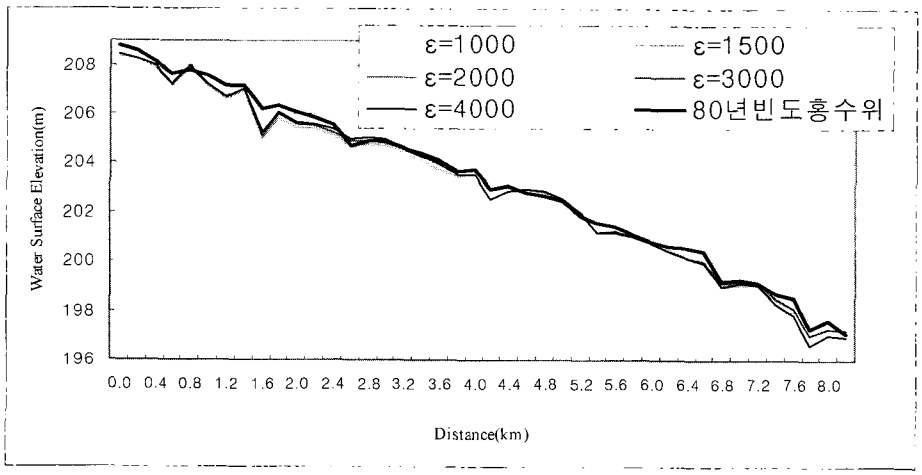

그림 4. 난류교환계수에 따른 80년 빈도 홍수위

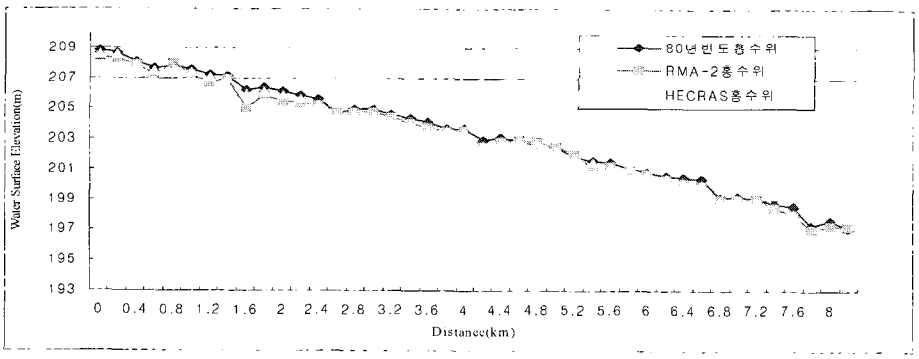

그림 5. 적용 모형에 따른 지점별 80년 빈도 홍수위

/㎡의 값을 사용하며 만곡부에서는 법선 방향에 대해서 2,000 N · sec/㎡의 값을 사용하고 횡방향 흐름분포에 영향을 많이 주는 접선 방향에 대해서는 1,500 N · sec/㎡의 값을 사용하여 횡적분포의 변화가 좀 더 용이하게 모의되었다.

라. Manning의 조도계수

RMA-2와 HEC-RAS모형 실행시 사용한 조도계수는 "금강 진안천 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)" 에 수록된 값인 0.030~0.032를 사용하였다.

3.2.3 2차원 수리분석

용담댐의 홍수사상의 빈도별 방류량에 대한 하류의 영향을 모의하기 위하여, SMS모형에서 유한요소망을 구축한 후 RMA-2모형을 이용하여 2차원 수리분석을 실시하였다. HEC-RAS와 RMA-2모형의 결과를 비교하고, 용담댐 5개의 빈도별 홍수에 대한 방류량을 24시간동안 지속적으로 흘려보냈을 경우를 상부 경계조건으로 하고 0.5시간 간격으로 수리분석을 모의하여 수위, 유속, 수심의 값을 예측하였다.

그림 5는 "금강 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)"

에 수록된 수위 자료와 1차원과 2차원 모형의 결과를 빈도별로 비교한 그래프이며, 그 결과 비교적 근사하게 모의 됐음을 알 수 있다. RMA-2에 분석된 값은 "금강 하천정비 기본계획(전라북도, 1996)"에 수록된 수위 자료에 비해 대체로 조금 낮게 모의 된 것을 볼 수 있고, HEC-RAS의 결과보다는 조금 더 근접하게 모의 된 것을 볼 수 있다.

그림 6은 만곡부 주요 지점인 No. 149(6.8 Km)와 No. 178(1 km)에서의 수위와 유속 분포에 대하여 HEC-RAS를 이용한 결과와 RMA-2를 이용한 결과를 보여주는 그래프이다. HEC-RAS에서는 동일한 단면에서 유속과 수위의 변화가 없고 일정한 것에 반해서 RMA-2에서는 만곡부에서 원심력의 영향으로 흐름 내측보다 외측의 수위가 높게 나타났으며, 유속 또한 외측에서 증가한 것을 볼 수 있다. 동일 횡단면에 RMA-2모형에서는 HEC-RAS에서 나타 낼 수 없었던 횡방향의 분석까지 가능하였다. RMA-2모의 결과 No. 179(0.8 ㎞), No. 175(1.6 ㎞)과 No.150 (6.6 ㎞)의 만곡부지점에서는 내측보다 외측에서 원심력의 영향으로 수위가 더 높게 나타났으며, 유속분포는 만곡과 하천 폭의 변화에 영향을 많이 받은 것을 볼 수 있었다. 80년 빈도에서의 동일 횡단면에 대한 최대 유속차이는 만곡부사이 흐름의 급변으로 인하여 No.178(1 ㎞)지점에서 3.15 m/sec로 나타나고, 동일 횡단면의 최대 수위차이는 만곡부의 영향으로 No.175(1.6 ㎞)지점에서 1.94 m 차이가 나타났다.

감동교(No.164+110)에서는 0.27 m~0.48 m, 덤덜교(No.146+50)에서는 0.07 m~0.36 m 정도로 교각 전후에서 수위 감소가 발생하였으며 교각 사이의 통수단면적의 감소로 인한 유속은 증가하였다. 그림 7은 교량 지점 전·후에서의 유속과 수위의 관계를 모의 결과를 바탕으로 보여주는 그림이다. 감동교(No.164+110)지점과 덤덜교(No.146+50)지점에서 교량을 지나면서 수위가 감소하고 유속이 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 80년 빈도 계획홍수량에 대해 수위 분포를 나타내고 있으며, 그림 9는 동일 사상에 대한 유속분포를 보이고 있다. 수위와 유속분포를 보면 같은 횡단면에서도 하폭의 변화와 만곡수로부분에서 차이가 나타나는 것을 볼 수 있고, 5개 빈도의 계획홍수량에 대한 모형분석결과 정도의 차이를 나타낼 뿐 비슷한 경향을 보여주므로 본문에는 80년 빈도의 수위, 유속분포를 대표적으로 기재한다. 유속은 대략 0.3 m/sec ~6.3 m/sec의 분포를 나타내는데 분포 범위가 넓은

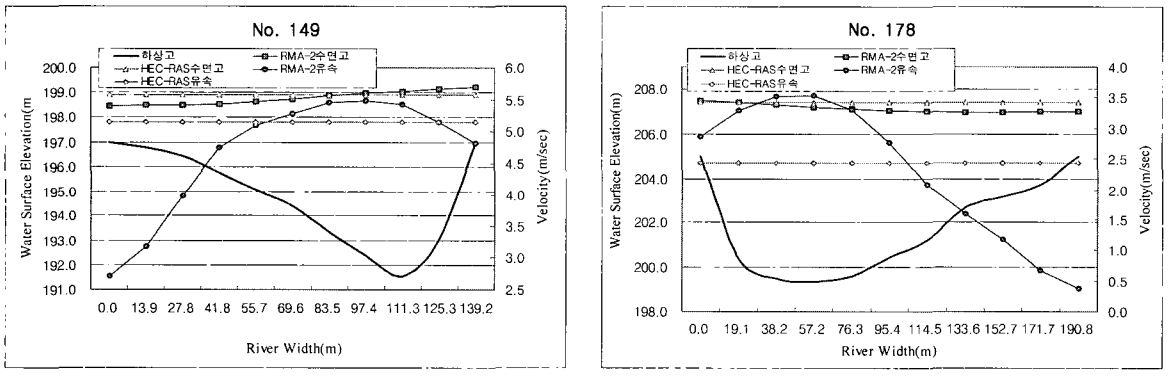

그림 6. 주요지점별 수리분석 결과

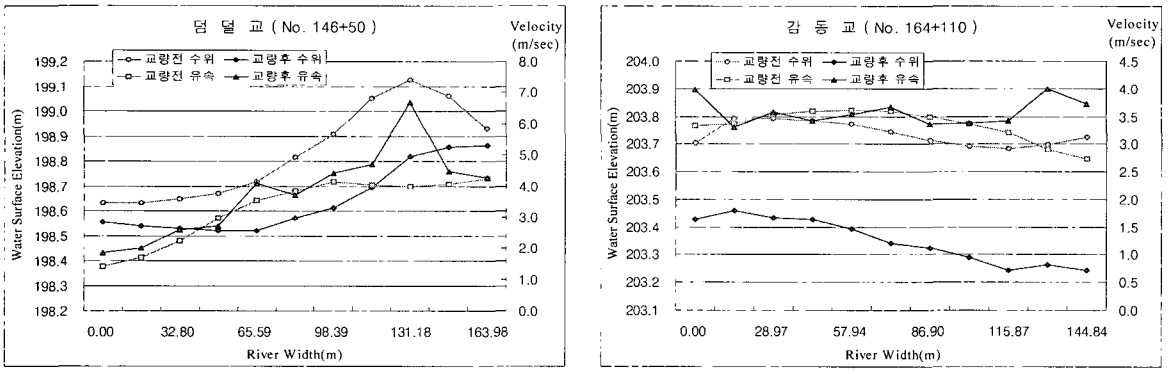

그림 7. 교각에서의 수리분석 결과

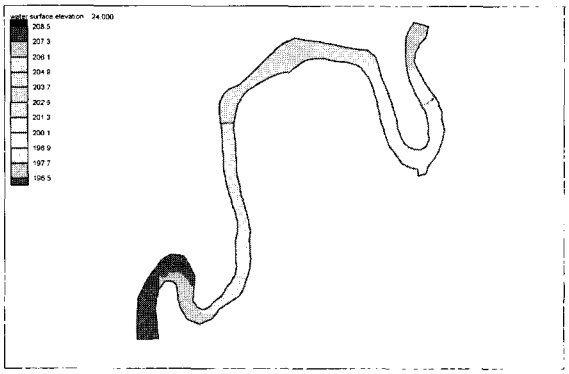

그림 8. 80년 빈도의 수위분포

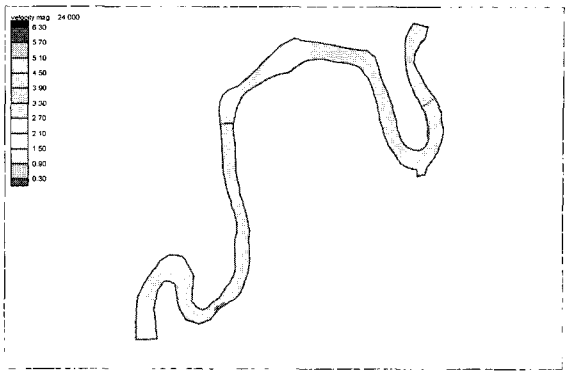

그림 9. 80년 빈도의 유속분포

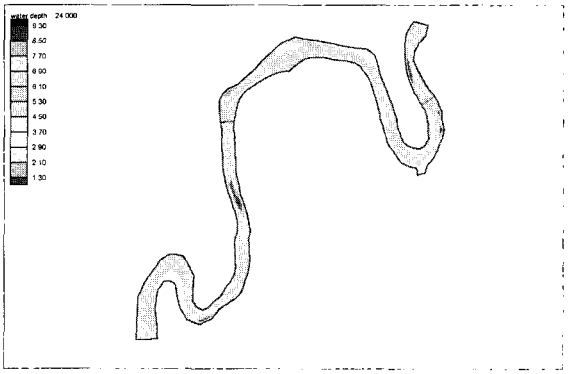

그림 10. 80년 빈도의 수심분포

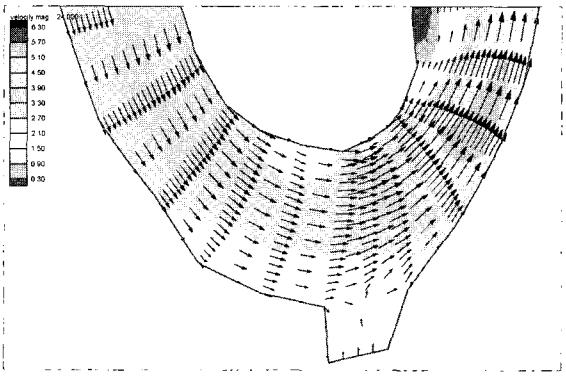

그림 11. 안창천 합류지점의 유속분포

것은 심한 만곡과 하천폭의 변화 때문이라고 사료된다. 그림 10은 동일 사상의 수심 분포를 보여준다. 그림 11의 안창천 합류부(No.150)에서는 안창천 유입으로 인하여 유속이 감소하고 흐름 역행도 발생하는 것을 볼 수 있다.

3.3 하상변동모형의 모의

3.3.1 입력자료

1) 부유사농도

본 연구에서 대상구간에의 유사량 실측자료를 이용한다. "금강 시험조사 유역에서의 유사량 실측(건설기술연구원, 1992)" 에 수록된 대소교(No. 141)에서의 유사량 실측 자료를 이용하여 입력자료로 사용하였다. 부유사 농도는 "금강 시험조사 유역에서의 유사량 실측(건설기술연구원, 1992)" 에 수록된 식(18)의 유량-유사량 곡선식을 사용하여 표 3과 같이 산정하였다.

$$Y=6.1(X-3.2)^{1.14} \tag{18}$$

여기서, X는 유량(㎥/sec), Y는 총부유사량(tons/day)이다.

2) 유사확산계수

부유사 확산계수는 SED-2D의 Manual에 수록된 표 4의 값을 기본으로 하여 사용하였으며 대상구간의 유속의 값이 크므로 하천의 크기를 고려하여 100㎡/sec을 적용하였다.

3) 대표입경(d_{50})

대표입경 (d_{50})은 "금강 시험조사 유역에서의 유사량 실측(건설기술연구원, 1992)" 에서 산정한 1.71㎜로 정하였고 비중은 2.65를 사용하였다.

표 3. 방류량에 따른 유사농도

Division	Frequency				
	30Yr	50Yr	80Yr	100Yr	150Yr
Dam Outflow(㎥/sec)	2285	2480	2650	2735	3115
Suspended load conc.(g/ℓ)	0.2081	0.2106	0.2126	0.2135	0.2175

표 4. 유사확산계수

Typical Location	Current Speed (m/sec)	Typical Element size(㎞)	Dispersion Coefficient(㎡/sec)
Medium-size river	1.0 ~ 1.5	0.1 ~ 0.5	100
Open bay	0.5 ~ 1.0	0.75	100
Tidal river	0.2 ~ 1.0	0.1 ~ 0.3	5 ~ 10

4) 침강속도

침강속도는 식(19)의 Gibbs의 경험식을 사용하여 계산된 0.2424 m/sec를 사용하였다.

$$\omega = \frac{-6\mu + \sqrt{2/3\gamma(\rho_s - \rho)D^2 D_g + 36\mu^2}}{\rho D_g} \qquad (19)$$

여기서, $D_g(\text{㎝}) = 0.02322 + 0.1488D$이고, ω는 침강속도(㎝/sec), D는 입자 직경(㎝), ρ는 밀도(g/㎤), μ는 점성계수(g/m·sec)이다.

5) 이송가능한 모래입자

이송가능한 모래입자는 "금강 시험조사 유역에서의 유사량 실측(건설기술연구원, 1992)" 에 수록된 부유사 입경분포를 참고로 하여 0.0625 ㎜를 적용하였다. 모래층의 두께는 "용담 다목적댐 건설 토목공사 실시설계보고서(한국수자원공사, 1991)에 수록된 내용을 참고하여 3.0 m로 정하였다.

그 밖의 입력자료로는 결과 값에 크게 영향을 미치지 않는 자료로 Manual에 주어지는 기본 값을 사용하였다. 모래하상의 골재형상계수는 우리나라 중유역에 위치한 모래 하천에서 입자의 형상계수 평균 0.66~0.7 중의 0.67을 사용하였고, 특성퇴적길이요소와 특성침식길이요소는 권장값 1과 10을 사용했다.

유입되는 유량에 대한 부유사 농도는 대상구간 내의 부유사 농도와 동일한 값을 사용하였다.

3.3.2 단기하상변동 모의

유한요소망의 지형데이터와 RMA-2의 수리데이터를 이용해서 SED-2D모형의 하상변동을 모의하였다. SED-2D모형의 상부 경계조건인 방류량의 부유사농도는 대상 유역의 부유사 농도와 동일하게 주어주고 24시간동안 0.5시간 간격으로 모의를 하였다.

SED-2D모형은 하상의 전단응력 분포, 유사농도 분포, 그리고 하상변동 정도를 모의 할 수 있으며, 빈도별 방류량에 따른 하상변동은 거의 같은 형태를 갖는 것을 보이며 대상구간 전체적으로 침식성 경향이 짙은 것을 모의 할 수 있었다. 하지만 No.183지점에서 No.182(0.2 ㎞)지점 구간에서 댐방류에 의한 유입 유량의 부유사로 인하여 퇴적의 성향을 보이며, 80년 빈도에서 138.33 tons/day 정도의 퇴적이 발생하는 것을 모의 할 수 있었다. 또한 하천 단면의 확대로 인해 유속이 저하되는 No.164(3.8 ㎞)지점에서는 14.3 ㎜~45.6 ㎜, No.159(4.8 ㎞)지점에서는 15.6 ㎜~43.6 ㎜ 정도가 퇴적으로 인한 하상 상승효과를 나타내었다. No.176(1.4 ㎞)지점에서는 -102.4 ㎜~54.2 ㎜, No.146(7.4 ㎞)지점에서는 -104.1 ㎜~28.9 ㎜ 정도로 한 횡단면 내에서 침식과 퇴적이 크게 차이나는 것을 모의 할 수 있었다. 이것은 만곡으로 인한 수로 안과 밖의 유속 차이에 의한 것이라고 사료된다. No.151(6.4 ㎞)지점의 안창천 합류지점에서는 유속의 감소로 인해 유입되는 유사와 함께 2.1 ㎜~27.2 ㎜ 정도의 퇴적이 이루어지는 것을 모의 할 수 있었다.

그림 12는 지점별 최심하상고 부분에서의 하상 변동의 정도를 모의한 결과를 나타낸 것이다. 다른 빈도에서는 정도의 차이가 나타나며 전체적인 분포의 형태는 같음을 알 수 있다. 최심하상고에서의 하상변동은 1차원 하상변동에서도 나타낼 수 있다. 그러나, 2차원 하상변동을 모의하는 본 연구에서는 하상변동의 변화가 심한 1.6 ㎞(No.175)지점과 안창천 합류지점(No.150)의 횡적 변동정도를 그림 13에 나타내었다. 만곡부인 No.175지점에서는 침식이 최대로 발생했음에도 불구하고 한 횡단면에서 유속이 낮은 좌측에서는 퇴적이 발생한 것을 모의할 수 있었고, 만곡부의 중앙에 있는 안창천 합류지점에서 또한 유입부에서의 유속의 감소로 인해 우측에 퇴적이 발생한 것을 모의할 수 있었다. 그림 14에는 교량지점의 하상변동을 나타내었으며 감동교(No.164+100)에서는 교각 사이에서 비교적 균일하게 침식이 일어난 것을 볼 수 있고, 덤덜교(No.146+50)에서는 만곡의 영향으로 우측에서 침식이 더 활발한 것을 모의 할 수 있었다.

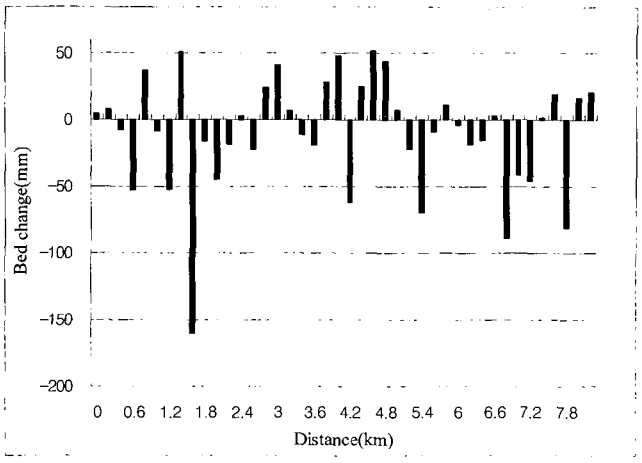

그림 12. 80년 빈도 하상변동

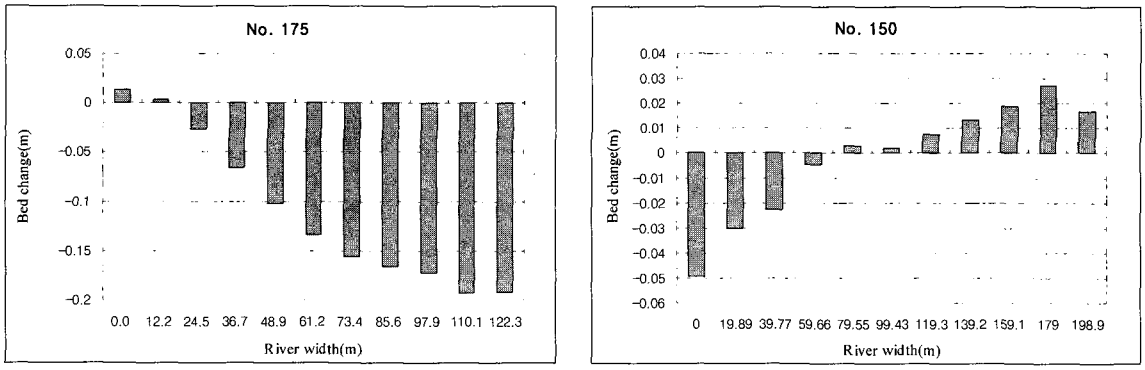

그림 13. 주요지점의 하상변동

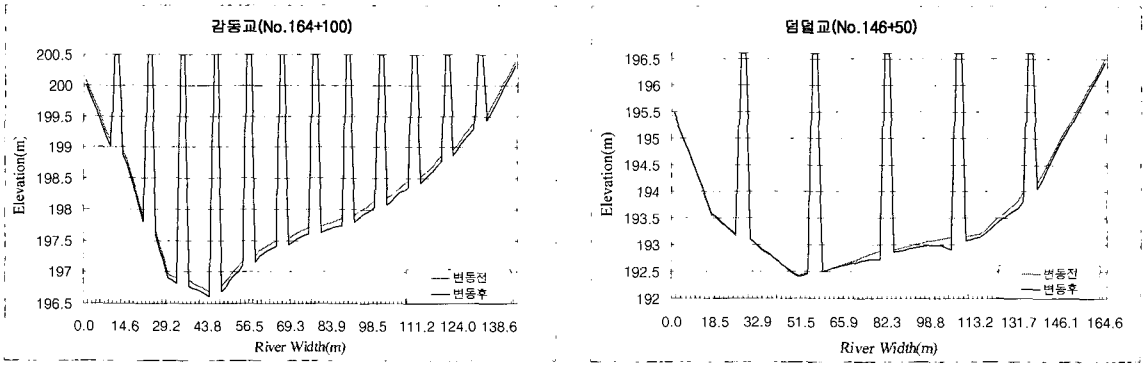

그림 14. 교량지점의 하상변동

표 5는 각 빈도별 수리분석과 하상변동을 모의한 결과로 유속분포와 하상변동 정도, 유사농도 분포, 총유사량이 나타나 있으며, 유사농도는 본 실험 구간외의 하류구간을 추가로 분석 할 경우 유용한 입력자료로 사용할 수 있으며, 2차원분석으로 계산된 부유사농도 분포는 대상구간의 침식과 퇴적의 전체적 성향을 보여줌으로써 하천의 방재계획을 수립하는데 그 활용도가 높다고 할 수 있다. 또한 유사농도는 총유사량을 구하기 위한 필요한 데이터이기도 하며, 총유사량을 통하여 대상구간이 전체적으로 침식성 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

그림 15는 80년 빈도 방류량에 의한 하상 변동을 모의 한 결과를 나타낸 것으로 그 변화양상을 쉽게 파악할 수 있다. 다른 빈도에 대한 하상변동 모의 결과를 살펴보면 전체의 하상변동 형태는 그 정도의 차이가 있을 뿐 그 유형은 같다. 80년 빈도를 살펴보면 전

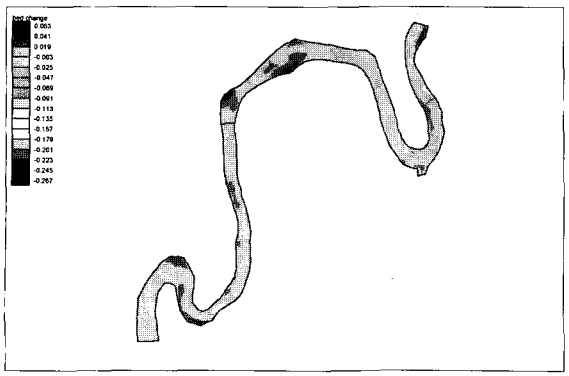

그림 15. 80년 빈도의 하상변동

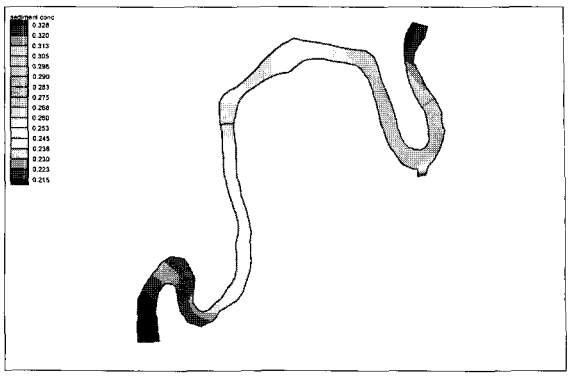

그림 16. 80년 빈도 부유사 농도 분포

표 5. 빈도별 결과

구분	30년	50년	80년	100년	150년
유속(*m*/sec)	0.3~5.8	0.3~6.3	0.3~6.3	0.33~6.33	0.3~6.8
하상변동(*m*)	-0.17~0.06	-0.21~0.06	-0.232~0.058	-0.231~0.059	-0.266~0.064
유사농도 (*g*/*l*)	0.21~0.31	0.215~0.325	0.215~0.325	0.218~0.328	0.221~0.331
총유사량 (*tons/day*)	-21753.3	-26781.4	-28454.5	-29267.9	-33771.8

체적으로 -0.232 m ~ 0.058 m 의 분포를 보이고 있고, RMA-2에서 나온 수리결과와 비교해 본 결과 대체적으로 유속 분포와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다. 초기 유입부에서는 유입 유사량에 의해 퇴적이 전체적으로 발생하였다.

SED-2D모형에서는 하상의 전단응력 분포와 부유사 농도분포를 보여 줄 수 있는데, 그림 16은 부유사 농도 분포를 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 모형인 SMS를 이용하여 용담댐 방류에 따른 하류부의 하상변동을 모의하였다. 계획 홍수에 의한 댐방류량이 하류부에 미치는 수리변화는 1차원 모형인 HEC-RAS와 2차원 모형인 RMA-2모형을 이용하여 분석을 실시하였고, SED-2D모형을 이용하여 하상변동을 모의함으로써 안정성과 취약지를 검토하였다. 빈도별로 5개의 홍수사상에 대하여 모의한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1차원 수리모형 HEC-RAS와 2차원 수리모형 RMA-2를 비교한 결과 2차원 수리모형은 만곡부, 단면축소부, 교량단면부 등 현저한 지형변화가 발생하는 곳에서의 유속 및 수위분포를 잘 모의 할 수 있음을 확인하였다. 만곡유로부나 수로의 확대 및 축소가 존재하는 복잡한 하도구간의 경우 좌우안 및 유심부에서의 유속과 수위는 큰 차이를 보이므로, 이러한 복잡한 하상형태를 갖는 구간에서 하천의 개수사업, 교량·제방과 같은 수공구조물 및 저류지, 저수지 등의 홍수저류시설을 설계를 위한 계획홍수위 산정에 있어서 2차원 모형을 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

하천 댐방류량의 24시간 지속적 유입으로 인한 단기하상변동을 모의한 결과 최심하상에서의 하상변동뿐만 아니라 주요지점에서의 횡단면 변동상황까지 모의 할 수 있었다. No.164(3.8 ㎞)과 No.159(4.8 ㎞) 지점과 같이 하천 폭이 증가하는 부분에서 퇴적이 주로 일어나고 하천의 폭이 감소하는 No.175(1.6 ㎞)과 No.144(7.8 ㎞)지점에서는 침식이 많이 발생했으며, 대상구간은 전체적으로 침식성 경향을 나타내고 교각지점에서는 만곡부의 외측 교각에서 더 심한 세굴경향이 나타나는 것을 모의 할 수 있었다. 본 연구에서는 교각과 사행흐름으로 인한 하상변동의 정확한 정량적 해석을 위한 경향 분석을 실시하였으며, 긴 구간에서 교각과 사행하천을 정확히 구현하기 어려운 모형의 한계로 인하여 추후에는 본 연구에서 모의한 결과를 바탕으로 교각부분과 사행부분을 따로 추출하여 더 세밀한 격자를 짜서 분석함으로써 정확한 데이터를 획득 할 수 있을 거라 판단된다.

하천의 홍수시 위험정도를 분석 할 때 하천 전체적

인 분석에는 1차원을 사용하여 경향을 파악하고 사행하천, 하천폭의 변화가 심하거나 합류지점 및 교량이 설치된 부분에 대해서는 2차원 분석을 사용하여 구간별 위험성을 파악하는 것이 필요하다고 판단된다. 2차원 모형을 이용함으로써 1차원 모형에서 모의 할 수 없었던 하천의 사행이나 유사의 횡방향 분포 등의 분석을 개선할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 각 사상에 대한 단기 하상변동 모의만을 수행하였기 때문에 하상변동의 크기가 작고 정확성의 한계를 가질 수 있으므로 하천유지유량을 바탕으로 장기하상변동을 모의한다면 향후 용담댐 방류가 금강 상류의 하도형상에 장기적으로 미치는 영향을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

서일원 (1994). GSTARS 모형을 이용한 하상변동 해석, 대한토목학회 논문집, 제15권 제6호, pp. 1679~1687

이주용 (1999). 하천 흐름과 하상변동의 3차원 모의 및 예측, 연세대학교 대학원 석사학위논문

전라북도 (1996). 금강 진안천 하천정비 기본계획 보고서

제갈선동 (1997). 유사이송의 횡분배와 장기하상변동, 한양대학교 대학원 석사학위논문

한국건설기술연구원 (1992). 금강(용담댐 예정지) 시험 조사 유역에서의 유사량 실측

한국수자원공사 (1991). 용담 다목적댐 건설 토목공사 실시설계

◎ 논문접수일 : 2006년 01월 13일
◎ 심사의뢰일 : 2006년 01월 19일
◎ 심사완료일 : 2006년 03월 06일