

GSTARS2.0 모형을 이용한 장기하상변동의 예측 Long-Term Prediction of Bed Elevation Change Using GSTARS2.0

최 성욱* · 양 원준**

1. 서 론

하상변동은 유수에 의해 이동된 토사가 침식 및 퇴적되어 표고가 변하는 현상으로, 진행기간에 따라 크게 단기하상변동과 장기하상변동으로 나눌 수 있다. 장기하상변동은 유역의 수리특성의 변화 및 댐 건설로 인한 토사 유출량의 감소 등으로 인하여 하상고가 상승하거나 (agradation) 하강하는 (degradation) 것을 의미하며, 단기하상변동은 하천의 통수단면적 축소에 의한 수축세굴, 수중 구조물의 흐름 간섭에 의한 국부세굴과 같은 형태로 나타난다.

장기하상변동은 하천에서의 취수, 배수 등과 같은 하천관리에 직접적인 영향을 주며, 하천 구조물의 안정, 홍수위의 변화, 지하수위의 변화와 같은 하천의 유역관리에 광범위한 영향을 준다. 예를 들어, 상류에 댐을 축조하는 경우 하천의 하류부에서는 유입 유사의 차단에 의해 하상침식이 발생하게 된다. 또한 하천의 유로를 변경하거나 유황이 변화할 경우 이러한 변화가 상·하류에 영향을 미쳐 하상변동이 생기게 된다.

장기하상변동을 예측하기 위한 모형은 크게 준정류 모형 (quasi-steady model), 분리 모형 (decoupled model), 그리고 완전연계 모형 (fully-coupled model)으로 나뉘어진다. 준정류 모형이란 부등류 모형을 사용하여 흐름을 계산한 후 시간 진행에 따른 하상 변동을 산정한다. 홍수파를 충분히 작은 시간 간격으로 나누어 시간간격 사이에는 정상류라는 가정이 유효하게 된다. 분리 모형은 동수역학 방정식과 하상고를 산정하기 위한 Exner방정식을 분리해서 수치해석하는 알고리즘으로, 흐름과 하상이 변하는 특성시간이 크게 다르므로 적용 가능한 방법이다. 완전연계모형은 동수역학 방정식과 Exner방정식을 동시에 해석하는 방법으로 하상변동이 동력학적으로 유수에 영향을 주는 경우에 적용하는 모형이다.

GSTARS2.0 모형은 Molinas와 Yang (1986)에 의해 개발된 GSTARS 모형의 PC 버전으로서 장기하상변동을 수치모의하기 위한 프로그램으로 준정류 모형에 해당한다 (Yang 등, 1998). GSTARS2.0 모형이 HEC-6와 같은 기존의 준정류 모형과 다른 점은 유관 (streamtube)을 사용하며 최소유수력 개념 (total stream power minimization)을 새로 도입하여 하상변동을 산정한다는 것이다. GSTARS2.0 모형은 유관을 사용하여 흐름상태는 준 이차원적으로, 수로 형상의 변화는 준 삼차원적으로 수치모의 할 수 있다. 최소유수력 개념을 이용하여 하천 단면의 횡방향 변화도 고려할 수 있다. 또한 GSTARS2.0 모형은 13 종류의 유사량 산정공식을 사용할 수 있고, 점성토의 이동과 비평형 하상에서의 유사이동 그리고 사면의 안정해석에 관한 수치모의도 수행할 수 있다.

국내에서는 장기하상변동을 수치모의하기 위해서 주로 미 공병단에서 개발된 HEC-6 모형이 사용되고 있으며, 아이오와 대학에서 개발한 IAALUVIAL 모형도 종종 사용되고 있다 (유권규와 우효섭, 1993; 이남주, 1989). 본 연구에서는 최근에 소개되어 다양한 기능으로 관심을 끌고있는 GSTARS2.0 모형을 가지고 장기하상변동을 수치모의하여, 모형의 기능을 확인하고 장단점을 살펴봄으로써 그 적용성을 검토하고자 한다.

* 연세대학교 대학원 사회환경·건축공학부 부교수 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (e-mail: pulipl1@freechal.com)

2. 지배방정식 및 기본이론

2.1 지배방정식

GSTARS2.0 모형은 표준축차계산법을 사용하여 하상 변동량 계산에 필요한 기본적인 수리량 들을 산정한다. 표준축차계산법을 사용하여 배수곡선을 계산하기 위해서는 유입 유량이 정상상태이어야 한다. 그러나 실제 자연하천에서의 유입유량곡선은 시간에 따라 변하는 특성이 있기 때문에 유입 유량 곡선을 이산화시켜 계산시간간격 (Δt)안에서는 흐름이 정상 상태라고 가정하여 사용한다. 해석에 사용되는 에너지 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_t \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, v 는 단면평균된 유속, z 는 하상고, y 는 수심, α 는 에너지 보정 계수, 그리고 h_t 는 단면 사이에서의 총 에너지 손실수두이다. 만약 흐름 상태가 상류에서 하류로 혹은 반대로 변환되는 경우에는 운동량 방정식을 사용하고, 흐름 상태가 바뀌는 천이 흐름이 아닌 경우에는 에너지 방정식을 사용하여 해석한다.

GSTARS2.0 모형에서는 시간에 따른 하상 변동량을 산정하기 위하여 다음과 같은 하상유사 보존방정식인 Exner 방정식을 해석한다.

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{dq_s}{dx} = 0 \quad (2)$$

여기서 t 는 시간, x 는 하류 방향으로의 거리, λ_p 는 공극률, η 는 하상고, 그리고 q_s 는 유입 유사량이다.

2.2 기본 이론

GSTARS2.0 모형은 유관을 사용함으로써 단면에서의 유속분포를 준 이차원적으로 구할 수 있고, 하상변동은 준 삼차원적으로 수치모의 할 수 있다. 유관은 다음과 같은 특성을 가지고 있다. 첫째, 하천에서의 총 유량은 같은 유량을 가지는 유관들로 나뉘진다. 둘째, 유관은 서로 분리되어 있고 하천의 경계와도 분리되어 있다. 셋째, 유관 안에서의 유량은 일정하다. 그리고 서로 다른 유관들끼리의 유체나 유사의 교환은 발생하지 않는다. 유관의 경계는 계산시간 간격마다 각 유관의 통수능이 동일하도록 결정되며, 유관에서의 유사량은 각 시간 간격에 대해서 유관별로 계산된다. 유관의 경계가 계산 시간 간격마다 흐름 방향 및 횡방향으로 변화하므로 하상의 흐름방향과 횡방향 변화를 모두 고려할 수 있게 된다.

GSTARS2.0 모형은 유관을 사용하므로 최소유수력 개념에 의해서 하폭이 변화한다. 최소유수력 개념이란 이동상 하천이 동적인 평형상태를 유지하기 위해서 다음과 같이 정의되는 에너지 소산률이 최소가 되어야 한다는 것이다.

$$\Phi = \Phi_w + \Phi_s = \text{minimum} \quad (3)$$

여기서 Φ 는 총 에너지 소산률, Φ_w 와 Φ_s 는 각각 유수와 유사입자 이동에 의한 에너지 소산율을 나타낸다. 자연 상태의 하천에서는 흐름 상태와 유사량이 변화하기 때문에 동적 평형상태에 도달하기는 매우 어렵지만, 하천 단면, 하상경사, 조도 등을 변화시켜 에너지 소산율이 최소가 되는 상태를 만든다. 자연 하천에서의 유수의 이동에 의한 에너지 소산률이 유사입자의 이동에 의한 에너지 소산률보다 매우 크기 때문에 ($\Phi_w \gg \Phi_s$) 최소 에너지 소산율 이론은 간략화 된 최소유수력 개념으로 바뀌게 된다 (Yang, 1992).

3. 모형의 민감도

GSTARS2.0 모형에서 사용된 유관 수에 따른 계산 결과의 민감도 및 최소유수력 개념의 역할을 검토하기 위하여 수치 실험을 실시하였다. 모의에 사용된 하천의 개략도는 그림 1과 같다. 하천의 길이는 약 1200 m, 평균 경사는 0.0001이며 계산에 사용된 단면은 전체 12개로서 4개의 단면은 그림의 좌·우측에 예로서 도

시하였다. 수치모의에 사용된 유량 및 수위 자료는 그림 2와 같고, 하상 재료의 분포 등에 관한 자세한 내용은 수자원학회 (2001)에 제시되어 있다.

그림 3은 1년 후에 계산된 하상고의 변화를 유관 수에 따라 도시한 것이다. 가로축은 상류단 경계로부터의 거리, 세로축은 하상고를 나타낸 것이다. 유관의 개수가 늘어날수록 전체적인 하상고가 낮아지면서 일정한 값으로 접근하는 것을 알 수 있다. 이것은 통수능이 동일하도록 유관의 경계를 설정하는 GSTARS2.0의 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 홍수터에서는 유속이 작기 때문에 유관의 넓이가 커지게 되고, 하천의 중심 부분에서는 유속이 크기 때문에 유관의 넓이가 홍수터에 비해서 좁게 된다. 그 결과 중심 부분에 위치한 유관에서는 침식이 과대 산정될 수 있는 것이다.

그림 4(a)와 (b)는 최소유수력 개념을 사용하였을 경우, 유관 수가 각각 1개와 3개 일 때 1년 후에 계산된 하상고를 도시한 것이다. 그림 4(a)에서 최소유수력 개념을 사용할 경우 상류단에서 예측된 하상고가 높게 나타나고 있으며, 최소유수력 개념을 사용하지 않을 때보다 계산된 하상고의 연결이 부드러운 것을 확인할 수 있다. 동일한 경향을 그림 4(b)에서도 확인할 수 있다. 그러나 최소유수력 개념을 사용하지 않을 경우, 사용된 유관 수에 따라 모의된 하상고는 약간 다른 결과를 보였으나 최소유수력 개념 사용 시 유관수에 관계없이 비슷한 모의 결과를 얻을 수 있었다.

그림 5는 그림 4(b)의 수치모의 결과 중 단면 No.3의 횡단면 변화를 도시한 것이다. 그림 4(b)의 경우와 마찬가지로 최소유수력 개념을 적용하였을 경우 양안의 홍수터에 비해 주수로에서의 하상변동량이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

표 1은 GSTARS2.0 모형에 의한 수치모의에 소요되는 CPU 시간을 비교한 것이다. 각각의 CPU 시간은 HEC-6에 의한 CPU 시간으로 정규화된 값이다. 표에서 볼 수 있듯이 GSTARS2.0 모형이 HEC-6 모형에 비해 수치모의에 걸리는 시간이 상당히 큰 것을 알 수 있다. HEC-6 모형이 하나의 유관을 사용하는 모형이라는 점을 감안하면, 최소유수력 개념을 사용하지 않아도 약 2 배의 계산시간이 소요된다. 특히 최소유수력 개념을 적용할 경우에는 GSTARS2.0 모형으로 수치모의 하는데 10 배 이상의 계산시간이 필요하다.

표 1. GSTARS2.0 모형의 CPU 시간 비교

	유관 수	최소유수력 개념을 사용하지 않을 경우	최소유수력 개념을 사용한 경우
		CPU time	1.8
	3	3.8	23.2
	5	6.2	44.3

4. 모형의 적용

본 수치모의는 GSTARS2.0 모형의 실제 하천에의 적용성을 살펴보고자 수행하였다. 대청댐은 금강 중류의 대전시 북쪽 협곡 지점에 위치하고 있으며, 1977년 1월에 착공하여 1980년 12월에 완공되었다. 댐의 길이는 495 m, 높이는 72 m 로 콘크리트 중력식 및 석피댐의 혼합형식이다. 저수지 총 담수 용량은 14억 9천만 m³이고 유효 저수량은 7억 9,000만 m³이다. 모형의 실제 적용 구간은 대청댐 하류부, 연장 약 75 km구간으로서 하상이 대부분 세사와 중사로 이루어져 있는 충적하천으로 댐건설에 따른 유사유입 차단에 의한 장기하상변동이 예상되는 구간이다. 수치모의 기간은 1981년 1월 1일부터 1983년 12월 31일 까지 3년간의 하상변동에 대하여 수치모의를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 수문 자료나 하상 재료 등에 관한 자세한 내용은 우효섭과 유권규 (1991)에 제시되어 있다.

그림 6은 GSTARS2.0 모형을 사용하여 댐 완공 3년 후의 하상변동을 모의한 결과이다. 비교를 위하여 HEC-6에 의한 계산결과도 함께 도시하였다. 전반적으로 실측 자료와 수치모의 결과 (GSTARS2.0의 경우는 유관을 1개 사용 시)가 잘 일치함을 알 수 있다. GSTARS2.0 모형의 결과에서 유관의 수를 1 개 사용했을

경우 HEC-6에 의한 결과와 매우 근사함을 알 수 있다. 유관의 수를 3 개로 증가시킬 경우에는 상류 부분에서 하상 저하가 심각하게 발생함을 확인할 수 있다. 이것은 이전의 수치실험에서 확인된 바와 같이 최소유수력 개념을 적용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. GSTARS2.0 모형에서 최소유수력 개념을 사용하여 대청댐 하류부에 적용하기 위해서는 3년 간의 하상변동 모의에 필요한 시간이 150 시간 이상이 소요될 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 최소유수력 개념을 실제 하천에 적용하지 못하였다.

5. 결론

GSTARS2.0 모형은 장기하상변동을 모의하기 위한 수치모형으로 미 개척국의 Molinas와 Yang (1986)에 의해 개발된 GSTARS 모형의 PC 버전이다. 기존에 많이 사용되고 있는 HEC-6 모형과 동일하게 준경류 모형이지만, 유관을 사용하며 최소유수력 개념에 근거하여 흐름은 준 이차원적으로 그리고 변화된 하천 단면은 준 삼차원적으로 모의할 수 있다. 본 논문에서는 GSTARS2.0 모형을 사용하여 간단한 예제와 실제 하천에 적용하여 그 기능을 검토하고 적용성을 살펴보았다.

사용된 유관수에 따른 계산 결과의 민감도를 살펴보았다. 유관의 수를 증가시킬수록 계산된 하상고가 구간에서 수렴해 가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최소유수력 개념을 사용하여 수치모의를 실시한 경우 모의된 하상고가 종단면에서 부드럽게 연결되었으며 사용된 유관 수에 관계없이 일정한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 계산에 사용된 유관 수가 증가할수록 계산시간은 비례해서 증가하였고, 최소유수력 개념의 사용 시 계산시간이 6배 이상 증가하는 것을 확인하였다.

GSTARS2.0 모형을 대청댐 하류부에 적용하여 댐 완공 3년 후의 하상변동을 수치모의 하였다. 유관 수를 1 개 사용했을 때의 결과가 실측치 그리고 HEC-6에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 유관 수를 3 개로 증가하였을 경우에는 오히려 상류부의 하상저하가 심각하게 산정되었다. 본 모의에서 최소유수력 개념을 사용할 경우 계산시간은 약 150 시간 이상 소요될 것으로 예측되어 실제 적용은 불가능하였다.

이상의 연구를 통하여 GSTARS2.0 모형에서 최소유수력 개념의 적용 없이 2 개 이상의 유관을 사용할 경우 유심부의 하상저하를 과대 산정할 수 있음을 보였다. 또한 최소유수력 개념을 사용할 경우 모의된 하상고의 급격한 변화를 제거할 수 있었으나, 이에 필요한 계산시간은 엄청나게 증가하여 사실상의 실제 적용이 불가능한 것을 확인하였다. 또한 모의된 하천 단면의 변화도 토립자의 역학적 운동에 근거하지 않고 있어 실제 발생 가능하다고 보기에는 많은 검증이 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 수자원학회 (2001). 하상변동 수치모의: GSTARS2.0, CCHD2D, 제 9회 수공학워크샵, 한국수자원학회.
- 이남주 (1989). "LALLUVIAL을 이용한 한강 하상변화의 예측." 공학석사학위논문, 서울대학교.
- 유권규, 우효섭 (1993). "HEC-6 모형을 이용한 대청댐 하류의 하상변동예측." 토목학회 논문집, 13(5), 157-163.
- 우효섭, 유권규 (1991). 하상변동 예측모형의 비교분석, 한국건설기술연구원.
- Hydrologic Engineering Center, (1993). *HEC-6: Scour and deposition in river and reservoir. User's Manual*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Molinas, A. and Yang, C.T. (1986). *Computer Program User's Manual for GSTARS (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation)*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- Yang, C.T. (1992). "Force, energy, entropy, and energy dissipation rate." *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Kluwer Academic Publisher.
- Yang, C.T., Trevino, M.A., and Simoes, J.M. (1998). *User's Manual for GSTARS 2.0(Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 2.0)*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.

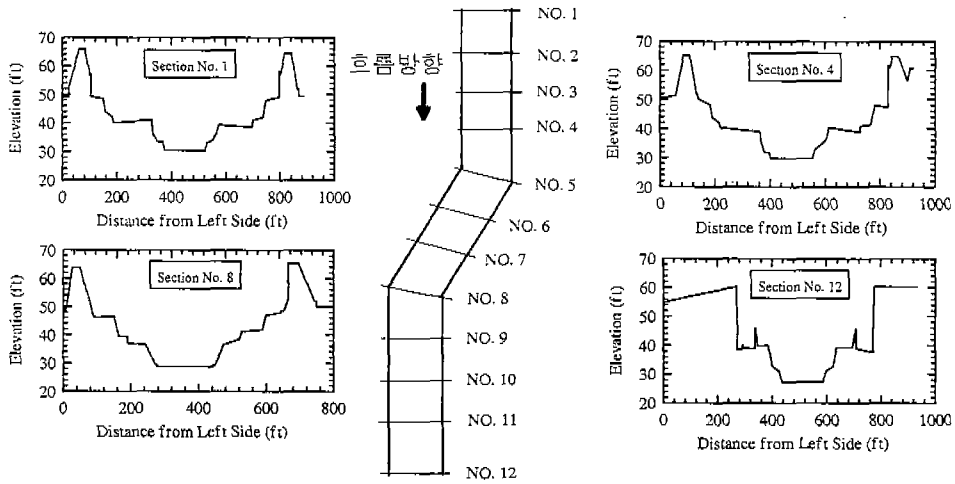


그림 1. 대상하천의 개략도

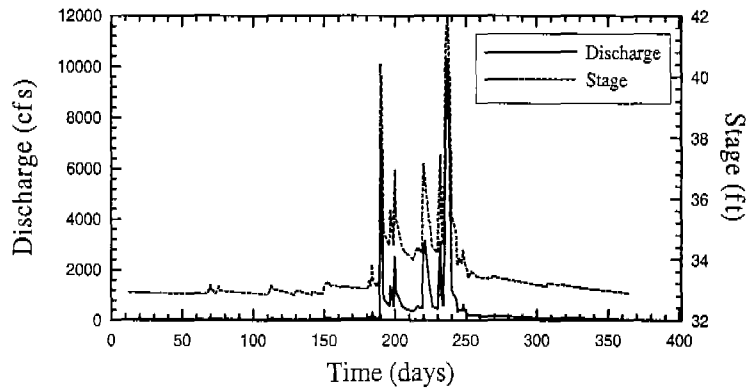


그림 2. 수치모의에 사용된 유량 및 수위자료

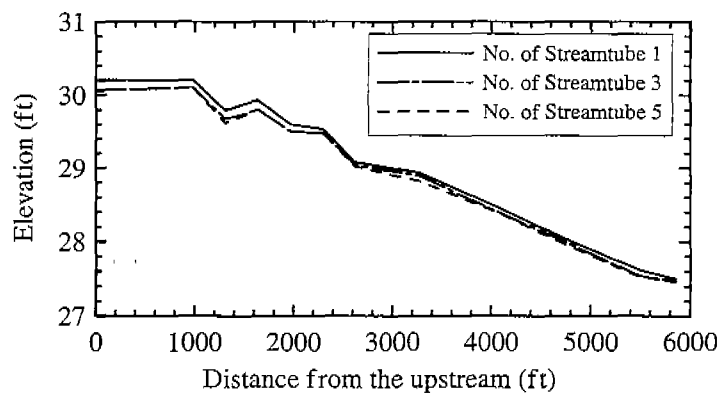
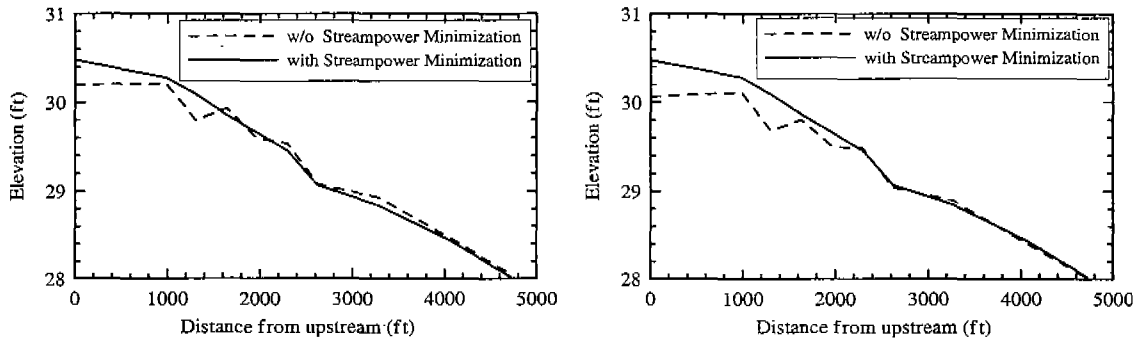


그림 3. 유관 수에 따른 하상고의 변화



(a) 유관의 수: 1 개

(b) 유관의 수: 3 개

그림 4. 최소유수력 개념을 적용했을 경우 수치모의 결과

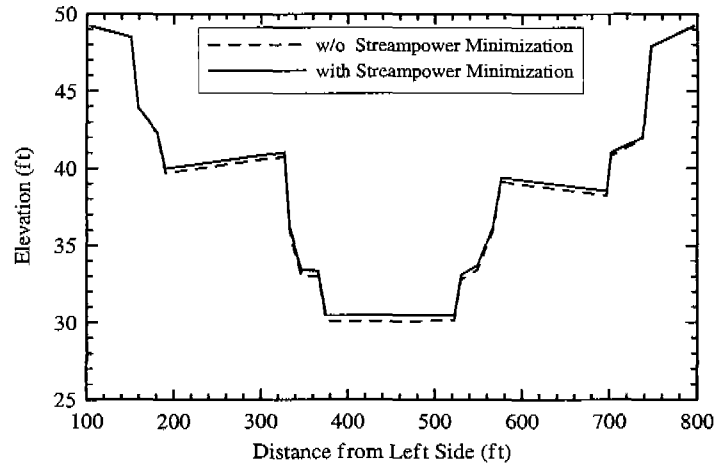


그림 5. 최소유수력 개념을 적용했을 경우 횡단면 수치모의 결과 (유관 수: 3 개)

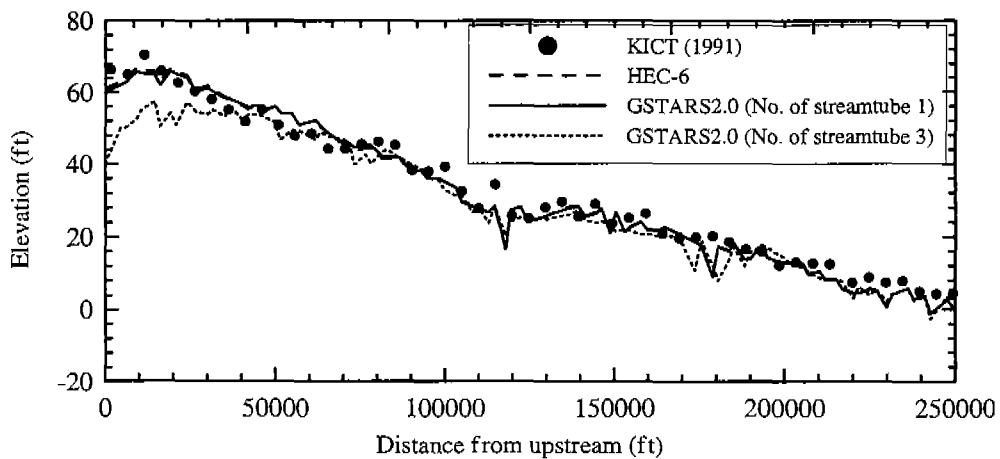


그림 6. 3년 간의 수치모의 결과와 실측자료와의 비교