수치모형을 이용한 지천하류부의 하상변동 분석

Numerical Analysis of Riverbed Changes at the Downstream of the Ji-Cheon

최 호* · 임창수** · 정재욱***

Choi, Ho · Rim, Chang-Soo · Jung, Jae Wook

Abstract

River bed variation drops storage capacity of dams and reservoirs, and furthermore deteriorates safety of banks and peers. Therefore, understanding of bed variation is important to use and manage river water. Study section is downstream part of Ji-Cheon nearby Ji-Cheon Bridge which is located in Gum river basin. The river surveying at fourteen places with the length of 1,320m were undertaken on November 7, 2003 and September 24, 2004, and the results of river surveying were analyzed for the study. Real bed variation was compared with the simulation results of HEC-6 and GSTARS 3.0. Cross section data for the simulation of HEC-6 and GSTARS3.0 were composed of the basis of river surveying data on November 7, 2003. Hydrological data were acquired from Gu-Ryong watermark located at Ji-Chun Bridge. The research results revealed that when using Toffaleti equation, simulation results of two models were similar to the real bed variation. The bed variation simulated by using GSRARS 3.0 with only one stream tube was similar to the real bed variation. The bed variation simulated by using two models(HEC-6 and GSTRARS 3.0) with Toffaleti equation was also similar to the real bed variation. Therefore, it is expected that HEC-6 and GSTARS 3.0 models have applicability to predict the bed variation at the downstream of Ji-Cheon.

Key words : HEC-6, GSTARS, Ji-Cheon, River bed variation

요 지

하상의 변동은 저수지와 취수용 보 등 저류용도의 구조물의 저류능력을 감소시키고 제방과 교각의 안전도를 저하시키거나 하천시설물의 사용에 문제를 발생시킨다. 따라서 하상의 변동양상을 파악하는 것은 이수, 치수 및 하천환경면에서 모두 중요하다. 본 연구에서는 충청남도 부여군 은산면 회곡리에 위치한 지천교 부근의 지천 하류부를 대상구간으로 선정하였다. 2003년 11월 7일에 총길이 1,320m의 구간에서 14개의 지점을 중 · 횡단 측량하였고, 2004년 6월 24일과 2004년 9월 24일에 같은 구간을 다시 측량하여 약 1년 동안 실제하상의 변화를 분석하였다. 이 결과를 1차원 HEC-6 모형과 준2차원 GSTARS 3.0 모형의 계산결과와 비교 · 분석하였다. 계산을 위한 지형자료는 2003년 11월 7일의 하천 측량 자료를 이용하여 구성하였으며, 상류단 유입유량과 하류단 수위-유량자료는 지천교의 구룡수위표 자료를 이용하였다. 모형의 적용결과 유사량 산정공식은 Toffaleti공식이 다른 유사량 공식에 비해 지천하류부의 최심하상 변동을 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. GSTARS 3.0 모형의 경우, 전반적으로 유관 1개를 사용하여 계산한 결과가 유관 3개, 5개를 사용한 결과보다 실측치에 근접하였으며, 지천과 같이 흐름폭이 넓지 않은 하천에서의 GSTARS 3.0 모형은 유관 개수가 여러 개일 때 적용성이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 지천하류부의 대상구간에 HEC-6와 GSTARS 3.0 모형의 계산결과와 1년간 하상변동에 따른 측량성과의 비교 결과, 실측 최심하상과 큰 차이를 나타내지는 않는 것으로 분석되어, 지천하류부의 하상변동 예측에 적용성이 있다고 판단된다.

핵심용어 : HEC-6, GSTARS, 지천, 하상변동

1. 서 론

유수의 흐름은 유사의 이동을 발생시켜 하상변동의 원인이 된다. 그에 따라 달라진 하상의 형태는 새로운 흐름을 형성하고 다시 하상의 변동을 발생시킨다. 이러한 물과 유사의 장기간의 상호작용에 의해 하천의 하상은 더 이상의 큰 변화

를 일으키지 않는 동적평형상태로 접근하게 된다. 그러나 산사태나 대규모 홍수 등의 자연적인 요인과 댐이나 교량의 건설 등의 인위적인 요인에 의하여 평형을 유지하던 하상은 유사의 과잉공급이나 유사 공급의 차단에 의해 불안정해지고 다시 일정 기간의 침식과 퇴적과정을 거쳐 새로운 평형상태로 접근하게 된다. 자연하천의 임의의 구간에 대한 하상의

*농림수산식품부 인천어항사무소 (E-mail : toyou012@hanmail.net)

**경기대학교 토목공학과 부교수 (교신저자)

***한국방재기술센터 센터장

변화를 생각해보면 임의의 구간으로 들어온 유사량과 빠져나간 유사량의 차이에 의해 그 구간의 하상의 상승이나 저하가 발생하고 이것을 하상변동이라고 한다. 하상의 변동은 저수지와 취수용 보 등 저류용도의 구조물의 저류능력을 떨어뜨리고, 제방과 교각의 안전도와 하천시설물의 적합한 사용에 문제를 일으키는 등의 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 하상의 변동을 적절히 예측하는 것은 이수·치수적인 면에서 모두 중요하다고 할 수 있다. 하천의 임의 구간에서의 하상변동 예측모형 적용에 있어서 유입되는 유사량은 중요한 변수이고, 따라서 각 하천 유사량의 정량적인 파악은 하천계획과 관리에 반드시 필요하다고 할 수 있다. 직접 실측하는 방법이 하천 유사량을 파악하기에 가장 좋은 방법이겠지만 직접 실측하는 방법은 많은 인력과 비용 그리고 시간이 소요되며 측정도 용이하지 않으므로, 측정이 비교적 용이한 몇 가지 수리량 자료와 하상도 자료를 여러 유사량 산정공식에 적용하여 유사량을 산정하고 있다. 하지만 국내에서 여러 유사량 산정공식으로 얻어낸 유입 유사량을 실제 하천에 적용함에 따른 각각의 하상 변동량의 차이와 실제 하상변동 현상과의 차이점을 분석하여 연구한 경우는 매우 드물다. 본 연구에서는 금강수계의 지천하류부에 하상변동 예측모형을 사용하여 몇 가지의 유사량 산정공식으로 얻은 유사량을 모형에 적용하여 하상변동을 모의하고, 그 결과를 측량성과를 통한 실제 하상변동량과 비교·분석하고자 한다.

국외에서의 하상변동 예측에 대한 연구는 1970년대에 들어 활발히 전개되었다. 프랑스의 SOGREAH에서 개발한 CHAR-series가 최초의 수학모형이며, 이후 Chang 등은 FLUVIAL-11(1976)을 개발하였고, 이 모형은 다시 FLUVIAL-12(1993)로 발전되었다. 1980년대에는 Karim과 Holly(1983)에 의해 IALLUVIAL 모형이 사용되었고, Yang(1986)에 의해 BRALLUVIAL 모형이 개발되었으며, BRALLUVIAL 모형은 다시 하천에서의 하상변동예측이 가능하게 발전하였다. 1990년대에 들어 Tingsanchali(1996)는 실험실 연구를 통해 HEC-6모형의 적용성을 검증하여 급변 부동류에서 하상변동 예측의 정확성이 다소 떨어진다고 보고한 바 있으며, Yang(1998)은 GSTARS 2.0 모형을 소개하고 적용성을 검토하였다. Gary Parker(2000)등은 Exner 방정식이 유사혼합을 설명하는 데에도 적용성이 있다고 제시하였으며, Sharad Kumar Jain(2000)은 인공신경망 방법을 사용하여 수학적표현을 단순화시키기도 하였다.

국내에서는 1970년대 유사량 산정에 관한 기본적인 연구가 시작되었으며(남선우, 1977), 1980년대에 이르러 이에 관한 연구는 다양하게 전개되어 왔다. 박정웅(1984)은 St. Venant 식을 FDM으로 해석한 하상변동 예측모형을 개발하여, 홍수에 의한 한강 하류부(고안-인도교)의 단기적 하상변동을 해석하였다. 박상덕(1989)은 Preissmann의 4점 음해법을 이용하여 St. Venant식을 차분하고, Toffaletti의 유사량 공식(1968)을 이용하여 모형을 개발하고 한강 하류부에 적용하였다. 이남주(1989)는 IALLUVIAL 모형을 한강하류부에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 1990년대 이르러서는 HEC-6, MOBED 등에 관한 연구 성과 등이 발표된 바 있으며(유권규, 우효섭,

1990, 김영성, 1993), 정재욱 등(1994, 1997)은 KINEROS 모형에 관한 일반적인 특성을 분석한 후 유사량 산정공식, 유역의 분할수 등이 하상변동에 미치는 영향을 분석하였다. 이재수와 윤용남(1995)은 CHARIMA 모형을 한강 인도교 지점부터 광장교 지점까지 적용하여 유사의 이동에 따른 하상변동을 모의하였다. 한건연 등(1999)은 부여취수장 부근에서의 하상변동에 대해 2차원 수치모의를 수행한 바 있으며, 이삼희 등(2005)은 하상재료 입도분포를 통한 임진강의 하상변동 특성을 조사한 바 있다. 또한 지운 등(2010)은 낙동강 상류 접근수로에서 유사량공식 및 유사 이송형태에 따른 하상변동을 분석하였다.

본 연구에서는 HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형을 사용하여 유사량 산정공식별 하상변동량을 파악하고, 실제 지천하류부의 하상변동량과의 차이를 비교·분석하였다(최호, 2005; 최호 등, 2005). 연구대상구간은 충청남도 부여군 은산면 회곡리에 위치한 지천교 부근의 지천 하류부이며, 2003년 11월 7일에 총길이 1,320m의 구간에서 14개의 지점을 중·횡단 측량하였고, 2004년 6월 24일과 2004년 9월 24일에 같은 구간을 다시 측량하여 약 1년 동안의 하상의 변화를 파악하였다. 하상재료의 구성을 파악하기 위하여 12개 지점의 하상재료를 채취하여 체가름 시험을 통하여 입도분포곡선을 얻었다. HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형의 계산을 위한 단면 자료는 2003년 11월 7일의 하천 측량 자료를 토대로 구성하였고, 수치모형의 계산에 필요한 상류단의 유입유량과 하류단의 수위-유량자료는 지천교의 구공수위표 자료를 바탕으로 하였다. HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형의 유입 유사량은 공식별로 유사량을 계산하여 모형에 적용하였다. 두 모형 모두 대상구간의 유사량 산정식은 유입 유사량 계산과 동일한 관계식을 사용하였다.

2. 기본이론

2.1 HEC-6 모형

HEC-6 모형은 미공병단 수문연구센터(U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center)의 W.A. Thomas 등이 개발한 수치모형이다. HEC-6 모형의 사용목적은 하천이나 얇은 저수지의 침식과 퇴적에 따른 거시적인 하상변동을 분석하고 예측하기 위함이다. HEC-6 모형은 1차원 개수로 수치모형으로 연속된 수문자료는 각 시간단계에서 일련의 정상 유량의 흐름으로 적용한다. 표준축차방법으로 에너지방정식과 연속방정식을 풀어 각 유량에 대한 배수위 수면곡선을 계산하고, 유사운송능을 계산하는데 필요한 수리변수들인 유속, 수심, 하폭 및 에너지경사를 얻어 각 단면별로 유사운송능을 계산한다. 이 운송능과 흐름사상의 지속시간을 이용하여 각 구간별로 유사부피의 증감을 계산하여, 각 단면의 침식과 퇴적을 계산하고 단면의 형태를 조절한다. 앞의 계산에서 수정된 하천단면을 이용하여 위의 과정을 다음 흐름사상에 대하여 계산하며, 이러한 과정을 마지막 흐름사상까지 반복한다. HEC-6 모형에서 사용하고 있는 지배방정식은 연속방정식, 에너지방정식, 유사의 연속방정식이며, 식 (1)~(3)

과 같다.

$$\frac{dQ}{dx} = q_l \quad (1)$$

$$\left[y + \frac{aQ^2}{2gA^2} \right]_{i-1} = \left[y + \frac{aQ^2}{2gA^2} \right]_i + H_L \quad (2)$$

$$\frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial Q_s}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

여기서, Q =유량, q_l =단위폭당 측방유량, Q_s =부피로 표시된 유사량, B =이동상 하상의 표고, z =하상고, α =속도수두 보정 계수, A =단면적, H_L =단면 $i-1$ 과 i 사이의 수두손실, λ =하상도의 공극률이다.

2.2 GSTARS 3.0 모형

GSTARS 3.0 모형은 Molinas와 Yang에 의해 개발된 하상변동 수치모형이다. HEC-6 모형이 유한차분법에 근거하는 것과는 달리 GSTARS 3.0 모형은 유관모형(stream tube model)을 사용한다(표 1). 일차원 유관모형에 근거한 GSTARS3.0 모형은 흐름상태를 준 이차원적으로, 수로형상의 변화는 준 삼차원적으로 모의할 수 있다. 그러나 완전한 이차원, 삼차원 모형처럼 어느 특정한 상황을 정확하게 모의할 수는 없다. 또한 일차원 유관 모형으로서 이차흐름(secondary current), 확산현상, 편수위상승(superlevation)을 고려할 수 없다. GSTARS3.0 모형은 표준축차계산으로 수면곡선을 계산하여 기본적인 수리량을 얻은 뒤, 하천을 흐르는 유량은 각 계산 시간 간격마다 유관들의 통수능이 동일하도록 유관의 경계를 결정하며, 유관에서의 유사량은 각 시간 간격에 대해서 유관 별로 계산된다. 유관의 경계가 계산 시간 간격마다 흐름 방향 및 횡방향으로 변화하므로 하상의 흐름방향과 횡방향 변화를 고려할 수 있게 된다. GSTARS3.0 모형에서 사용하고 있는 지배방정식은 연속방정식, 에너지방정식, 운동량방정식 그리고 유사의 연속방정식이다. 식(4)는 운동량 방정식을 나타내며, 식(5)는 유사의 연속방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{Q_f}{g}(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = p_1 - p_2 + W \sin \theta - F_f \quad (4)$$

여기서, r 은 물의 비중, β 는 운동량 보정계수, p 는 압력, W 는 단면 1과 2사이에 있는 물의 중량, θ 는 하상 경사, 그리고 F_f 는 하천 경계를 따라서 작용하는 외부 마찰력이다. 하상 경사가 매우 작고($\sin \theta = 0$) $\beta_1 = \beta_2 = 0$ 라고 가정하면, 식(4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{Q^2}{A_1 g} + A_1 \bar{y}_1 = \frac{Q^2}{A_2 g} + A_2 \bar{y}_2 \quad (5)$$

여기서, y 는 수면에서 단면의 무게중심까지의 거리이다. 일차원 유사량 보존방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \eta \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad (6)$$

수치모형을 이용한 지천하류부의 하상변동 분석

표 1. HEC-6와 G-Stars 모형 비교

HEC-6(미 공병단, 1977)	G-Stars(미 개척국, 1986)
<ul style="list-style-type: none"> 1차원 준정상류 모형(표준축차법) 장기하상변동 모의 흐름계산과 유사이송계산의 비연계모형 하상 장갑화 모의 하천단면은 고정상과 이동상으로 구분하여 모의가능 실측유사량을 포함하여 12개의 유사량공식 이용가능 다지 하천에서 유사 이송 모의 미립 토사의 재부유 모의 	<ul style="list-style-type: none"> 1차원준정상류 모형(준2차원 표준축차법) 흐름계산과 유사이송계산의 비연계모형 하상 장갑화 모의 단일 하천에서 유사이송 모의 급변류나 부정류는 모의할 수 없음. 일차원 유관모형 -이차흐름, 확산현상, 편수위상승 등 고려할 수 없음.

여기서, $\eta = 1 - \lambda$ (여기서, λ 는 공극률), A_d 는 소류사의 부피(단위길이당), A_s 는 부유사의 부피(단위길이당), Q_s 는 유입유사량, 그리고 q_s 는 측방향 유사유입량이다.

2.3 유사량 산정식

2.3.1 Toffalieti 공식(1969)

Toffalieti의 공식은 Einstein(1950)과 Einstein과 Chen(1953)의 기본 가정인 “수로는 사각형이며, 전체 수심은 4개의 영역으로 나뉘어진다”는 기본 가정을 따른다. 기본 가정에 의한 유사량 공식은 식(7)과 같다.

$$Q_{ti} = B(q_{bi} + q_{sui} + q_{smi} + q_{sli}) \quad (7)$$

여기서 Q_{ti} 는 유사 입경 d_i 에 대한 하상 유사량, B 는 수로 폭, q_{bi} 는 bed zone에서의 유사량, q_{sui} 는 upper zone에서의 유사량, q_{smi} 는 middle zone에서의 유사량, 그리고 q_{sli} 는 lower zone에서의 유사량이다.

2.3.2 Shen과 Hung 공식 (1971)

Shen과 Hung은 유사이송이 너무 복잡하여 어떤 조건하에서도 Reynolds수나 Froude수 혹은 이들 둘을 조합하여 유사 이송을 설명할 수 없다고 가정하였다. 이러한 유사 이송과 관련된 변수를 구하는 대신에 그들은 실험실에서 모래입경을 근거로 얻은 587개의 자료를 분석하여 식(8)과 같은 회귀식을 도출하였다.

$$\log C_i = -107,404.459 + 324,214.747 \times Y - 326,309.589 \times Y^2 + 109,503.872 \times Y^3 \quad (8)$$

$$Y = \left[\frac{V S^{0.57}}{w^{0.32}} \right]^{0.0075}$$

여기서 C_i 는 총 평균 유사농도, V 는 평균 유속, S 는 수면경사 그리고 w 는 D_{50} 에서 유사의 침강속도이다

2.3.3 Yang의 모래(1973)와 자갈(1984) 이동 공식

하상이 모래인 경우 Yang의 무차원화된 단위 유수력 공식은 식(9)와 같다(Yang, 1973).

$$\log C_{ts} = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (9)$$

여기서 C_{ts} 는 유사 농도(ppm by weight), ω 는 유사 입자의 침강속도, d 는 유사입자의 직경, ν 는 물의 동점성계수. VS 는 단위 유수력($=\gamma QS$), V 는 평균유속, S 는 수면경사 혹은 에너지경사, U_* 는 전단속도 그리고 V_{cr} 은 하상입자가 초기운동을 할 때의 유속이다.

하상이 자갈인 경우에는 식(10)과 같은 공식을 사용한다.

$$\log C_{tg} = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d}{\nu} - 4.816 \log \frac{U_s}{\omega} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.282 \log \frac{U_s}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (10)$$

여기서 C_{tg} 는 총 유사농도(ppm by weight)

2.3.4 Engelund와 Hansen 공식(1972)

본 연구에서 사용된 Engelund와 Hansen(1972)의 공식은 다음과 같다.

$$f' \Phi = 0.1 \theta^{5/2} \quad (11)$$

$$f' = \frac{2gSD}{V^2} \quad (12)$$

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s} \left[\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g d^3 \right]^{-1/2} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (14)$$

여기서 g 는 중력가속도, S 는 에너지 경사, V 는 평균유속, q_t 는 단위폭당 총 유사량, γ_s 는 유사비중, γ 는 물의 비중, d 는 유사 중양값, D 는 평균 수심, 그리고 τ 는 하상 전단력이다.

3. 모형의 적용

3.1 지형 및 수문자료

연구대상구간은 충청남도 부여군 은산면의 신대리와 회곡리 부근의 지천 하류부이며, 2003년 11월 7일에 총연장 1,320m의 구간을 중·횡단 측량하였고, 2004년 6월 24일과

그림 1. 최심하상고 변화

그림 2. 지천수위표 유량 자료

그림 3. 지천수위표 수위 자료

2004년 9월 24일에 같은 구간을 다시 측량하여 약 1년 동안의 하천지형의 변화를 파악하였다. 그림 1과 표 2는 2003년 11월 1일과 2004년 9월 24일 사이의 횡단면과 최심부 하상의 측량결과에 의한 변동을 나타낸 것이다. 약 1년 사이 하상의 변화량은 큰 변동을 보이지 않고 있다. 큰 변화는 아니지만 대부분의 단면에서 하상이 침식된 모습을 볼 수 있다.

그림 2와 그림 3은 모의에 적용한 수위와 유량 자료이며 지천교에 있는 구룡수위표의 자료이다. 수위와 유량자료는 한 시간 간격이며, 적용구간에서 지류의 유입은 고려하지 않았다.

하천의 상류경계나 지류 유입점에서 흘러 들어오는 유사 공급량을 유입유사량이라고 한다. 연구대상구간의 유입유사량은 Toffaleti공식, Shen & Hung공식, Yang공식, Engelund

표 2. 최심하상고 변화 (m)

하류단으로부터 거리(m)	0	120	215	265	325	375	465	565	665	775	905	1,035	1,150	1,320
1차측량 2003년 11월 7일	5.28	5.34	6.1	6.68	6.6	6.96	6.79	6.76	6.84	7.08	7.39	7.45	8.29	9.11
2차측량 2004년 6월 24일	5.06	5.96	6.01	6.51	6.39	6.72	6.72	6.62	6.62	6.99	7.26	7.29	8.23	8.82
3차 측량 2004년 9월 24일	4.97	5.83	5.94	6.58	6.44	6.65	6.76	6.74	6.82	7.09	7.21	7.13	8.4	8.77

표 3. 유사량 산정공식으로 계산된 유량별 유입유사량 (t/day)

유사량공식 유량(m³/s)	Engelund & Hansen	Shen & Hung	Toffaleti	Yang
0.5 cms	6.6	0.464	0.000141	17.4
1 cms	15.7	2.18	0.00064	40.4
10 cms	297	174	0.0709	694
30 cms	868	584	0.439	2020
85 cms	2920	2060	2.13	6550
147 cms	4410	2640	3.73	10200
230 cms	6710	4640	9.38	15600
403 cms	8230	5720	25.2	20500
640 cms	16100	8210	29.3	39100

& Hansen 공식으로 구하여 수치모형에 적용하였다. 공식에 사용된 수심, 에너지경사 등의 수리량은 HEC-RAS 모형의 부등류 계산을 통하여 유량별로 산정하였다. 모형에 적용한 각 유량별 유입유사량은 표 3과 같으며 Toffaleti 공식으로 계산한 유사량이 가장 적었고, Yang 공식으로 얻은 유사량이 가장 크게 나타났다. 이 차이들은 공식을 얻어내는 과정에서 발생한 결과이다. 산정공식별 유입 유사량을 수치모형에 적용하여 실제 하상변동양상과 비슷한 결과를 얻어낸 산정공식이

지천하류부에 적용성이 가장 좋은 유사량 공식으로 평가될 수 있을 것이다.

3.2 수치모형의 적용

하상변동 예측모형인 HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형을 연구대상구간에 적용하여 그 결과를 약 1년간의 실제 측량성과와 비교 분석하였다. 지형자료는 각 모형의 입력형식에 맞추어 횡단면, 조도계수 등을 입력하였고, 수문자료는 한 시간 간격의 수위유량자료를 적용하였다. 유사자료는 유사량 공식별로 계산된 유입 유사량을 각 모형의 입력형식에 맞추어 적용하였고, 대상구간의 유사운송능을 계산하는 유사량 공식은 유입 유사량을 산정한 공식과 같은 공식을 선택하여 적용하였다. 계산시간간격은 한 시간으로 하였고, 하나의 계산시간 간격에서의 유사 연속방정식의 계산 횟수는 모형이 안정한 값을 얻어낼 수 있도록 각 조건별로 적절히 정하였다. 유관 모형인 GSTARS 3.0 모형의 유관의 개수는 1개, 3개, 5개로 달리하여 모의하여 결과를 비교, 분석하였다.

3.2.1 HEC-6 모형

그림 4는 실제 하상변동량과 모형의 계산결과를 비교한 것이며, 표 4는 침식 및 퇴적량을 나타낸 것이다. 유사량 산정 공식을 달리하여 계산한 결과 값들은 큰 차이를 나타내지는

그림 4. HEC-6 모의결과

표 4. HEC-6 모형에 의한 하상변동량 (m)

하류단으로부터 거리(m)	120	215	265	325	375	465	565	665	775	905	1,035	1,150	1,320
Toffaleti	-0.07	0.36	0.02	-0.23	-0.04	-0.11	-0.05	-0.01	0.10	0.11	0.11	0.29	-0.37
Yang	0.09	0.34	-0.07	-0.27	-0.30	-0.18	-0.07	0.14	0.23	0.24	0.16	0.30	-0.62
Engelund & Hansen	0.07	0.33	-0.08	-0.27	-0.30	-0.19	-0.11	0.11	0.20	0.20	0.13	0.26	-0.61
Shen & Hung	0.03	0.38	0.02	-0.27	-0.13	-0.07	-0.08	0.04	0.12	0.13	0.12	0.35	-0.54

않았다. 모의기간동안 하상변동에 큰 영향을 주는 사건이나 큰 규모의 유량이 발생하지 않았기 때문에 판단된다. Toffaleti 공식의 적용결과 하상의 변화는 $-0.37\text{m} \sim 0.36\text{m}$ 의 범위에서 최심하상의 변화를 나타냈고(표3), Yang공식의 경우에는 $-0.62\text{m} \sim 0.34\text{m}$, Engelund & Hansen공식은 $-0.61\text{m} \sim 0.33\text{m}$, Shen & Hung공식은 $-0.54\text{m} \sim 0.38\text{m}$ 등으로 나타났다. HEC-6 모형의 적용결과, 값들의 차이가 크지는 않지만 Toffaleti공식을 적용하여 모의한 결과가 다른 공식에 비해 실제 최심하상 변화값에 근접하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2.2 GSTARS 3.0 모형

그림 5~그림 7은 유관별 모형의 계산결과를 비교한 것이며, 표 5는 수치모의에 의한 유관별 침식 및 퇴적량을 나타낸 것이다. 유관 1개를 사용하여 GSTARS 3.0 모형을 적용한 결과 값들은 HEC-6 모형의 결과 값과 유사하며, 또한 실측

치와 큰 차이를 나타내지는 않고 있다. Toffaleti 공식의 적용결과 하상의 변화는 $-0.36\text{m} \sim 0.33\text{m}$ 의 범위에서 최심하상의 변화를 나타냈고, Yang공식을 적용하여 모의한 결과는 $-0.34\text{m} \sim 0.66\text{m}$ 의 최심하상변동을 나타내었다. Engelund & Hansen공식을 적용하여 모의한 결과는 $-0.47\text{m} \sim 0.34\text{m}$ 를 나타내었고, Shen & Hung공식은 $-0.38\text{m} \sim 0.20\text{m}$ 의 최심하상의 변동을 보였다.

유관 3개를 사용하여 GSTARS 3.0 모형을 계산한 값들은 유사량 공식별로 많은 차이를 나타냈다. Toffaleti 공식의 적용결과 하상의 변화는 $-0.37\text{m} \sim 0.08\text{m}$ 의 범위에서 최심하상의 변화가 있었고, Yang공식의 경우에는 $-2.11\text{m} \sim 0.21\text{m}$ 의 최심하상변동을 나타내었다. Engelund & Hansen공식은 $-6.65\text{m} \sim 5.29\text{m}$, Shen & Hung공식은 $-3.24\text{m} \sim 0.15\text{m}$ 의 최심하상의 변동을 보였고, Toffaleti 공식을 제외한 나머지 유사량 공식들은 3개의 유관을 사용하여 모의하였을 경우에 결과 값이 실측값과

그림 5. GSTRAS 모의 결과 (유관 1)

그림 6. GSTRAS 모의 결과 (유관 3)

그림 7. GSTRAS 모의 결과 (유관 5)

표 5. GSTRAS3.0 모형에 의한 유관별 하상변동량 (m)

하류단으로부터 거리(m)		120	215	265	325	375	465	565	665	775	905	1,035	1,150	1,320
유관 1	Toffaleti	-0.08	0.11	-0.36	0.08	0.04	-0.03	-0.12	0.00	0.03	0.14	0.03	0.10	-0.34
	Yang	-0.12	0.14	-0.18	-0.34	-0.11	-0.18	0.08	0.25	0.37	0.41	0.45	0.66	0.12
	Engelund & Hansen	0.13	0.34	-0.13	-0.47	-0.13	-0.23	0.00	0.14	0.25	0.23	0.18	0.28	-0.31
	Shen & Hung	-0.27	0.11	-0.24	-0.33	-0.08	-0.11	0.00	0.09	0.17	0.20	0.15	0.19	-0.38
유관 3	Toffaleti	0.03	-0.06	-0.37	0.03	-0.13	-0.02	-0.08	-0.02	0.01	0.08	-0.05	-0.06	-0.22
	Yang	-0.31	-0.45	-0.49	-1.82	-1.45	-2.11	-1.22	-1.63	-0.94	0.21	-0.48	-0.25	-0.02
	Engelund & Hansen	-1.55	-2.70	-2.35	-6.65	-4.28	-2.85	-5.06	-3.49	-1.50	-3.01	-4.01	-2.71	5.29
	Shen & Hung	0.15	-0.29	-0.34	-2.79	-1.73	-3.24	-1.37	-0.14	-1.09	-0.29	-1.44	-0.44	-0.72
유관 5	Toffaleti	0.85	0.71	0.00	0.04	0.83	0.81	0.91	0.91	0.99	0.34	-5.24	0.00	0.00
	Yang	-0.11	-0.74	-1.58	-5.47	-2.63	-2.50	-2.24	-1.09	-1.04	-2.40	-1.01	-1.06	0.01
	Engelund & Hansen	-3.65	-4.86	-5.46	-3.62	-5.25	-3.85	-4.41	-5.88	-3.13	-3.01	-3.63	-4.32	-5.52
	Shen & Hung	-1.88	-0.36	-4.80	-2.35	0.32	-3.63	-1.20	-2.48	-0.89	0.06	-0.72	-0.24	-1.87

상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

유관 5개를 사용하여 GSTRAS3.0 모형을 계산한 결과 값들은 유관 3개를 사용한 경우와 같이 유사량 공식별로 많은 차이를 보이고 있다. Toffaleti 공식의 적용결과 하상의 변화는 -5.24m~0.99m의 범위에서 최심하상의 변화를 나타냈고, Yang 공식은 -5.47m~0.01m, Engelund & Hansen 공식은 -5.52m~-3.01m의 최심하상의 변동이 나타났다. Shen & Hung공식을 적용하여 모의한 결과는 -4.80m~0.32m의 최심하상의 변동을 보였다.

4. 비교 및 고찰

그림 8은 실측된 최심하상고와 HEC-6를 이용한 수치모의 결과를 비교한 것이다. 유사량 산정공식을 달리하여 HEC-6 모형을 적용한 결과 큰 차이를 나타내지는 않았다. 모의기간 동안 하상변동에 큰 영향을 주는 사건이나 큰 규모의 유량이 대상구간을 흐르지 않은 것에 따른 현상으로 평가된다.

Toffaleti 공식의 적용결과 -0.48m~0.61m의 범위에서 실측치와 차이를 보이고 있다. Yang공식을 적용한 결과는 -0.73m~0.62m의 범위에서 차이가 나타났으며, Engelund & Hansen 공식은 -0.72m~0.58m, Shen & Hung공식은 -0.65m~0.67m 사이에서 실측치와 차이가 나타났다. HEC-6 모형 적용결과 값들의 차이가 크지는 않지만 Toffaleti공식을 적용하여 모의한 결과가 다른 공식을 사용하여 모의한 결과보다 실제 최심하상 변화 값과 근접한 값을 얻고 있는 것을 알 수 있다.

그림 8. 실측치와 수치모의 결과 비교(HEC-6)

그림 9. 실측치와 계산치 비교(GSTARS3.0)

그림 9는 실측된 최심하상고와 GSTARS를 이용한 수치모의 결과를 유관 및 유사량 공식에 따라 비교한 것이다. 유관 1개를 사용하여 GSTARS 3.0 모형을 계산한 결과, HEC-6 모형의 계산치와 유사하게 나타났으며, 실측치와의 차이도 작게 나타났다. Toffaleti 공식의 적용결과 -0.45m~0.42m, Yang공식은 -0.35m~0.98m, Engelund & Hansen공식 -0.42m~0.60m, Shen & Hung공식을 적용한 결과는 -0.49m~0.51m 사이에서 그 차이를 보이고 있다. 적용결과 Toffaleti 공식을 사용한 결과값들이 전반적으로 실측치와 가장 근접하게 나타나고 있다. 유관 3개를 사용하여 GSTARS 3.0 모형을 계산한 결과는 유사량 공식별로 많은 차이를 나타내었다. Toffaleti 공식의 적용결과 -0.55m~0.34m, Yang공식을 적용하여 모의한 결과는 -1.79m~0.20m, Engelund & Hansen공식은 -5.03m~5.18m, Shen & Hung공식 -2.93m~0.46m 범위에서 실제 하상변동량과 차이를 나타내었다. Toffaleti 공식

을 제외한 나머지 유사량 공식들은 3개의 유관을 사용하여 모의하였을 경우에 결과 값이 실측값과 큰차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 유관 5개를 사용하여 GSTARS 3.0 모형을 모의하여 얻은 결과 값들은 유관 3개를 사용하여 모형을 모의한 결과와 같이 유사량 공식별로 결과 값의 많은 차이를 보이고 있다. Toffaleti 공식의 적용결과 하상의 변화는 -5.06m~1.16m, Yang공식을 적용하여 모의한 결과는 -5.37m~0.20m. Engelund & Hansen공식을 적용하여 모의한 결과 -5.86m~3.02m, Shen & Hung공식을 적용하여 모의한 경우에는 -4.64m~0.48m 범위에서 실측된 최심하상고와 차이를 나타낸다. 유사량 공식별 최심하상고의 변동 결과가 실제 측량 성과와 많은 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전반적으로 Toffaleti공식으로 얻은 유사량을 모형에 적용한 결과가 전반적으로 실제 하상의 변화와 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, GSTARS 3.0 모형의 적용시 유관의 수를 한 개로 하였을 때 지천하류부의 실제의 횡단면의 변화와 가장 유사한 결과를 얻는 것을 알 수 있다. 모의기간 동안에 발생한 유출량의 대부분이 저수로로만 소통되었으나 저수로 폭이 충분히 넓지 않기 때문에 유관을 여러 개로 나누어 모의한 결과보다 한 개의 유관을 선택하여 모의한 결과가 더 실제의 하상의 변화양상과 비슷한 결과를 얻은 것으로 판단된다.

그림 10과 표 6은 HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형의 결과를 비교한 것이다. 유사량 공식은 비교적 실측치에 근접하고 있는 Toffaleti공식을 사용하였으며, GSTARS 3.0의 경우 1 개의 유관을 사용하였다. 두 모형의 중방향 최심하상고 모의결과는 HEC-6 모형의 전체 변화량이 실측치와 더 가까움을 알 수 있다. 하지만 두 모형의 모의결과가 큰 차이가 없으며 변화양상도 실제 하상변동과 유사하게 나타나고 있어서 지천하류부의 하상변동 예측에 두 가지 모형에 대한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

그림 10. HEC-6모형과 GSTARS3.0 모형의 모의결과 비교

표 6. HEC-6 모형과 GSTARS3.0 모형의 최심하상 모의결과 비교 (m)

하류단으로부터 거리(m)	120	215	265	325	375	465	565	665	775	905	1,035	1,150	1,320
2004년 09월 24일	4.97	5.83	5.94	6.58	6.44	6.65	6.76	6.74	6.82	7.09	7.21	7.13	8.4
HEC-6 모의 결과	5.21	5.70	6.12	6.45	6.56	6.86	6.75	6.75	6.94	7.19	7.50	7.74	7.92
실측하상- HEC 6	0.24	-0.13	0.18	-0.13	0.12	0.21	-0.01	0.01	0.12	0.10	0.29	0.61	-0.48
GSTARS3.0 모의 결과	5.20	5.45	5.74	6.76	6.63	6.93	6.67	6.76	6.87	7.22	7.42	7.55	7.95
실측하상- GSTARS 3.0	0.23	-0.38	-0.20	0.18	0.19	0.28	-0.09	0.02	0.05	0.13	0.21	0.42	-0.45

5. 결 론

본 논문에서는 지천하류부의 지천교로부터 상류쪽으로 1,320 m 구간을 선정하고, 실측치와 수치모형 결과와의 비교 분석을 통하여 하상변동을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형으로 지천하류부의 하상변동을 모의한 결과, HEC-6 모형이 비교적 실측 최심하상에 근접하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 모의 결과에 큰 차이를 나타내지는 않았으며, 지천하류부 하상변동 예측에 대한 적용성을 확인하였다.
- 2) HEC-6 모형과 GSTARS 3.0 모형의 적용결과, Toffaleti 공식이 다른 유사량 공식에 비해 지천하류부의 최심하상변동을 잘 나타내는 것으로 산정되었다.
- 3) GSTARS 3.0 모형의 적용결과, 유관 1개를 사용하여 모의한 결과가 3개, 5개의 유관을 사용하여 모의한 결과보다 하상의 변동이 전반적으로 실제와 근접한 값을 나타내고 있다. 이러한 결과로 흐름 폭이 어느 정도 넓지 않은 하천에서 GSTARS 3.0 모형의 유관 개수를 여러 개의 유관으로 나누어 모의하는 것은 적용성이 떨어진다고 생각되며, 앞으로 한강 등의 큰 규모의 하천에 적용하여 그 결과를 검토하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2003년 건설교통부 한국수자원공사에서 지원 받아 수행된 금강유역조사 결과물의 일부로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김영성 (1993) MOBED를 이용한 하상변동의 예측, 서울대학교 석사학위논문.
- 남선우 (1978) 하천의 유사량과 하상변동에 관한 연구, **대한토목학회 학술발표회 개요집**, 대한토목학회, pp. 3-29~3-30.
- 박상덕 (1990) 홍수파의 영향을 고려한 하상변동 예측모형, 연세대학교 박사학위논문, 연세대학교.
- 박정웅 (1984) 홍수시 하상변동에 관한 연구, 한양대학교 박사학위논문, 한양대학교.
- 안상진, 백남대, 윤석환 (2001) 수치모형을 이용한 하상변동 예측, **한국수문학회 논문집**, 한국수문학회, 제35권, 제6호, pp. 693-701.
- 우효섭, 유권규 (1990) 수정아인쉬타인 방법의 한국 하천에의 적용, 한국건설기술연구원 연구보고서.
- 윤세의, 이종태, 정재욱 (1997) 하천 유역의 유사량 산정 및 하상변동 예측을 위한 영향인자의 평가 분석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제5호, pp. 561-270.
- 이삼희, 황승용 (2005) 하상재료 입도분포를 통한 임진강 하상변

- 동 특성조사, 2005년도 한국수자원학회 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 399-403.
- 이재수, 윤용남 (1995) 한강본류의 하상변동에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제4호, pp. 875-884.
- 정재욱 (1994) 하천유역의 유출 및 유사량 산정에 관한 연구, 경기대학교 석사학위논문.
- 지운, 여운광, 한승원 (2010) 낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 유사량 공식 및 이송형태에 따른 하상변동 수치모의에 관한 연구, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제6호, pp. 543-557.
- 최호 (2005) 수치모형을 이용한 지천하류부 하상변동분석, 경기대학교 석사학위논문.
- 최호, 정재욱, 임창수, 윤세의 (2005) 지천하류부의 하상변동 분석, **한국수자원학회 학술발표회논문집**, pp. 965-969.
- 한건연, 이을래, 손광익, 임창수(1999) 부여취수장 부근에서의 하상변동에 대한 2차원 수치모의, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 697-709.
- Chang, H.H. (1993). *Generalized Computer Program FLUVIAL-12 Mathematical Model for the Erodible Channels*. User Manual, San Diego, California.
- Engelund, F. and Hansen, E. (1967) A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Stream, pp. 1-63. Teknisk Vorlag, Copenhagen V, Denmark.
- Gary Parker, Chris Paola and Suzanne Leclair (2000) Probabilistic Exner Sediment Continuity Equation for Mixtures with No Active Layer, *Journal of Hydraul Engineering*. ASCE, Vol. 126, No. 11, pp. 818-826.
- Karim, M.F. (1985) IALLUVIAL: Analysis of Sediment Continuity and Application to the Missouri River, Iowa Institute of Hydraulic Research, Report No.292, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, December.
- Molinas, A. Yang, C.T. (1986) *Computer Program User's Manual for GSTARS*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- Sharad Kumar Jain. (2001) Development of Integrated Sediment Rating Curves Using ANNs. *Journal of Hydraul Engineering*. ASCE, Vol. 127, No. 1, pp. 30-37.
- Shen, H.W and Hung, C.S. (1971) An engineering approach to total bed material load by regression analysis. In: Proc. Sedimentation Symposium (ed. by H.W. Shen). Fort Collins, Colorado, USA.
- Tingsanchali, Tawatchai (1996) Experimental investigation and Analysis of HEC-6, *Journal of Hydrological Processes*. ASCE, Vol. 10, Issue 5.
- Toffaleti, F.B. (1968) Definitive computations of sand discharge in rivers, *J. of the Hydr. Div.* ASCE, 95(HY1).
- Yang, C.T. (1973) Incipient motion and sediment transport, *J. of the Hydr. Div.* ASCE, 99(HY10), pp. 1679-1704.
- Yang, C.T. (1984) Unit stream power equation for gravel, *J. of the Hydr. Div.* ASCE, 110(HY12).
- Yang, C.T. (1998) Simulation and Prediction of River Mophologic Changes Using GSTARS 2.0, *International Conference on Hydro-Science and Engineering*, Cottbus/Berlin, Germany.

© 논문접수일 : 10년 09월 15일
 © 심사의뢰일 : 10년 09월 15일
 © 심사완료일 : 10년 11월 10일