



## Sensitive analysis of river geometry under various flow conditions in South Han River using GSTARS model

Ahn, Jungkyu<sup>a</sup> · Lee, Jong Mun<sup>b</sup> · Kim, Young Do<sup>c\*</sup> · Kang, Boosik<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon University

<sup>b</sup>Department of Environmental Engineering, Inje University

<sup>c</sup>Corresponding Author, Department of Environmental Engineering(Nakdong River Environmental Research Center), Inje University

<sup>d</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

Paper number: 15-102

Received: 10 December 2015; Revised: 5 February 2016 / 3 March 2016; Accepted: 3 March 2016

### Abstract

Flow input from the basin will not remain the same as before due to climate changes. Since the predictions on river discharge due to climate change is given by scenarios, various discharge scenarios were prepared in this study. For a long term and reach prediction, semi-two dimensional sediment transport model, GSTARS, was used. The flood water surface elevations predicted by GSTARS model were analysed statistically and it was concluded that the model is applicable for the South Han River. Three stream tubes is the most suitable to simulate two dimensional river geometric change River geometric changes. For sediment load computation, Ackers and White equation and Yang equation were reasonable. River will become narrower regardless of discharge variation, more discharge results in deeper channel.

**Keywords:** river bed change, GSTARS, sensitive analysis, stream tube

## GSTARS 모형을 이용한 한강 상류부에서 유량변동에 따른 하상변동 민감도 분석

안정규<sup>a</sup> · 이종문<sup>b</sup> · 김영도<sup>c\*</sup> · 강부식<sup>d</sup>

<sup>a</sup>인천대학교 건설환경공학부, <sup>b</sup>인제대학교 환경공학과, <sup>c</sup>인제대학교 환경공학과(낙동강유역환경연구소), <sup>d</sup>단국대학교 토목환경공학과

### 요 지

본 연구에서는 기후변화에 의한 유량의 변화에 따른 시나리오를 구성하고 장기간, 장구간에 걸친 하상변동 양상을 예측하였다. 준2차원 수치모형인 GSTARS를 이용하여 남한강의 하상변동 모의에 적합한 민감도 분석을 수행하였다. 홍수위에 대한 하상변동 모의결과와 실측치에 대한 결정계수, 평균제곱근 오차, 모형효율성계수를 비교한 결과, 모의에 적합한 결과를 나타내어 GSTARS 모형의 적용성을 확인하였다. 수류튜브를 활용하여 개수에 따른 영향을 분석한 결과, 수류튜브 3개일 때 하상변동이 적절하게 나타났으며 너무 많은 수류튜브는 깊이만 깊어지는 결과를 나타냈다. 유사량 공식으로는 Ackers and White 공식, Yang 공식이 적용성이 좋았다. 유량의 변화에 관계없이 하도가 좁아지는 방향으로 변화할 것이며 기후변화로 인해 유량이 늘어날수록 하도가 깊어질 것으로 예상된다.

**핵심용어:** 하상변동, GSTARS, 민감도분석, 수류튜브(Stream Tube)

## 1. 서 론

대하천에서의 하도정비 및 보 신설 후 다양한 하천환경변화가 예상됨에 따라 각종 변화에 의해 발생할 수 있는 현상들

을 예측하고 환경변화에 의한 재난을 예방하기 위한 대책수립이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 하천에서의 하상변동은 경우에 따라 홍수위 상승, 저수 기능 감퇴, 용수와 취수 방해, 유사에 의한 오염원 확산 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하거나 사전에 예방하기 위해서는 하천 유역 내의 수리구조물의 설계 및 유지관리 그리고 수자원 계획, 개발 및 관리 시에 유사 이송과 하상변동에 대한 검토를 반드시

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-320-3252  
E-mail: ydkim@inje.ac.kr (Y.D. Kim)

수행해야 한다(Woo and Yu, 1990). 현재 하천에서의 유사이송과 하상변동을 분석하는 대표적인 방법으로는 현장에서 유수량이나 하상고를 측정하여 분석하는 방법, 수리모형 실험과 수치모형을 이용하는 방법이 있다(Morris and Fan, 1997). 기후변화에 따른 강우패턴의 변화로 하천 내 수리적 요소가 변화되고 그로인해 발생하는 하상변동의 예측이 필요하다. 최적의 하천관리 기술 개발을 위하여 수환경 변화의 정량적 분석과 취약성 평가가 필수적이다. 아울러 준설 및 다기능보설치로 하도가 변화하였다. 만일 유역의 특성이 유지된다면 하천의 동적평형상태인 정비 이전의 하천으로 돌아가려할 것이다. 하천이 준설로 넓어지고 깊어진 상태로 이전의 동적인 평형상태로 돌아가려고 하도가 좁아지고 얕아질 것이다. 그러나 기후변화로 인해 유역에서의 유량 및 유수량이 달라질 것으로 예상된다. 하지만 하상변동모델과 기후변화를 연계하여 하도의 변화를 비교·분석한 연구는 매우 드물다. 본 연구에서는 기후변화에 대한 유량과 유수량의 변화를 시나리오로 제시하고 각 시나리오별 국내 하천에서의 변화 양상을 모의하였다.

기후변화에 대한 하상변동의 기존의 연구 동향을 살펴보면 국외의 경우 Nathalie et al. (2003) 이 라인강 삼각주 상류유역의 미세 부유사의 이송과 퇴적물의 동원에 대해 기후와 토지이용 변화의 잠재적 영향을 평가하기 위해 지리정보시스템 편입모델을 적용하여 연구를 수행하였다. 연구결과, UKHI 기후변화시나리오에 따른 침식속도가 알프스에서 증가하고, 독일의 일부 유역은 감소하고 있으며, 전체유역의 평균 침식은 약 12% 증가할 것으로 나타나나 삼각주 지역의 유수량은 13% 감소할 것으로 예상되는 결과를 나타내었다. Samaras et al. (2014)는 유역-해안을 연계한 퇴적물의 수송 및 형태에 대한 기후변화의 영향을 연구하였다. 모래해안과 북그리스의 Chalkidiki의 상류유역을 기반으로 저자에 의해 개발된 수치모델링을 통해 상관관계에 대한 통합접근방식과 SWAT과 PELNCON-M 모형을 유역과 해안지역에 적용하여 극단적인 강우이벤트를 적용하여 모의를 실시하여 결과를 분석하였다.

하상변동에 대한 모형의 적용사례를 살펴보면 국외의 경우 Ahn et al. (2013)이 미국 Missouri 강에 설치된 Gavins Point Dam 상류의 하상변동을 GSTARS 모형을 활용하여 1975년부터 1995년까지의 약 20년간의 하상지형변동을 모의하여 실측치와 비교하였다. 미주리강의 지류인 Niobrara 강에서 유입되는 유사가 퇴적되는 현상과 침식구간의 장갑화 현상을 GSTARS 모형으로 적절히 모의할 수 있는 방안을 제시하였다. Ahn and Yang (2015)은 유사이동 모형 활용시 매

개변수를 결정하는 방법을 제시하였으며 Ahn and Yen (2015)은 수류튜브(Stream tube)를 도입한 준2차원 모형을 활용할 경우 하상의 횡방향 침식과 퇴적 양상은 수류튜브 3개로 가장 적절히 모의할 수 있음을 보였다. Ahn and Yang (2014)는 준2차원 모형인 GSTARS 모형이 강덕 침식 및 하도 횡방향 이동으로 인한 사행도 변화를 모의할 수 있음을 보였다.

국내의 경우 Seo et al. (1995)은 금강 대청댐 하류구간과 한강 팔당댐 하류구간에서 GSTARS와 CHARIMA 모형을 적용하여 모의를 실시하였다. Rim et al. (1999)은 금강 부여 취수구 상류구간의 수리적 특성 및 유사론적 특성을 파악하고, Ahn et al. (2002)은 보청천 하류구간의 하도형태변화를 해석하기 위해 HEC-6 모형과 GSTARS 모형을 적용하였다. Lee (2006)은 달천 하류의 수리적 특성 및 유사론적 특성을 파악하기 위해 GSTARS 모형을 적용하였다. Jang et al. (2011)은 배사구 유입부 흐름 및 하상변동 수치모의를 위한 매개변수 검정 및 민감도 분석을 수행하였고, Choi et al. (2011)은 HEC-6와 GSTARS 모형을 사용하여 유수량 산정 공식별 하상변동량을 파악하고, 실제 지천하류부의 하상변동량과의 차이를 비교·분석하였다. Ahn et al. (2013)은 형산강 특정 하도구간에서 GSTARS 모형을 이용해서 기존 유수량 산정공식의 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 형산강에 대한 최적 유수량산정 공식을 제안하고자 하였다. Hwang et al. (2013)은 내성천에서의 GSTARS 모의를 통한 하천의 장기적인 지형변화 양상을 분석하였다.

본 연구에서는 국외에서 하도의 준2차원적인 변화에 대한 적용성이 검증된 수치모형인 GSTARS를 이용하여 남한강 유역인 충주댐 하류~강천보 구간의 기후변화에 따른 유량의 변화에 따라 시나리오를 구성하였다. 유수량 공식, 준2차원 모형 활용시 사용하는 수류튜브의 개수에 따른 민감도 분석을 수행하여 국내 다기능보 구간의 2차원적인 하상변화 양상을 분석하고자 하였으며, 향후 장기 기후변화에 의한 하상변동 모의를 위한 기본 방향을 제시하였다.

## 2. GSTARS 모형의 개요

GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation, version 3.0)는 미개척국(U.S. Breau of Reclamation)의 Yang and Simões (2002)에 의하여 개발된 하상변동 모형이다. 정류 혹은 준정류의 흐름 모의만 가능하여 유량 및 수위의 시간적 변화가 극심할 때의 적용에는 한계가 있다. 그러나 장기적인 하상변동을 예측하는 경

우 부정류모의와 준정류 모의가 큰 차이를 보이지 않는다 (Ahn et al., 2013). GSTARS3 모형은 준2차원적으로 흐름과 하상의 변동을 모의한다. Fig. 1과 같이 2차원적으로 모의하기 위하여, 수류튜브 이론을 적용하였다. 수류튜브란 하천 단면을 하나 이상의 튜브로 나누어 각각의 튜브마다 유속과 하상변동을 따로 계산한다. 이를 통해 동일 단면에서도 하상의 변화가 달라질 수 있다. 예를 들어 만곡이 진행되는 하천 혹은 하천 내에 모래톱이 발생하는 경우 동일 단면 내에서도 퇴적과 침식이 동시에 일어난다. 이런 현상을 수류튜브를 이용하면 모의가 가능하다. 그러나 GSTARS3도 퇴적과 침식이 아주 국부적으로 일어나는 하천구조물 주위에서는 한계가 있다. 따라서 GSTARS3의 적용성과 한계를 명확하게 이해하고 모형을 활용하여야 한다(Ahn, 2012).

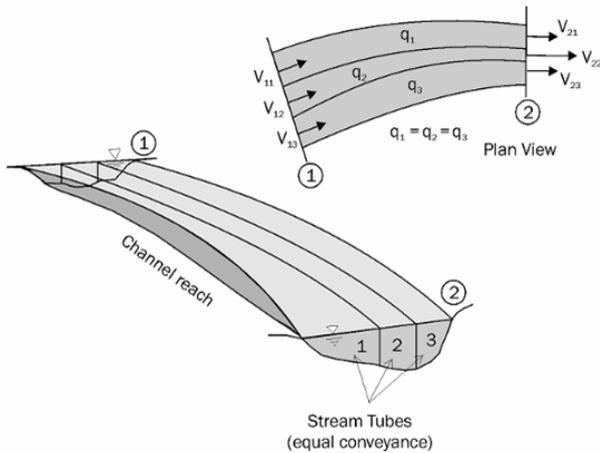


Fig. 1. Schematic representation of stream tube concept (Yang and Simões, 2002)

### 2.1 지배방정식

하상 변동의 계산은 Eq. (1)로 표현된 Exner식을 활용한다.

$$\eta \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{dQ_s}{dx} = q_{sl} \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $x$ 는 흐름방향 거리,  $A_d$ 는 하상면적,  $Q_s$ 는 유사이송량(부피단위),  $\eta$ 는 하상의 유사 부피 비율(1-공극률),  $q_{sl}$ 는 유사의 측방 부피단위 유입량이다. 위 식을 차분식으로 근사하면 Eq. (2)의 식으로 표현되는데,

$$\Delta z_{i,k} = \frac{\Delta t}{\eta_{i,k}} \frac{q_{sl}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) + 2(Q_{s,i-1,k} - Q_{s,i,k})}{(aW_{i-1} + bW_i + cW_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (2)$$

여기서,  $k$ 는 유사입경 인덱스,  $i$ 는 단면번호 인덱스,  $\Delta z$ 는 하상변화량,  $\Delta t$ 는 계산시간간격,  $\Delta x_i$ 는  $i$ 단면과  $i+1$ 단면 사이의 거리,  $\eta_{i,k}$ 는  $k$ 번째 유사 단면  $i$ 에서 차지하는 유사부피 비율(1-공극률),  $Q_{s,i,k}$ 는 단면  $i$ 에서  $k$ 번째 유사의 이송량,  $q_{sl}$ 은 유사의 측방 유입량(부피단위),  $W_i$ 는 단면  $i$ 의 수면 폭이며,  $a, b, c$ 는  $a+b+c=1$ 인 가중치이다. 각 유사입경별 하상변화량을 모두 합하여 주어진 단면에서의 변동을 최종적으로 계산한다(Eq. (3)).

$$\Delta z_i = \sum_{k=1}^K \Delta z_{i,k} \quad (3)$$

여기서  $K$ 는 입경분포의 총 갯수이다.

### 2.2 유사량 산정식

#### 2.2.1 Engelund and Hansen (1967)

Engelund와 Hansen (1967)은 Bagnold의 수류력 개념과 상사 원리를 적용하여 유사이송 함수를 유도하였다.

$$f\Phi = 0.1\theta^{5/2} \quad (4)$$

$$f = \frac{2gSD}{V^2} \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{q_t}{\gamma_s} \left[ \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g d^3 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (7)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $S$ 는 에너지경사,  $V$ 는 평균유속,  $q_t$ 는 단위폭당 총 유사량,  $\gamma_s$ 는 유사 비중,  $\gamma$ 는 물의 비중,  $d$ 는 유사 입경,  $D$ 는 평균 수심, 그리고  $\tau$ 는 하상 전단력이다.

Engelund와 Hansen은 이론으로부터 심각하게 벗어나지 않고도 사구 하상과 0.15 mm 보다 큰 입경의 고수류 영역에 적용할 수 있음을 발견하였다.

#### 2.2.2 Ackers and White (1973)

Bagnold의 수류력 개념에 기초하여 Ackers와 White (1973)는 유사의 이동과 이송을 기술하는데 차원해석을 적용한다. 그들은 하상전단응력의 일부만이 조립질 유사의 이동을 유발하는데 유효하며, 부유사 이송의 대부분을 차지하는

세립질 유사의 경우에는 전단응력 전부가 유사의 이동을 일으키는 데 유효하다고 가정하였다. 즉 유사에 대한 이들의 이동수(mobility number)는 아래와 같다.

$$F_{gr} = U_*^m \left[ gd \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \right]^{-1/2} \left[ \frac{V}{\sqrt{32 \log(\alpha D/d)}} \right]^{1-n} \quad (8)$$

여기서,  $U_*$ 는 마찰 속도,  $n$ 은 유사입경에 따른 천이 지수,  $\alpha$ 는 거친 난류 방정식의 계수(=10)이다.

그들은 또한 유사 입경을 무차원 입경으로 나타내었다.

$$d_{gr} = d \left[ \frac{g(\gamma_s/\gamma - 1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (9)$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성 계수이다.

일반화된 무차원 유사이송 함수는 Eq. (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$G_{gr} = C \left[ \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right] m \quad (10)$$

계수인  $A$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$ 의 값들은 Ackers와 White (1973)에 의해 0.04 mm 보다 큰 유사와 Froude 수가 0.8보다 작은 흐름의 실험실 자료의 최적 적합 곡선에 기초하여 결정한다.

### 2.2.3 Yang (1973) + Yang (1984)

하상이 모래인 경우 Yang의 무차원화된 단위 유수력 공식은 Eq. (11)과 같다(Yang, 1973).

$$\log C_{ts} = 5.435 - 0.286 \log \frac{wd}{v} - 0.457 \log \frac{U_*}{w} \quad (11)$$

$$+ \left( 1.799 - 0.409 \log \frac{wd}{v} - 0.314 \log \frac{U_*}{w} \right) \log \left( \frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right)$$

여기서,  $C_{ts}$ 는 유사농도(ppm by weight),  $w$ 는 유사 입자의 침강속도,  $VS$ 는 단위 유수력(=γQS) 그리고  $V_{cr}$ 은 하상입자가 초기운동을 할 때의 유속이다.

하상이 자갈인 경우에는 Eq. (12)와 같은 공식을 사용한다.

$$\log C_{tg} = 6.681 - 0.633 \log \frac{wd}{v} - 4.816 \log \frac{U_*}{w} \quad (12)$$

$$+ \left( 2.784 - 0.305 \log \frac{wd}{v} - 0.282 \log \frac{U_*}{w} \right) \log \left( \frac{VS}{w} - \frac{V_{cr}S}{w} \right)$$

여기서,  $C_{tg}$ 는 총 유사농도(ppm by weight)이다.

### 2.2.4 DuBoys (1879)

본 연구에서 사용된 DuBoys (1879)의 공식은 Eq. (13)과 같다.

$$q_b = \varepsilon V_s \frac{m(m-1)}{2} \quad (13)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 층 두께,  $V_s$ 는 두 번째 층의 속도, 그리고  $m$ 은 층의 전체 수이다. Eq. (13)을 전단력으로 다시 정리하여 DuBoys 방법의 총 소류사량은 Eq. (14)와 같이 된다.

$$q_b = M_\tau (\tau - \tau_c) \quad (14)$$

여기서,  $\tau_c$ 는 하상을 따라 발생하는 한계 전단력,  $M$ 는 유사 입자들의 특성과 관련이 있는 계수이다.

## 3. 연구구간과 GSTARS 모형의 검증

### 3.1 대상유역 및 모의구간

남한강은 강원도 삼척시 대덕산에서 발원하여 충청북도 동북부와 경기도 남부를 흘러 북한강과 합류하여 한강으로 흘러드는 하천이며, 유로연장 375 km, 유역면적은 12,577 km<sup>2</sup>에 이른다. 연구지역은 Fig. 2의 충주댐 하류에서 강천보 구간으로 보 건설로 인한 하상변동의 영향을 살펴보고자 하였으나 보와 구조물의 인위적인 조작에 의한 변화모의와 자료획득에 어려움이 있어 우선적으로 구조물이 없는 구간인 충주댐 하류에서 강천보 사이를 모의 구간으로 설정하였다. 충주조정지

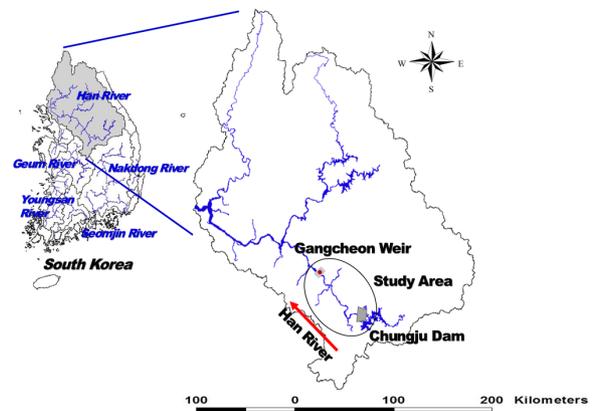


Fig. 2. Description of study area

댐은 연구 구간에 포함되나 운영은 고려하지 않았다. 본류 길이는 56.5 km이며 지류의 경우 달천, 섬강, 청미천으로 구성되어 있으며 하류단 경계인 강천보로부터 달천은 44.9 km, 섬강 10.1 km, 청미천은 7.5 km 상류에 위치해 있다(Fig. 2). 연구 지역의 유황분석은 풍수량(95일) 119.68 m<sup>3</sup>/s, 평수량(185일) 54.32 m<sup>3</sup>/s, 저수량(275일) 28.37 m<sup>3</sup>/s, 갈수량(355일) 13.58 m<sup>3</sup>/s이다(MOLIT, 2009).

**3.2 모형의 검증**

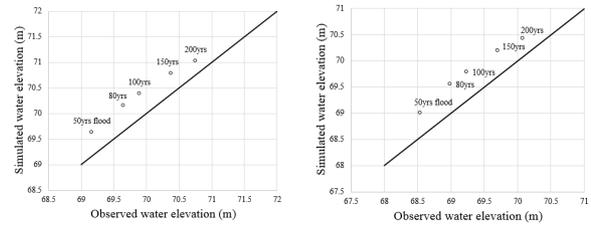
모형의 검증을 위하여 한강하천정비기본계획보고서(2009)의 50, 80, 100, 150 그리고 200년빈도 홍수위와 비교·분석을 수행하였다. 해당지점의 빈도별 홍수량과 댐설계기준을 참고로 한 강천보 수위자료를 입력자료로 적용하였다. 분석지점은 달천 합류 전, 후와 섬강 합류 전·후 구간을 모의 후 실측 자료와 비교를 실시하였다. 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(determination coefficient, R<sup>2</sup>)와 평균제곱근 오차(root mean square error, RMSE), 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수(NSE)를 사용하였다(Table 1).

Fig. 3은 하천정비 기본계획(MOLIT, 2009)에서 제시된 빈도별 홍수위와 GSTARS3 모형을 활용한 홍수위를 나타낸 그래프이다. Table 2는 해석결과를 비교한 것으로 달천 전·후, 섬강 전·후의 홍수위의 오차범위가 작고 정확성이 매우 높은 결과를 나타내고 있다. NSE와 R<sup>2</sup>의 경우 0.99이상이며, RMSE 경우 0에 근접할수록 정확하지만 달천의 경우 0.45 ~ 0.50, 섬강이 0.70 ~ 0.73으로 근사한 값으로 볼 수 있다. 따라서 GSTARS3 모형을 본 연구구간에 대하여 충분히 활용 가능하다.

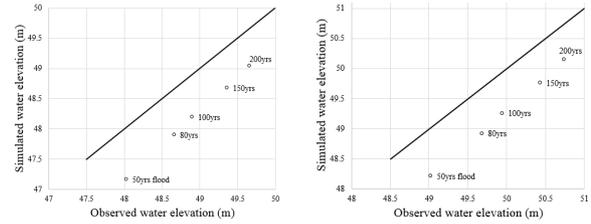
Table 1. Statistical evaluation indices

Definition	Reference	Comments
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Nash and Sutcliffe (1970)	The optimal statistical value occurs when the value does reach 1.
$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Legates and McCabe (1999)	The optimal statistical value occurs when the value does reach 1.
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2}$	Wood (2002)	The optimal statistical value occurs when the value does reach 0.

O<sub>i</sub> = observed value, P<sub>i</sub> = simulated value,  $\bar{O}$  = mean observed value, n = number of the data.



(a) Upstream of mouth of Dal Stream (b) Downstream of mouth of Dal Stream



(c) Upstream of mouth of Seom River (d) Downstream of mouth of Seom River

Fig. 3. Comparison of water surface elevations

Table 2. Statistical evaluation of goodness-of-fit

Analysis Section	R <sup>2</sup>	RMSE	NSE
Upstream of mouth of Dal Stream	0.99	0.45	1.00
Downstream of mouth of Dal Stream	0.99	0.50	1.00
Upstream of mouth of Seom River	1.00	0.70	0.99
Downstream of mouth of Seom River	1.00	0.73	1.00

**3.3 입력자료 및 모의조건**

GSTARS 모형은 국외의 경우에서 단/장기간, 장구간에 걸쳐 검증된 모형이며 실측 하상토자료와 유입·유수량 자료를 등을 활용하였으며, 조도계수 Manning n 등의 경우 하천정비기

Table 3. Configuration and data source of boundary conditions

Data		Configuration	Source
Channel Geometry		Configuration of Cross-Section Data	MOLIT (2009)
Hydraulic Data	Upstream Boundary Conditions	Daily Data of Chungju Dam Discharge (2013~2014)	WAMIS
	Downstream Boundary Conditions	Water Stage Data of Gangcheon Weir (2013~2014)	WAMIS
	Roughness Coefficient	Manning's Equation	MOLIT (2009)
Sediment Data	Sediment Inflow Data	Sediment Rating Curve	MOLIT (2009)
	Bed Material	Particle Size Distribution	MOLIT (2009)
	Sediment Gradation Data	Specific Gravity, Porosity	MOLIT (2009)
	Sedimentation Rate	Measured or Relationship Water Temperature Data	MOLIT (2009)

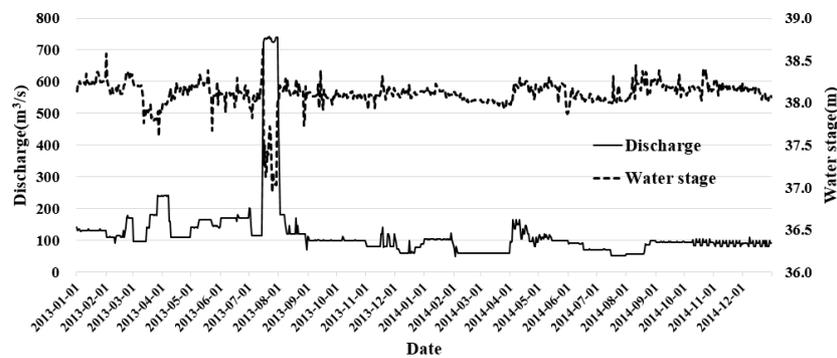


Fig. 4. Discharge and water stage data

본계획(MOLIT, 2009)에 제시된 값을 사용하였다. GSTARS3의 준정류 모형을 사용하여 시나리오 모의를 실시하였다.

모형에 필요한 입력자료는 Table 3와 같이 수리자료와 유사자료로 구성되며, 수리자료는 상·하류 경계조건으로 유량 및 수위자료와 지류의 유입유량, 조도계수로 이루어지며 유사자료는 상류경계에는 유입되는 유사량 수문곡선, 하상재료에 대한 입경분포, 침강속도에 대한 자료가 필요하다.

상·하류 경계조건으로는 Fig. 4의 2013년과 2014년의 충주댐 방류량과 강천보 수위자료를 사용하였으며 일별자료를 입력하였다.

지형자료는 MOLIT (2009)에 수록된 측점 No. 272 ~ 127 구간을 활용하였으며 하천의 조도계수는 0.030 ~ 0.032 까지 각 단면의 특성에 맞는 값을 입력하였다. 적용구간의 유입·유사량은 한강 하천정비기본계획보고서(MOLIT, 2009)에 기술된 실측된 부유사 농도와 유량에 의해 부유사량을 계산하

고, 실측된 유량과 수정아인슈타인 방법에 의해 계산된 총 유사량간의 상관관계를 분석하기 위해 제안된 여주수위표 지점에서 2001 ~ 2002년에 걸쳐 취득된 실측자료를 통해 도출한 Eq. (15)와 같은 유량-유사량 곡선식을 사용하였다.

$$Q_s = 1.0725 Q^{1.885} \tag{15}$$

여기서,  $Q_s$ 는 유사량(ton/day),  $Q$ 는 유량( $m^3/s$ )이다.

하상도 입도분포는 하상재료 분석 결과를 활용하였다. 하상재료 조사는 하상의 특성분석, 특히 조도계수의 산정, 상류 유역의 침식과 하천의 유사이송 특성, 유사량 공식과 하상변동 모형의 적용, 하천 서식처와 같은 하천환경의 조사 등에 필수적인 사항으로 현장에서 적절한 방법으로 시료를 채취하고 실험실에서 분석한 후 그 결과를 체계적으로 정리하는 사항으로 구분하며 자갈이상, 모래, 실트이하로 나누어 각기 시료채

**Table 4.** Result of grain size analysis (MOLIT, 2009)

Distance from Gangcheon Weir (km)	Average Particle Size of Passing Percentage (mm)										d50* (mm)
	0-10 (%)	10-20 (%)	20-30 (%)	30-40 (%)	40-50 (%)	50-60 (%)	60-70 (%)	70-80 (%)	80-90 (%)	90-100 (%)	
0.0	0.17	0.23	0.28	0.33	0.38	0.42	0.48	0.52	0.65	1.8	0.39
2.0	0.4	0.65	1.05	3	9.5	13	16	25	48	65	12
4.0	0.29	0.44	0.55	0.64	0.7	0.79	0.85	0.94	1.1	1.3	0.75
5.9	0.2	0.4	0.73	1.9	6.6	13	19	24	29	35	9.5
7.9	0.17	0.7	5.7	16	20	24	26	29	32	36	22
10.1	0.16	0.65	2.7	5.8	9.2	14	18	23	28	35	12
12.1	0.1	0.25	0.43	0.8	2.9	8.2	14	19	25	34	5.4
14.1	0.3	0.5	0.85	8	16	20	24	28	31	36	19
16.0	0.17	0.36	0.6	1.4	8	12	15	18	24	32	9.5
18.3	0.34	0.55	0.85	1.6	6	14	20	25	30	35	9.5
20.3	-	-	0.09	0.14	0.17	0.19	0.23	0.29	0.4	0.9	0.18
22.2	0.08	0.4	1.5	11	19	23	27	30	36	51	21
24.2	0.29	0.6	0.9	1.7	11	17	21	26	30	35	15
26.2	-	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19	0.21	0.25	0.29	0.7	0.18
28.2	0.08	0.19	0.28	0.37	0.45	0.6	1.5	9.5	14	17	0.5
30.2	0.07	0.14	0.17	0.19	0.2	0.23	0.26	0.3	0.38	0.54	0.21
32.1	0.15	1.1	1.8	2.4	3.4	4.8	6.9	9.6	14	19	4
34.0	0.27	0.35	0.4	0.46	0.55	0.65	0.82	1.1	1.6	2.9	0.59
35.9	0.15	0.2	0.26	0.31	0.39	0.47	0.58	0.76	1.2	1.9	0.42
37.9	0.1	0.16	0.18	0.2	0.23	0.27	0.3	0.35	0.44	0.58	0.25
38.3	0.3	2.1	8	13	16	19.5	23	27	30	36	18
38.7	0.2	0.75	1.4	1.95	2.9	4.5	7	10.5	17	29	3.6
40.3	0.14	0.25	0.4	0.76	4	28	40	50	59	70	19
42.2	-	-	-	0.09	0.11	0.15	0.18	0.22	0.3	0.55	0.13
44.1	-	0.11	0.16	0.18	0.2	0.23	0.26	0.31	0.5	1.2	0.21
46.2	-	0.08	0.12	0.16	0.2	0.25	0.35	0.8	1.7	3	0.21
48.1	-	-	-	-	0.08	0.1	0.13	0.16	0.19	0.29	0.09
52.0	0.32	1	2	3.4	8	15	20	25	29	35	11
54.0	0.15	0.55	1.5	2.5	5.5	20	29	38	50	67	11
55.9	7.5	10.5	13	15	17	19	23	38	50	67	18

\* d50는 중앙입경

**Table 5.** Numerical simulation cases

Sediment transport Methods (×4)	Flow Condition (×4)	Number of Stream Tube (×3)
Engelund and Hansen (1972)	Q 60%	1
Ackers and White (1973)	Q 80%	
Yang (1973) + Yang (1984)	Q 100%	3
DuBoys (1879)	Q 120%	

취방법과 분석방법을 달리하여 실시하였다(MOLIT, 2009). 입도분석 결과는 Table 4와 같다.

GSTARS 민감도 분석을 위한 모의 시나리오로 조도계수는 MOLIT (2009)와 같은 값을 적용하고, 유수량 공식과 유량 조건, 수류튜브 개수에 따른 변수를 설정하여 시나리오 모의를 실시하였다. 모의시나리오 조건 총 48개(=4×4×3)로 Table 5와 같으며, 2년간 모의를 실시하여 하상변동량에 대한 분석을 실시하였다.

#### 4. 모의결과 분석

2014년의 실측 하상데이터를 이용하면 검증 및 보정이 가능하고 미래에 대한 예측을 더 명확히 진행할 수 있을 것이다. 4대강 사업이후 하상의 변화에 대한 실측자료는 공개되지 않았지만 연구에서는 모의결과 비교분석 시 초기하상(2012)과 2년간의 모의결과를 비교하는 방법을 활용하였다. 하도가 평형상태에 도달하는 데 기후변화의 영향을 고려하면 어떤 상태

로 하상이 변화하는지에 대한 것을 본 연구에 초점을 두고 분석을 수행하였다. 수류튜브 모형인 GSTARS 의 특성을 반영하여 수류튜브 개수는 1개, 3개, 5개로 모의하여 결과를 비교, 분석하였다. 기후변화에 따른 유량은 변동량을 알 수 없다. 물론 기후변화 시나리오 등을 통하여 유량을 예측하지만 불확실성을 내포하고 있다. 즉 유량이 과거보다 늘어날 수도 있고 줄어들 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 실측 유량인 Q 100%를 기준으로 60%, 80%, 100%, 120%가 발생하는 시나리오를 활용하였다.

**4.1 수류튜브 개수에 따른 결과 비교**

유사량 공식과 수류튜브 개수에 따른 모형의 모의결과와 초기하상고를 비교하여 최심하상고의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 유량조건은 실측유량인 Q 100%를 적용하였다.

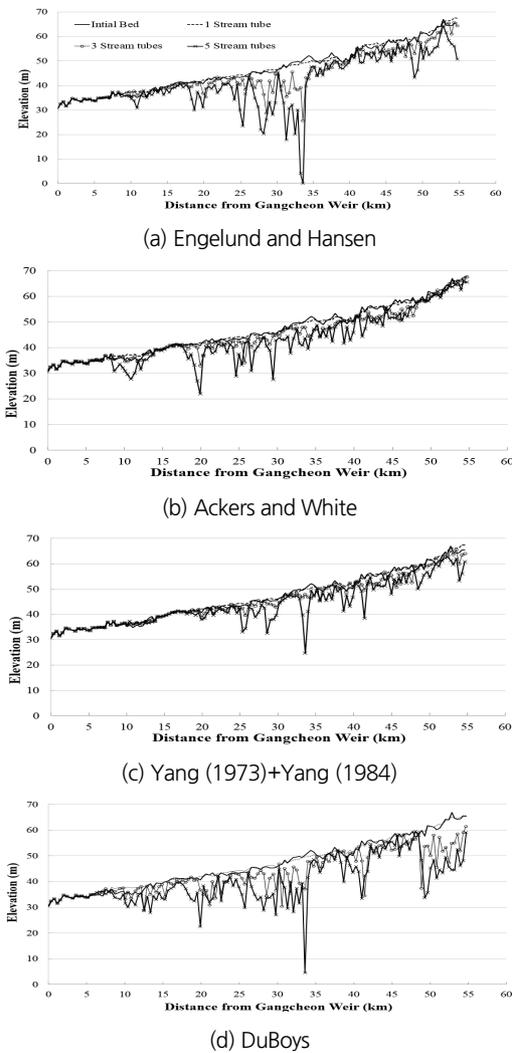


Fig. 5. Thalweg elevation changes for number of stream tubes

수류튜브 1개를 적용하여 GSTARS 모의를 한 결과 값들은 초기하상고와 큰 차이를 보이고 있지 않다. 네 가지 유사이송 공식을 적용한 결과에서 최심하상고의 변화량을 비교해보면, 수류튜브 1개를 적용했을 때 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -2.54 m ~ 3.82 m, Ackers and White 공식은 -1.75 m ~ 4.85 m, Yang 공식은 -1.56 m ~ 3.96 m, DuBoys 공식은 -2.13 m ~ 2.58 m의 최심하상의 변동을 보였다.

수류튜브 3개를 적용하여 GSTARS 모의를 한 결과 값들은 1개를 적용했을 때의 유사량 공식별로 많은 차이를 나타내고 있다. 최심하상고의 변화량을 비교해보면, 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -24.60 m ~ 1.69 m, Ackers and White 공식은 -43.23 m ~ 3.87 m, Yang 공식은 -8.58 m ~ 3.54 m, DuBoys 공식은 -22.50 m ~ 2.66 m의 최심하상의 변동을 보였다.

수류튜브 5개를 적용하여 GSTARS 모의를 한 결과 값들은 3개를 적용했을 때의 유사량 공식별로 더 큰 차이를 나타내고 있다. 최심하상고의 변화량을 비교해보면, 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -50.24 m ~ 2.72 m,

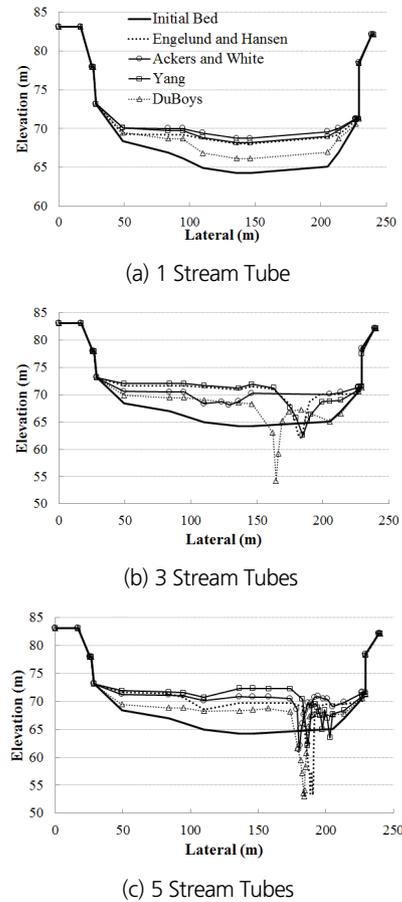


Fig. 6. Cross-sectional changes at 113km above Gangcheon weir

Ackers and White 공식은 -23.52 m ~ 2.59 m, Yang 공식은 -29.93 m ~ 1.51 m, DuBoys 공식은 -45.67 m ~ 2.25 m의 최심하상의 변동을 보였다.

즉 수류튜브의 수가 증가할수록 최심하상을 낮게 모의한다. Fig. 6는 강천보에서 113 km 상류 지점에 대하여 기준유량(Q 100%)인 경우의 결과를 도시하였다. 수류튜브가 많을수록 좁아지고 깊어지는 경향을 보인다. 특히 Fig. 6 (c)의 경우 과도하게 좁은 지형이 형성되었다. 이는 Ahn and Yen (2015)은 수류튜브가 너무 많아도 하상 형태를 왜곡시킬 수 있다는 점을 지적하였으며 수류튜브 3개가 하천의 2차원적인 횡방향 변화를 모의하는데 가장 적합하다고 제안하였다. 최심하상고의 변화만 고려할 때 수류튜브 1개를 활용하는 것이 퇴적량이 합리적으로 보인다. 그러나 Fig. 6 (a)에 도시된 수류튜브 하나를 활용한 결과를 보면 하상에 고르게 퇴적만 발생함을 보였다. 퇴적이 발생할 경우에는 하상고 상승과 하천단면 축소가 동시에 일어난다(Yang and Simões, 2002). 따라서 수류튜브 1개를 활용하여 완벽한 1차원 모의를 실시하면 실제 하상변화 양상을 적당하게 모의하는 것이 불가능하다. 따라서 준2차원적으로 모의가 가능한 수류튜브 3개를 활용한 하상변동 모의가 적절하다.

**4.2 유사이송공식에 따른 비교**

Table 6는 하류단 경계인 강천보로부터 수치모의에 의한 수류튜브별 유사량 산정공식에 따른 하상변동량을 나타낸 것이다. 계산결과, 수류튜브 개수가 많아질수록 하상변동량의 폭이 크며, 그 중 침식량이 다소 높게 나타났다. 하천의 횡방향 변화를 가장 잘 모의할 수 있는 수류튜브 3개를 활용한 Fig. 6 (b)를 보면 DuBoys (1879)는 과도한 침식이 발생함을 보였다. 그리고 Fig. 5 (d)의 수류튜브 3개의 경우를 고려하면 DuBoys (1879)식이 전 구간에 걸쳐 과도한 최심하상 저하를 모의하므로 활용이 불가능하다.

Engelund and Hansen (1972)를 활용한 결과인 Fig. 5 (a)의 수류튜브 3개의 경우를 보면 다른 Fig. 5 (d) 경우보다는 양호하지만 여전히 Fig. 5 (b)와(c)에서 활용된 Ackers and White (1973)와 Yang (1973 and 1984) 공식보다 낮은 최심하상을 보였다. 따라서 Yang 공식과 Ackers and White (1973)공식을 활용하는 것이 적절하다.

**4.3 유량 조건에 따른 비교**

유사량 공식과 유량조건에 따른 모형의 모의결과와 초기 하상고를 비교하여 최심하상고의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 하천 형상을 모의하는데 가장 적절한 수류튜브 3개를 적용

**Table 6.** Computed bed elevation changes (m)

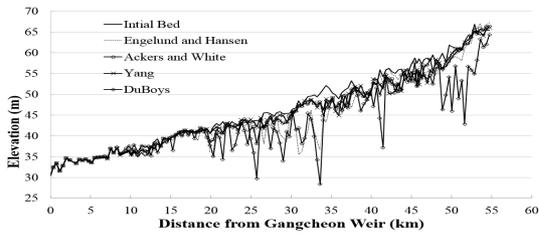
		Distance from the downstream boundary (km)											
		53	49	44	39	34	28	23	18	12	7	4	0
ST (1)	Engelund and Hansen (1972)	-0.92	-0.34	1.23	-0.12	-1.11	0.48	0.57	0.29	1.95	0.40	0.29	0.21
	Ackers and White (1973)	-0.78	-0.95	0.42	0.64	-0.12	0.19	0.60	0.24	1.57	0.59	0.60	0.51
	Yang (1973) + Yang (1984)	-0.68	-0.11	0.55	1.08	-0.05	0.48	0.65	0.44	1.50	0.23	0.22	0.20
	DuBoys (1879)	-1.74	-0.12	0.40	0.97	-0.60	0.44	0.66	0.32	2.21	0.54	0.33	0.23
ST (3)	Engelund and Hansen (1972)	-0.98	-6.88	-0.39	-1.72	-24.60	-2.73	-2.36	-1.49	1.02	0.40	0.41	0.22
	Ackers and White (1973)	-1.51	-1.34	-3.93	0.15	-2.41	-1.33	-1.51	-0.23	-0.45	0.25	0.63	0.39
	Yang (1973) + Yang (1984)	-1.72	-0.35	-2.20	0.70	-2.35	-0.23	-1.36	-0.25	1.26	0.25	0.26	0.20
	DuBoys (1879)	-11.98	-22.50	-1.90	1.68	-13.19	-0.47	-2.67	-1.27	2.14	0.71	0.49	0.26
ST (5)	Engelund and Hansen (1972)	-2.56	-16.59	-6.34	-3.12	-50.24	-22.70	-2.55	-2.18	2.72	0.41	0.41	0.31
	Ackers and White (1973)	-3.21	-1.21	-7.61	-8.66	-6.52	-2.26	-1.82	-2.28	-0.57	0.53	0.53	1.03
	Yang (1973) + Yang (1984)	-5.50	-7.18	-5.04	-9.00	-25.58	-0.96	-1.82	-0.72	1.00	0.25	0.31	0.23
	DuBoys (1879)	-22.36	-11.54	-2.72	-10.40	-45.67	-10.66	-3.16	-3.66	-0.56	1.34	0.51	0.36

\* ST : Number of Stream Tube

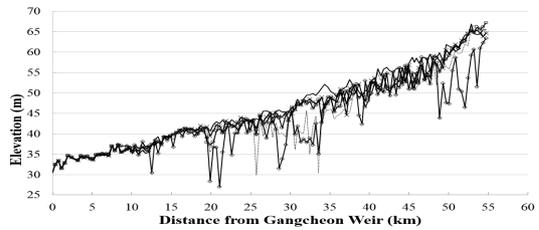
하였다. 네 가지 유사이송공식을 적용한 결과에서 최심하상 고의 변화량을 비교해보면, Q 60%을 적용했을 때 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -13.57 m ~ 2.70 m, Ackers and White 공식은 -7.05 m ~ 1.78 m, Yang 공식은 -6.13 m ~ 1.88 m, DuBoys 공식은 -21.90 m ~ 2.48 m의 최심하상의 변동을 보였다.

Q 80%를 적용했을 때 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -19.85 m ~ 2.35 m, Ackers and White 공식은 -8.58 m ~ 1.84 m, Yang 공식은 -7.66 m ~ 2.90 m, DuBoys 공식은 -17.75 m ~ 2.31 m의 최심하상의 변동을 보였다. Q 100%를 적용했을 때 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -24.60 m ~ 1.69 m, Ackers and

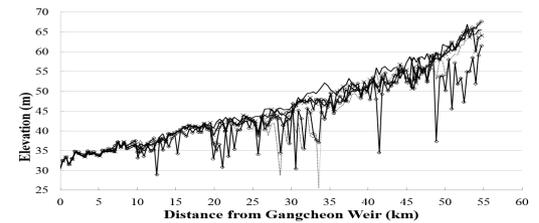
White 공식은 -9.65 m ~ 2.17 m, Yang 공식은 -6.93 m ~ 3.54 m, DuBoys 공식은 -22.50 m ~ 2.66 m의 최심하상의 변동을 보였다. Q 120%를 적용했을 때 최심하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과 -19.77 m ~ 4.04 m, Ackers and



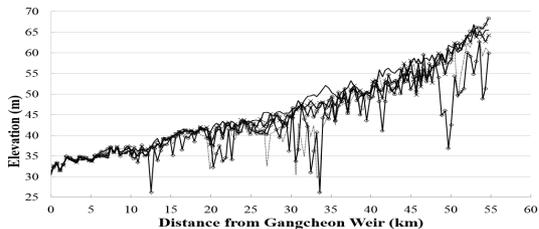
(a) Q 60%



(b) Q 80%

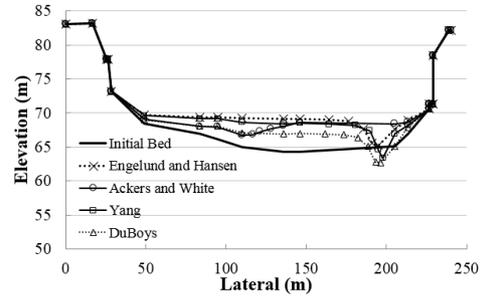


(c) Q 100%

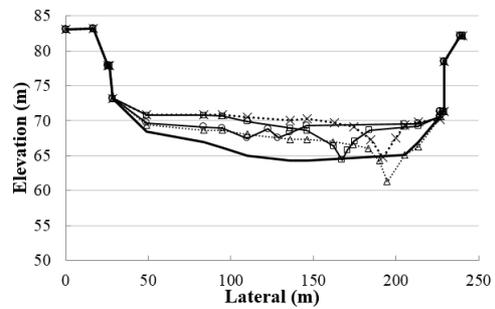


(d) Q 120%

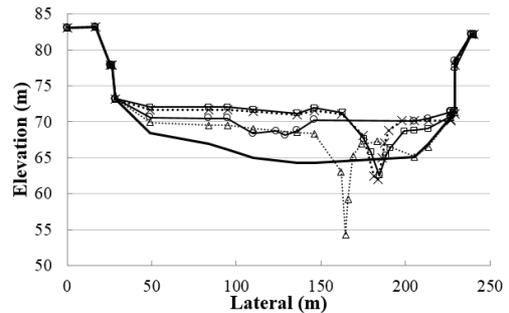
Fig. 7. Thalweg elevation changes for various discharge scenarios



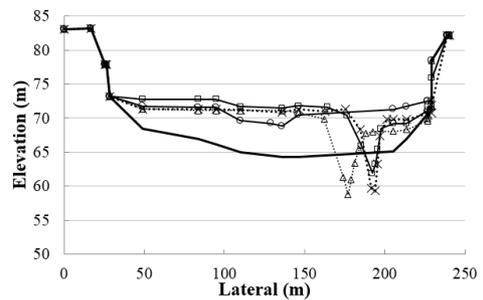
(a) Q 60%



(b) Q 80%



(c) Q 100%

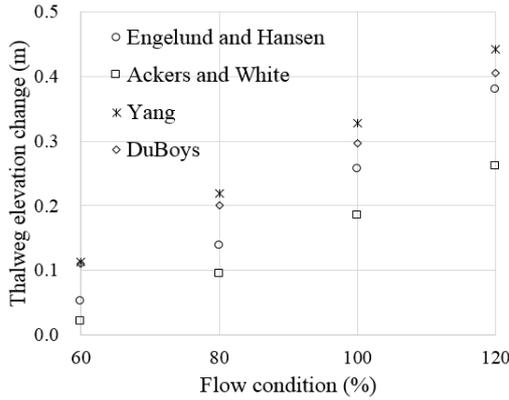


(d) Q 120%

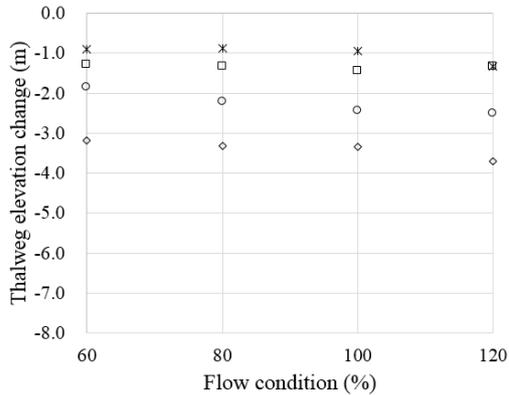
Fig. 8. Cross-sectional changes at 55.5 km from Gangcheon weir (three stream tubes)

White 공식은  $-7.54 \text{ m} \sim 2.93 \text{ m}$ , Yang 공식은  $-7.73 \text{ m} \sim 4.17 \text{ m}$ , DuBoys 공식은  $-25.02 \text{ m} \sim 2.32 \text{ m}$ 의 최심하상의 변동을 보였다.

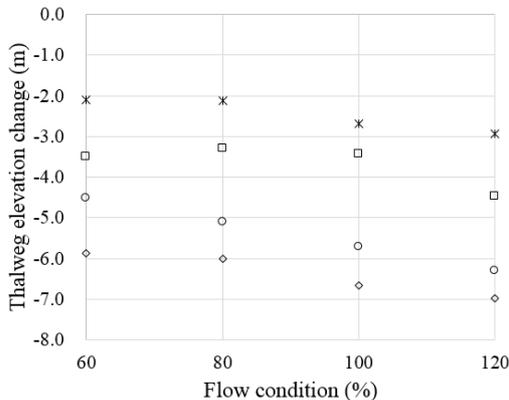
Fig. 8은 수류튜브 3개를 활용한 경우의 강천보에서 55.5 km 상류 지점에서의 단면변화를 도시하고 있다. 유량이 Q 60%에서 Q 120%으로 커질수록 깊어지는 것을 알 수 있다.



(a) Stream Tube 1



(b) Stream Tube 3



(c) Stream Tube 5

Fig. 9. Averaged thalweg elevation change for study reach

수류튜브 3개를 적용하여 모의를 한 결과, 횡단면의 변화가 1개를 적용했을 때 보다 구간별 변화폭에 차이가 있었다. 횡단면 변화를 비교해보면, Q 60%를 적용했을 때 하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과  $-0.70 \text{ m} \sim 4.91 \text{ m}$ , Ackers and White 공식은  $0.00 \text{ m} \sim 4.36 \text{ m}$ , Yang 공식은  $-1.32 \text{ m} \sim 4.27 \text{ m}$ , DuBoys 공식은  $-2.87 \text{ m} \sim 2.73 \text{ m}$ 로 나타났다. Q 80%를 적용했을 때 하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과  $-1.07 \text{ m} \sim 6.03 \text{ m}$ , Ackers and White 공식은  $-0.70 \text{ m} \sim 5.02 \text{ m}$ , Yang 공식은  $-0.56 \text{ m} \sim 4.97 \text{ m}$ , DuBoys 공식은  $-3.55 \text{ m} \sim 3.09 \text{ m}$ 의 결과를 나타냈으며, Q 100%를 적용했을 때 하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과  $-1.11 \text{ m} \sim 7.33 \text{ m}$ , Ackers and White 공식은  $0.00 \text{ m} \sim 5.99 \text{ m}$ , Yang 공식은  $-1.00 \text{ m} \sim 7.66 \text{ m}$ , DuBoys 공식은  $-10.83 \text{ m} \sim 4.29 \text{ m}$ 로 나타났다. Q 120%를 적용했을 때 하상의 변화는 Engelund and Hansen 공식의 적용결과  $-6.60 \text{ m} \sim 7.02 \text{ m}$ , Ackers and White 공식은  $0.00 \text{ m} \sim 6.22 \text{ m}$ , Yang 공식은  $-2.57 \text{ m} \sim 7.56 \text{ m}$ , DuBoys 공식은  $-7.12 \text{ m} \sim 6.88 \text{ m}$ 로 유사량 공식마다 구간별 침식 및 퇴적양상에 차이를 보이고 있다.

Fig. 9는 전체구간의 최심하상고의 평균을 유사이송 공식별, 수류튜브 개수별, 유량별로 도시하였다. 수류튜브가 1인 Fig. 9(a)의 경우 전술한 바와 같이 하상의 상승만 발생하였고 유량이 증가할수록 하상의 상승이 커지는 것을 보인다. Fig. 9(c)의 경우에는 하상저하량이 (a)와 (b)의 경우 보다 과도하게 크다. 가장 적절한 수류튜브 개수 3개를 활용한 Fig. 9(b)의 경우 유량이 증가할수록 전구간의 평균 최심하상이 작지만 낮아지는 경향을 보인다. 즉 기후변화에 따라 유량이 많아질수록 본 연구구간의 수심이 깊어질 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 준2차원 수치모형인 GSTARS를 이용하여 남한강 유역인 충주댐 하류에서 강천보 구간 사이의 기후변화 영향을 분석하고자 유량의 변화에 따른 시나리오를 구성하고 유사량 공식과 수류튜브 개수에 따른 각각의 시나리오별 하상 변동 양상을 예측하고 최심하상고, 횡방향에 따른 모의 결과를 분석하였다. 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모형의 검증을 위해 하천정비기본계획보고서서의 빈도별 홍수량을 적용하여 모의를 실시하여 실측홍수위와 비교 분석 후 상관성 검토를 한 결과, Nash and Sutcliffe 효율계수와 결정계수의 경우 0.99이상으로 정확성이 높으며, 평

균제 공급 오차의 경우도 달천의 경우 0.45 ~ 0.50, 섬강이 0.70 ~ 0.73으로 정확성이 비교적 높게 나타났다.

- 2) 수류튜브가 늘어날수록 하상고가 낮아지며, 특히 수류튜브가 5개인 경우 중심부분에서는 과대 침식이 산정되어 적용성이 떨어진다고 판단된다. 또한 수류튜브가 1개인 경우는 전 구간에 걸쳐 하상상승만 발생하여 실질적인 2차원 하상변동은 모의가 불가능하였다. 따라서 2차원적인 하상거동을 모의하기 위하여는 3개의 수류튜브의 활용이 필요하다. 이는 Ahn and Yang (2014) 과 Ahn and Yen (2015) 의 선행연구의 결과와 일치하고 있으며, 수류튜브를 활용한 하상변동 모형은 수류튜브간에 유사의 이송은 각 튜브사이의 하상의 경사가 안식각을 초과하는 경우에만 가능하다는 가정에서 출발하였다. 즉 튜브가 많으면 그만큼 튜브상호간 유사이송량을 오히려 줄이게 되는 역효과를 가지고 올 가능성이 있다고 제시하였다.
- 3) 유사이송공식의 영향을 분석해 본 결과 DuBoys와 Engenlund and Hansen 공식을 활용하였을 경우 과도한 하상저감이 모의되어 남한강에 적용이 불가능하였다. Ackers and White 공식과 Yang 공식이 하상변화를 적절히 모의하였다.
- 4) 기후변화에 따라 유량의 변화가 생길 가능성이 있다. 유량의 변화에 따라 하천의 변화양상이 달라질 것으로 예상된다. 4대강 사업 이전의 상태가 하천의 동적평형상태에 가까워 하천의 진화는 사업이전의 모습으로 돌아가려는 경향을 보일 것이다. 준설형상은 하도내 좁은 곳을 넓혀 놓은 것으로 향후 준설로 넓어진 부분이 다시 좁아질 것이다. 본 연구에서 수류튜브 3개와 5개를 활용한 경우 유사이송공식과 유량과 무관하게 모두 다시 좁아지는 것으로 모의하였다. 그리고 유량이 증가할수록 하도가 깊어질 것으로 예상된다.
- 5) 기후변화는 향후 어떻게 발생할지 불확실하며 하도의 변화도 마찬가지이다. 본 연구에서는 다양한 유량조건, 유사이송공식, 2차원 하상모의기법(수류튜브개수)에 따라 기후변화 양상을 예측하였다. 지속적인 하천 단면자료, 하상토, 유입유량 및 유사량 등에 대한 자료가 모니터링 되고 공개되면 예측의 정확도를 높일 수 있을 것으로 생각한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ackers, P., and White, W.R. (1973). "Sediment Transport: New Approach and Analysis." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 11, pp. 2041-2060.
- Ahn, S.J., Yoon, S.H., and Baek, N.D. (2002). "Prediction of River Bed Variation using Numerical Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 693-701.
- Ahn, J. (2012). "Introduction of Riverbed Variation Numerical Model." *Journal of Water for the Future*, Vol. 45, No. 6, pp. 104-105.
- Ahn, J., Yang, C.T., Boyd, P.M., Pridal, D.B., and Remus, J.I. (2013). "Numerical modeling of sediment flushing from Lewis and Clark Lake." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 182-193.
- Ahn, J., and Yang, C.T. (2014). Simulation of lateral migration of all American canal with semi-two dimensional sediment transport model, *KSCE Journal of Civil Engineering*. Vol. 18, No. 6, pp 1896-1903.
- Ahn, J., and Yang, C.T. (2015). Determination of recovery factor for simulation of non-equilibrium sedimentation in reservoir, *International Journal of Sediment Research*. Vol. 39, No. 1, pp. 68-73.
- Ahn, J., and Yen, H. (2015). Semi-two dimensional numerical prediction of non-equilibrium sediment transport in reservoir using stream tubes and theory of Minimum stream power. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 1922-1929.
- Ahn, J.M., Lyu, S., and Lee, N.J. (2013). "Determination of the Optimal Sediment Discharge Formula for Hyeongsan River Using GSTARS." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 1B, pp. 1-7.
- Choi, H., Lim, C.S., and Jung, J.W. (2011). "Analysis of River Variation at the Downstream of Ji-Chun using Numerical Model." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 117-125.
- Dubois, P. (1879). "Le rohne et les rivieres a lit affouillable." *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 18, No. 5, pp. 141-195.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*, Tekisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Hwang, S.D., Choi, S.H., Lee, S.J., and Jang, C.L. (2013). "Long-term Riverbed Change Simulation and Analysis in the River." *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 1-6.
- Jang, E.K., Lim, J.C., Ji, U., and Yeo, W.K. (2011). "Parameter Calibration and Sensitivity Analysis for Numerical Modeling of Flow and Bed Changes near the Opening Gate for Sediment Release." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 20, No. 9, pp. 1151-1163.
- Lee, J.H. (2006). "Analysis of Dalcheon River Bed Change using

- GSTARS Model.” *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 7, No. 6, pp. 1264-1270.
- Legates, D.R., and McCabe, G.J. (1999). “Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation.” *Water Resource Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 645-654
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2009). “Han River Master Plan Report” Technical Report.
- Morris, G.L., and Fan, J., (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoir, and Watersheds for Sustainable Use*, McGrawHill, NewYork.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Nathalie, E., Asselman, M., Middelkoop, H., and Van Dijk, P.M. (2003). “The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine.” *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 16, pp. 3225-3244.
- Rim, C.S., Son, K.I., Lee, J.J., and Yoon, S.E. (1999). “A Study on the Sediment Movement using Numerical Models.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 32, No. 2, pp. 131-142.
- Samaras, A.G., and Koutitas, C.G. (2014). “Modeling the impact of climate change on sediment transport and morphology in coupled watershed-coast systems: A case study using an integrated approach.” *International Journal of Sediment Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 304-315.
- Seo, I.W., Kim, D.G., and Lee, J.H. (1995). “Analysis of River Bed Change by Using Computer Model GSTARS.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 1679-1687.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kurnar, A., and Lettenmaier, D.P. (2002). Long-range experiment hydrologic forecasting for the eastern United States, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 107, No. 20, pp. 6.1-6.15.
- Woo, H.S., and Yu, K.K. (1990). “Test and Application of the Modified Einstein Procedure to Rivers in Korea.”, Korea Institute of Construction Technology.
- Yang, C.T. (1973). “Incipient Motion and Sediment Transport.”, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 10, pp. 1679-1704.
- Yang, C.T. (1984). “Unit stream power equation for gravel.”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1783-1797.
- Yang, C.T., and Simões, F.J.M. (2002). User’s Manual for GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0), U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.