

CCHE1D 모형을 이용한 저수지 붕괴에 따른 하상변동 해석

손인호* · 김병현** · 손아롱*** · 한건연****

Son, In Ho*, Kim, Byunghyun**, Son, Ah Long***, Han, Kun Yeun****

Numerical Analysis of River Bed Change Due to Reservoir Failure Using CCHE1D Model

ABSTRACT

This study presents the analysis of flood and bed deformation caused by reservoir failure. The CCHE1D is used to simulate 1D non-uniform, non-equilibrium sediment transport and bed deformation. The CCHE1D deals with the adaptation length for non-equilibrium sediment, classified sediment particle for non-uniform sediment and mixing layer for the exchange with the sediment moving with the flow. The model is applied to Ha!Ha! river basin where was experienced reservoir failure in 1996 to analyze non-uniform and non-equilibrium sediment transport. The calculations are compared with morphological bed changes of pre- and post-flood. In addition, model sensitivity to main parameters involving adaptation length ($L_{s,b}$), non-equilibrium coefficient (a_s), mixing layer thickness (δ_m) and porosity (p) is analyzed. The results indicates that thalweg change is the most sensitive to non-equilibrium coefficient (a_s) among those parameters in the study area.

Key words : CCHE1D, Reservoir failure, Bed change, Non-uniform sediment, Non-equilibrium sediment transport

초록

본 연구에서는 저수지의 붕괴로 인한 하류부 하천의 하상변동에 대한 해석을 수행하였다. 저수지 붕괴에 따른 1차원 비평형, 비균일 유사의 이송과 하상 변동을 연구하기 위해 CCHE1D 모형을 이용하였다. CCHE1D 모형은 비평형 및 비균일 유사해석을 위해 조정거리와 분류된 입자의 입경을 사용하며, 하상 물질의 교환을 위한 혼합층의 개념이 사용된다. CCHE1D 모형을 1996년 저수지 붕괴가 발생한 Ha!Ha!강 유역에 적용하여 저수지 붕괴로 인한 하류부의 비평형, 비균일 유사이송을 해석하고, 계산 결과를 저수지 붕괴전·후에 하류부 실측 하상과 비교하였다. 또한, 조정계수($L_{s,b}$), 비평형 계수(a_s), 혼합층 두께(δ_m), 공극률(p)을 포함하는 주요 매개변수에 대한 민감도를 분석하였으며, 대상유역에서는 비평형 계수가 하상변동에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

검색어 : CCHE1D, 저수지 붕괴, 하상변동, 비균일 유사, 비평형 유사 이송

1. 서론

최근 이상강우로 인해 노후 저수지의 붕괴 위험성이 증가하고 있으며, 지방자치단체나 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지들의 노후화 및 수문환경 변화에 따른 시설규모의 비적정성 등으로 저수지 붕괴사고가 끊이지 않고 발생하고 있다. 또한 소규모이지만 지진의 발생 빈도가 점차 증가하고 있어 지진으로 인한 저수지 붕괴도 간과할 수 없는 상황이다. 최근에 발생한 저수지 붕괴 사례로는

* (주) 창설 기업부설연구소 수석연구원 (Changseol Co., Research Institute · chunma9@nate.com)

** 종신회원 · 경북대학교 연구교수 (Kyungpook National University · bhkmc@gmail.com)

*** 국립재난안전연구원 연구사 (National Disaster Management Institute · salong83@korea.kr)

**** 종신회원 · 교신저자 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · kshanj@knu.ac.kr)

Received November 19, 2015/ revised December 23, 2015/ accepted March 10, 2016

2013년 경주 산대저수지 붕괴, 여주 옥천저수지 붕괴, 2014년 영천 괴연저수지 붕괴, 부산 내덕저수지 붕괴 등이 있으며, 2012년 이후로 10개의 노후 저수지가 붕괴되었다.

전국의 17,477개의 농업용 저수지 중에서 건설된 지 30년이 넘는 저수지는 16,646개(95%)로 노후화가 심각한 상황이며, 지방자치단체에서 관리하는 저수지 중에서 30년 이상 노후화된 저수지 13,711개로 97%에 달하는 수준이다. 지방자치단체에서는 안전진단을 통해 D등급 이하의 진단을 받은 노후 저수지를 재해위험 저수지로 고시하고 있으며, 2014년 말 기준 181개소에 이르고 있다(Choi, 2015).

저수지 붕괴는 홍수파의 하류 전달로 인한 피해가 일차적이며 유사 이송 및 하상 변동에 의한 하상의 침식과 퇴적, 하류부 수로 폭의 확대 등으로 피해가 발생할 수 있다. 하상 변동이 제방 붕괴, 범람 등으로 또 다른 홍수 피해의 원인이 될 가능성이 있고 홍수파의 전파에도 다시 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다. 하지만, 국내에서는 홍수에 대한 조사, 분석, 대비에 상대적으로 많은 노력이 기울여 지는데 반해 유사 이송과 하상변동에 대한 연구는 부진한 편이다. 본 연구에서는 저수지 붕괴로 인한 빠른 유속과 전단력의 영향으로 발생할 수 있는 침식을 고려하여 유사이송 및 하상변동 계산을 실시하고 과도한 유사의 퇴적으로 인한 하상변동이 하천 시설물과 하천관리 등에 미칠 영향을 분석하고자 한다. 또한, 흩으로 축조된 저수지의 붕괴로 인해 대량의 유사가 하류로 전달될 경우에 대비한 유사이송 양상을 분석하여 발생 가능한 피해에 대처하기 위한 정보를 제시하고자 한다.

하상변동에 관한 연구로 Wu and Wang (2008)은 CCHE1D 모형으로 노천 광산을 포함하는 하천구간에서 부정류와 유사이송 및 하상변동을 연구하였고, Gessese and Yonas (2008)는 CCHE1D와 SWAT 모형을 이용하여 저수지로 유입되는 유사 예측에 관한 연구를 수행하였다. Ahn et al. (2013), Ahn and Yang (2014), Ahn and Yen (2015)은 장구간에 걸친 하상변동을 1차원 모형을 이용하여 모의하는 방법을 연구하였으며, Ahn and Yang (2015)은 비평형유사이송에 대한 1차원 모형의 매개변수(비평형계수)를 연구하였다. 그리고 Ding and Altinaka (2015)는 Marmot 댐의 제거로 인한 하류하천인 Sandy 강에서의 지형 변화 연구를 통해, CCHE1D 모형이 장기간의 하상지형 변화에 대한 모의와 댐 제거 후 하천 유사의 관리와 계획에 활용되어질 수 있음을 보여주었다. 국내에서 CCHE1D 모형을 적용한 하상변동 연구는 Son et al. (2015)이 농업용 저수지의 가상붕괴를 통한 수리 및 유사이송을 모의하고 하류부에서의 영향을 분석한 연구가 유일하다. 국내에서 CCHE1D 모형이 아닌 다른 모형을 적용한 연구로는 Jeong et al. (2010)이 HEC-6 모형을 이용하여 낙동강 하류구간에 대해 하상변동을 수치 모의하고, 그 결과를 유사량 공식별로 비교하였으

며, Hwang et al. (2013)은 내성천을 대상으로 항공사진을 활용한 하천의 장기적인 지형변화 양상과 GSTARS 모형을 적용한 주요지점의 하상변동 영향을 비교 분석하였다. Ahn et al. (2013)은 CCHE2D를 이용한 수리구조물에 의한 흐름 및 하상변동 연구를 통해 충청하천에서 발생하는 하천의 침식과 퇴적에 대한 연구를 수행하였고, Son et al. (2015)은 CCHE2D 모형을 이용하여 합천 창녕보 건설로 인한 흐름 및 하상변동을 비교 분석하였다.

이와 같이 국내에서는 CCHE1D를 적용한 하상변동 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 하천에서의 흐름과 유사이송 해석을 위해 확산과 모형과 동역학 모형의 적용이 가능하고 특히 저수지 붕괴와 같은 극한 홍수와 이에 따르는 하류부의 하상변동 모의가 가능한 CCHE1D 모형으로 저수지 붕괴와 이에 따른 하류부 하상변동에 대한 적용성 검토가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 입자의 서로 다른 크기 때문에 발생하는 비균일 유사의 발생과 이송과정, 차폐효과를 고려할 수 있는 유사이송 능력 공식이 내재되고, 실제 하천에서의 유사 이송 능력에 미치지 못하는 유사의 농도로 흐르는 비평형 유사이송 그리고 장기 하상변화의 예측을 고려할 수 있는 CCHE1D를 적용 모형으로 선정하였다.

연구유역으로는 국내에서는 저수지 붕괴로 인한 하류 하상변동에 대한 조사가 이루어지지 않아 관측자료가 전무한 실정이므로 실측자료의 활용이 가능한 Ha!Ha! 강에 적용하였다. 즉, 본 연구에서는 1996년 발생한 캐나다 Ha!Ha! 저수지 붕괴로 인한 하류지역의 하상변동을 예측하기 위해, 관측된 홍수량/홍수위와 CCHE1D 모형의 계산치와의 비교를 통해 흐름 해석에 대한 모형의 검증을 수행하였다. 그리고 홍수전 지형을 이용하여 계산된 모형의 최상하상 결과와 홍수후 실측된 최상하상을 비교 분석하였고, 최적 매개변수 입력 값 결정을 위하여 주요 하상변동 매개변수의 민감도 분석을 수행하였다.

2. CCHE1D 모형

CCHE1D모형은 NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering of University of Mississippi)에 의해 개발된 하천에서의 흐름과 유사이송을 해석하는 1차원 수치 모형이다. 흐름 해석은 하천에서의 주수로와 홍수터를 구분하여 부정류를 계산할 수 있고 각종 수리구조물의 영향 등의 고려도 가능하며, 국지적인 사류나 천이구간에서의 계산은 하이브리드 동역학/확산과 모형이 적용된다. 유사이송 해석은 비평형, 비균일 상태의 유사이송을 계산하고, 유사의 발생량과 퇴적량 계산은 하천 단면 지형의 변화와 하상물질의 조합, 제방침식, 수로 폭의 확대 과정과 맞물려 계산한다.

2.1 지배방정식

CCHEID 모형에서의 유사이송은 비평형상태를 모의할 수 있고, 비균일 유사이송과 하상변동, 하상토사를 연계하여 계산한다. 비균일, 비평형 상태의 유사를 모의하기 위한 지배방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\partial(AC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} + \frac{1}{L_s}(Q_{tk} - Q_{t^*k}) = q_{lk} \quad (1)$$

여기서, C_{tk} 는 분류된 k 번째 유사 등급의 면적 평균 유사 농도, Q_{tk} 는 분류된 k 번째 유사 등급의 실제 유사 이송량, Q_{t^*k} 는 분류된 k 번째 유사 등급의 유사 이송 능력, L_s 는 조정거리(adaptation length of non-equilibrium sediment), q_{lk} 는 측방 유사 유출입량을 나타낸다.

Eq. (1)은 일반화된 지배방정식으로 소류사, 부유사, 세류사 또는 총유사량에 적용될 수 있으며, 유사 이송량과 조정거리가 어떻게 정의되는지에 따라 구분된다. k 번째 유사등급에 의한 하상 변동은 다음과 같이 결정된다.

$$(1-p') \frac{\partial A_{bk}}{\partial t} = \frac{1}{L_s}(Q_{tk} - Q_{t^*k}),$$

$$(1-p') \frac{\partial A_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(AC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial Q_{tk}}{\partial x} = q_{lk} \quad (2)$$

여기서, p' 는 하상 물질의 공극률, $\frac{\partial A_{bk}}{\partial t}$ 는 크기 등급 k 에 의한 하상변동이다. 하상물질의 교환은 Fig. 1과 같이 몇 개의 층을 통해 이루어진다. 혼합층에서의 하상 물질 교환은 다음과 같이 설명된다.

$$\frac{\partial A_m p_{bk}}{\partial t} = \frac{\partial A_{bk}}{\partial t} + p_{bk}^* \left(\frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\partial A_b}{\partial t} \right) \quad (3)$$

여기서, p_{bk} 는 혼합층에서 k 번째 크기 등급의 백분율, $\frac{\partial A_m}{\partial t}$ 는 단면에서의 혼합층의 면적, $\frac{\partial A_b}{\partial t}$ 는 전체 하상변동을, p_{bk}^* 는

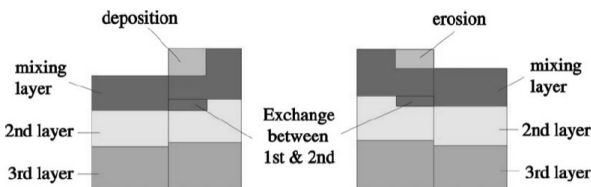


Fig. 1. Bed Material Sorting Mode (Wu and Vieira, 2002)

$\left(\frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\partial A_b}{\partial t} \right) \leq 0$ 일 경우에는 p_{bk} , $\left(\frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\partial A_b}{\partial t} \right) \geq 0$ 일 경우에는 혼합층 아래 층에서의 p_{bk} 을 나타낸다.

2.2 유사이송 및 하상변동 입력자료

CCHEID 모형을 이용한 유사이송과 하상변동 모의를 위해 중요한 입력 변수들이 몇 가지 존재한다. $L_{s,b}$, α_s , δ_m , p' 등이 그 변수들인데, 실제 적용을 위해 각 변수들 및 제시된 변수들의 값을 간단히 설명하였다.

2.2.1 $L_{s,b}$ (비평형 소류사 조정거리)

$L_{s,b}$ 는 비평형 상태의 소류사가 평형 상태가 되기 위해 필요한 거리로 지배적인 하상형태나 하천지형에 따라 선택하여야 한다. 사륜(모래 파의 높이가 3cm, 파장이 30cm정도의 작은 하상 형태)이 지배적인 하상에서는 모래의 도약거리로 $L_{s,b}$ 가 추천되며, 사구(사륜보다 큰 하상 형태)가 지배적인 하천은 사구의 길이와 평균 수심의 7.3배가 $L_{s,b}$ 로 추천된다. 교호사주가 지배적인 하상에서는 교호사주 길이, 또는 수로 평균 폭의 6.3배가 제시되어 있다. 하지만 이러한 하상 형태의 정보가 없을 경우에는 계산간격(Δx)의 2배 값이 사용될 수 있다(Wu, 2008).

2.2.2 α_s (비평형 부유사 조정 계수)

부유사의 조정거리($L_{s,s}$)는 $L_{s,s} = uh/\alpha_s \omega_{sk}$ 로 정의되며, 이 식에서 α_s 는 비평형 부유사 조정계수이다. α_s 는 보통 1보다 작으며, 심한 세굴($\alpha_s=1$), 심한 퇴적($\alpha_s=0.25$), 약한 세굴과 퇴적($\alpha_s=0.5$), 유사 농도가 높을 경우($\alpha_s=0.001$)와 같이 경우에 따라 매우 다른 값을 가질 수 있도록 제시되어 있다.

2.2.3 δ_m (혼합층 두께)

δ_m 의 변화는 하상변동에 직접적 영향을 미치지 않으나 시간의 변화에 따라 하상 구성물질에 영향을 미쳐 최종적으로 유사이송과 하상변동에 변화를 주게 된다. δ_m 은 사구(dune)의 높이(Δ)와 관련 있는 것으로 연구되고 있으며, $\delta_m = \max[0.5\Delta, 2d_{50}]$ 으로 제시되기도 하는데 자연하천에서는 0.05가 주로 사용된다.

2.2.4 p' (공극률)

p' 는 지배방정식에서 하상변동량의 변화에 기여하는데 p' 이 커지면 하상변동량이 같이 커지는 경향이 있다. CCHEID 모형은 비균일 하상 물질에 의한 공극률을 입력하도록 되어있으며, 경험공식 및 사용자 지정값을 이용할 수 있다.

2.3 유사이송 능력 공식

CCHEID에는 유사이송 능력을 계산하기 위해 SEDTRA 모듈

Table 1. Sediment Transport Capacity Formula in CCHE1D

Name	Formula
SEDTRA module	$C_{*t} = \sum_k p_k C_{*k} \quad (4)$
	C_{*t} is total sediment capacity in parts per million by weight (ppmw); C_{*k} is sediment transport capacity of the k-th size class in ppmw, and p_k is percentage of k-th size of sediment.
Wu, Wang and Jia	$\frac{q_{bk}}{p_{bk} \sqrt{(\gamma_s/\gamma-1)gd_k^3}} = 0.0053 \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \frac{\tau_b}{\tau_{ck}} - 1 \right]^{2.2} \quad (5)$
	$\frac{q_{sk}}{p_{bk} \sqrt{(\gamma_s/\gamma-1)gd_k^3}} = 0.0000262 \left[\left(\frac{\tau}{\tau_{ck}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{sk}} \right]^{1.74} \quad (6)$
	q_{bk} and q_{sk} are transport capacities of the k-th size class of the bed load and suspended load per unit channel width (m^2/s), respectively; p_{bk} is percentage of the k-th size class of bed material; n and n' are Manning/s coefficient for the bed and grain roughness of the bed, respectively; τ is total shear stress; τ_b is shear stress on the bed; U is average velocity; ω_{sk} is setting velocity.
Modified Acker and White	$G_{gr,k} = C \left(\frac{F_{gr,k} - 1}{A} - 1 \right)^m \quad (7)$
	$F_{gr,k} = \epsilon_k \frac{U_*^n}{[(\gamma_s/\gamma-1)gd_k]^{1/2}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log(10h/d_k)} \right]^{1-n} \quad (8)$
	U_* is shear stress; ϵ_k is correction factor; d_k is mean diameter of the k-th size class; A , C , m and n are coefficient.
Modified Engelund and Hansen	$f' \phi_k = 0.1(\epsilon_k \tau_{*k})^{5/2}, \phi_k = q_{*k} / [p_{bk} \sqrt{(\gamma_s/\gamma-1)gd_k^3}] \quad (9)$
	f' is friction factor; ϕ_k is dimensionless sediment transport rate; q_{*k} is bed material load transport rate; τ_{*k} is dimensionless bed shear stress; d_k is diameter of k-th size class of bed material; ϵ_k is correction factor.

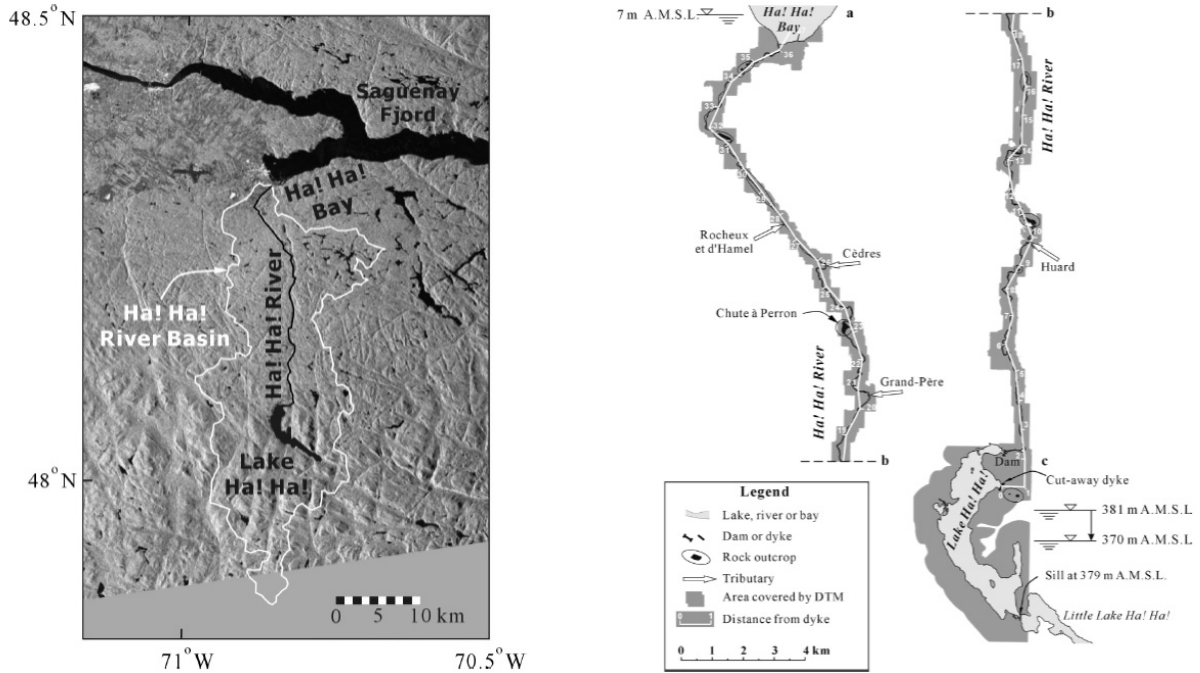


Fig. 2. Map of Ha!Ha! River Basin (Capart et al., 2007)

(Garbrecht et al., 1995), Wu, Wang and Jia 공식(Wu et al., 2000), 수정 Acker and White 공식(Proffitt and Sutherland, 1983), 그리고 수정 Engelund and Hansen 공식(Wu et al., 2000) 과 같은 4가지의 공식이 사용되어진다. 4가지 공식에 대한 주요 내용을 Table 1에 정리하였으며, 자세한 내용은 Wu and Vieira (2002)를 참고할 수 있다.

3. 대상유역

3.1 Ha!Ha! 저수지 붕괴

1996년 7월에 내린 호우로 인해 캐나다 퀘벡 Saguenay 지역에 홍수가 발생하였으며, 이 홍수는 인근 지역에 큰 피해를 발생시켰다. 이 지역에는 유역면적이 610km²인 Ha!Ha! 강이 위치하며(Fig. 2), Ha!Ha! 강 상류에 위치한 Ha!Ha! 저수지는 콘크리트 댐에 의해 저수되는데 본 댐에서는 홍수기간에 거의 피해가 발생하지 않았다. 하지만 본 댐의 남쪽에 위치한 흙으로 축조된 둑에서 붕괴가 발생하기 시작하여, 둑이 점점 포화가 진행되고 높아진 저수지 수위로 인해 월류가 발생하면서 붕괴되었다. 둑의 붕괴로 기존 하천까지 약 500m 가량 새로운 수로가 생겨났으며, 이 유로를 통해 저수지의 급격한 배수가 이루어졌다(Capart et al., 2007).

3.2 기본 자료 수집

1996년 홍수와 관련하여 다른 연구자들에 의해 추정된 주요 지점별 수위 및 유량을 Table 2에 정리하였고, Fig. 3은 당시의 Ha!Ha! 저수지에서의 수문상황을 보여준다. Fig. 3(a)는 저수지

Table 2. Stage and Discharge Estimates (Capart et al., 2007)

Parameter	Location	Value	Reference
Maximum stage			
Ha! Ha! reservoir	0 km	380.77 m A.M.S.L.	CSTGB (1997)
Ha! Ha! bay	36 km	7 m A.M.S.L.	INRS-Eau (1997)
Peak Discharge			
Inflow	—	160 m ³ /s	CSTGB (1997)
Outflow	0 km	1,010 m ³ /s	calculated from data in CSTGB (1997)
Ha! Ha! river	27 km	1,080–1,260 m ³ /s	Brooks and Lawrence (1999)
Tributary Inflows			
Huard	9.8 km	34 m ³ /s	Scenario 4 of CSTGB (INRS-Eau, 1997)
Grand-Pere	20.6 km	25 m ³ /s	
Cedres	25.8 km	37 m ³ /s	
Rocheux	27.7 km	84 m ³ /s	

수위-수표면적 관계, Fig. 3(b)는 시간에 따른 저수지 수위 변화, Fig. 3(c)는 저수지 붕괴 당시 연구유역에서의 시강우 자료, Fig. 3(d)는 저수지 유입 및 붕괴유출 수문곡선을 보여준다.

홍수 전후의 Ha!Ha! 강 유로를 따라 항공사진 측량된 DTM 자료가 있으며, 나머지 유역에 대해서도 홍수 전후에 촬영된 항공사진을 이용하여 고도를 추출한 DTM 자료가 생성되어 있다. 이러한 자료들은 Ha!Ha!강의 하상 변동을 연구한 Capart et al. (2007)의 첨부물로 제공되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 DTM 자료들을 지형자료로 활용하였다.

3.3 실제 하상변동 비교

3.3.1 홍수사상 검증

1996년에 발생한 Ha!Ha! 강 유역의 홍수사상에 대한 CCHE1D 모형의 검증을 위해 일부 지점에서 관측된 지점별 최대수위와 댐 하류 27km 지점에서 Brooks and Lawrence (1999)가 산정한 홍수량을 이용하였다. 이 자료들에 대한 내용은 Table 2에 제시하였

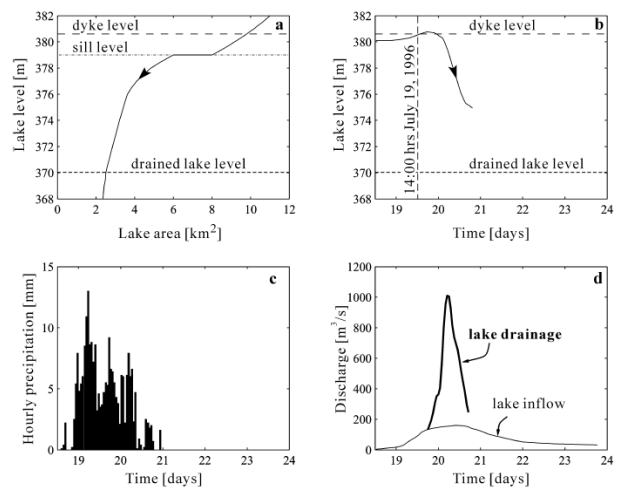


Fig. 3. Hydrological Data Related to the Lake Ha!Ha! Basin (Capart et al., 2007)

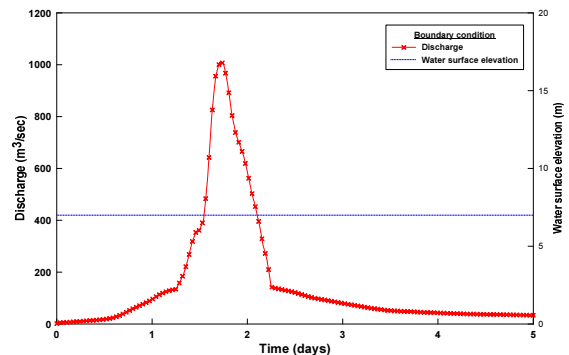


Fig. 4. Boundary Conditions

다. 모의를 위한 상류단 경계조건으로는 저수지 붕괴유량이 하류단 경계조건으로는 하루 Ha!Ha! 만(bay)에서의 일정 수위조건을 적용하였다(Fig. 4). 그리고 지류 유입은 Table 2에서 보여주듯이, 9.8, 20.6, 25.8, 27.7km 지점에서 각각 34, 25, 37, 84m³/s의 유량이 일정하게 유입되는 조건을 적용하였다(Capart et al., 2007).

대상 유역은 빙하기 매적된 토양 특성 때문에 배수 방향이 외부 영향에 의해 국부적으로 바뀌기도 하는데 홍수가 발생하면 심한 유로변화가 생기기도 한다. 또한, 입도분포곡선에 나타난 바로는 D90이 2mm로 세립질의 토양이 우세하므로 조도계수는 전체적으로 0.03~0.08 범위내에서 관측된 유량과 수위와 비교를 통해 조도계수를 조정하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 CCHE1D 모형으로 대상유역의 주요지점에서의 홍수량을 산정한 결과를 보여준다. 본 연구에서 계산된 27km 지점에서의 침투 홍수량은 약 1,112m³/s로 Brooks and Lawrence (1999)가 산정한 침투홍수량 범위인 1,080~1,260m³/s (Table 2) 사이에 존재하여 합리적인 값을 계산한 것을 확인할 수 있다. 그리고 본 연구에서 고려한 4개의 지류 유량의 영향으로

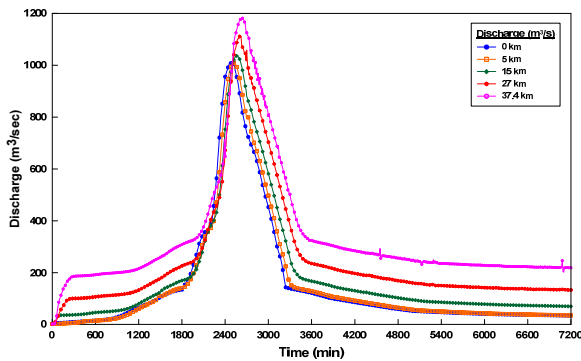


Fig. 5. Calculated Discharge at Major Stations

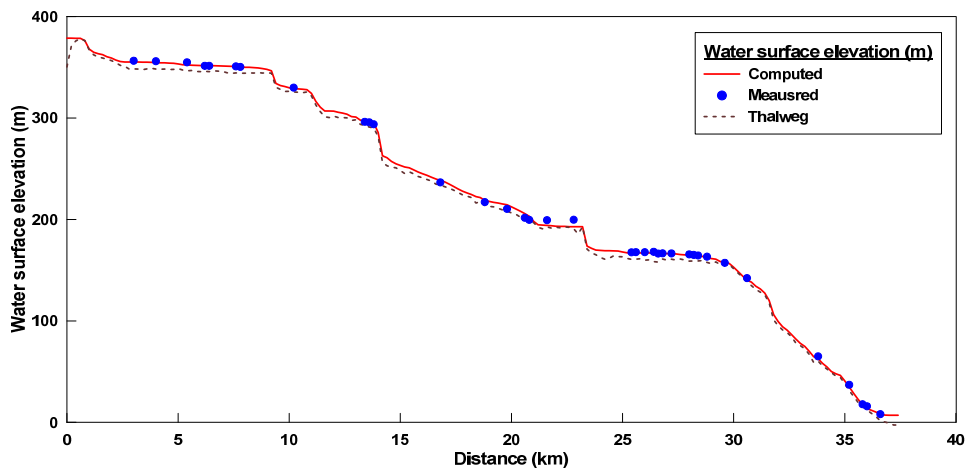


Fig. 6. Comparison Between Calculated and Measured Water Surface Elevation

Fig. 5에서 저수지 붕괴파가 하류로 전파할수록 유량이 감소하지 않고 증가하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 6은 1996년 홍수 발생 시 수위가 관측된 지점에서의 관측치와 본 연구에서의 계산치를 비교한 결과를 보여준다. 전체적으로 계산치와 관측치가 잘 일치하는 것으로 산정되었으나 일부 구간에서는 조금 차이가 발생한다. 이 지점들은 크게 붕괴부, 대규모 수로붕괴(Avulsion) 발생 구간, 하류의 단면 확대 구간으로 특히 상류로부터 23km 지점 인근에 대규모의 수로붕괴가 발생하였고 그 최대치가 20m에 달하는데 수로붕괴 발생과정에 대한 계산과 실제 발생 매커니즘 사이에서 발생하는 차이로 인해 큰 오차가 발생하는 것으로 판단된다.

3.3.2 하상변동 모의 입력구성

Ha!Ha! 강의 홍수로 인한 하상변동을 모의하기 위해 먼저 입력 조건을 구축하였다. 유사 이송 및 하상변동을 위한 입력 자료로는 유입 유사량 조건, 유사 크기 구분, 입경분포, 하상 구성 물질, 노두의 분포 고려 등이 필요하다. 본 연구에서는 저수지 붕괴시 유사량 유입은 없는 것으로 가정하고 모의하였는데 저수지의 붕괴부 자료의 획득이 곤란하여 Ha!Ha! 강 하상 변동 모의에서는 제외하였다. 하상 물질의 입경분포와 유사 크기 구분은 실제 실험결과를 이용하여 입력하였는데, 0.1~1.0mm 사이의 입경을 가진 유사량 전체의 약 70% 정도를 차지하고 있다(El kadi Abderrezzak and Paquier, 2009). Ha!Ha! 강의 일부구간에는 하상에 노출된 암반이 존재하며, 이러한 암반은 하상변동 모의에 입력조건으로 고려되어야 한다. 즉, 암반의 존재 때문에 더 이상 침식이 발생하지 않는 것을 모의 수행시 고려하여야 하므로 조사된 암반의 등고선을 바탕으로 각 단면별로 침식 가능 여부를 부여하였다.

하상변동 계산의 수치안정성을 위해 중요한 변수인 $L_{s,b}$, α_s ,

δ_m , 그리고 p' 값들은 다양한 연구를 통해 제시되어 왔지만, 불확실성이 많고 적용되는 각각의 경우에 따라 다른 값을 가지는 것으로 조사되었다. 따라서, 본 연구에서는 Ha!Ha! 강에서의 각 변수들에 대한 민감도 분석을 통해 적절한 입력 변수의 범위를 설정하였다.

3.3.3 민감도 분석

앞서 제시된 입력변수 $L_{s,b}$, α_s , δ_m , 그리고 p' 에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 위해 실측치와의 검증과정에서 가장 정확한 결과를 제시하는 매개변수 값($L_{s,b}=1000$, $\alpha_s=0.005$, $\delta_m=0.1$, $p'=0.35$)을 기준으로 하였고, 각 매개변수들의 초기값은 Wu and Vieira (2002)가 제안한 특정 값 혹은 범위 내에서 결정하였다. 그리고 각 변수들은 독립적인 변수들로 가정하였다.

먼저, $L_{s,b}$ 에 대한 매개변수 민감도 분석을 위해, 다른 입력변수들은 그대로 두고 소류사의 $L_{s,b}$ 를 변화시키면서 입력하였을 때 최심하상의 변화를 살펴보았다. Ha!Ha! 강의 평균 수로폭이 32m 정도이고 자연하천에서 입력 값으로 제시되는 평균 수로폭의 6.3배를 적용한 $L_{s,b} = 200m$ 를 초기값으로 하여 그 값을 변화 시키면서 분석하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 소류사의

$L_{s,b}$ 의 변화는 1996년 홍수에 대한 Ha!Ha! 강에서의 최심하상 변화에 크게 영향을 미치지 않았으며, $L_{s,b} = 200m$ 를 기준으로 그 이상의 값이 사용되었을 경우 거의 변화가 없는 것으로 분석되었다.

α_s 의 민감도를 분석하기 위해서, 앞서 수행한 방법과 마찬가지로 다른 입력변수들은 모두 그대로 두고 부유사의 $L_{s,s}$ 결정을 위해 α_s 를 변화시키면서 입력하였을 때 최심하상의 변화를 살펴보았다. 본 연구에서는 하상변동 검증과 더불어 다양한 변화 양상을 살펴보기 위해 α_s 를 0.001에서 1.0 사이의 값을 입력하였으며, 그 결과는 Fig. 7(b)에 나타내었다. α_s 를 변화시켰을 때 값의 변화에 따라 최심하상의 값에도 많은 변화가 있는 것으로 나타났다. 특히, 붕괴지점으로부터 22, 23km 지점에서의 변화는 채택된 α_s 값을 기준으로 15~20m의 변동 폭을 보여주었다.

δ_m 은 자연하천에서 0.05가 추천되고 있으며, 본 연구에서는 0.05를 기준으로 다양한 값을 입력한 후 그 결과를 분석하여 Fig. 7(c)에 나타내었다. 주요 지점에서 혼합층 두께의 입력값이 변화함에 따라 채택된 입력값을 기준으로 최심하상고가 최대 14 m까지 차이가 남을 보여주었으며, 하상고의 변화가 큰 몇 개의 단면을 제외하고 전반적으로 1m 이내에서 변화가 나타났다

Fig. 7(d)는 p' 의 변화에 따른 최심하상의 변화를 보여준다.

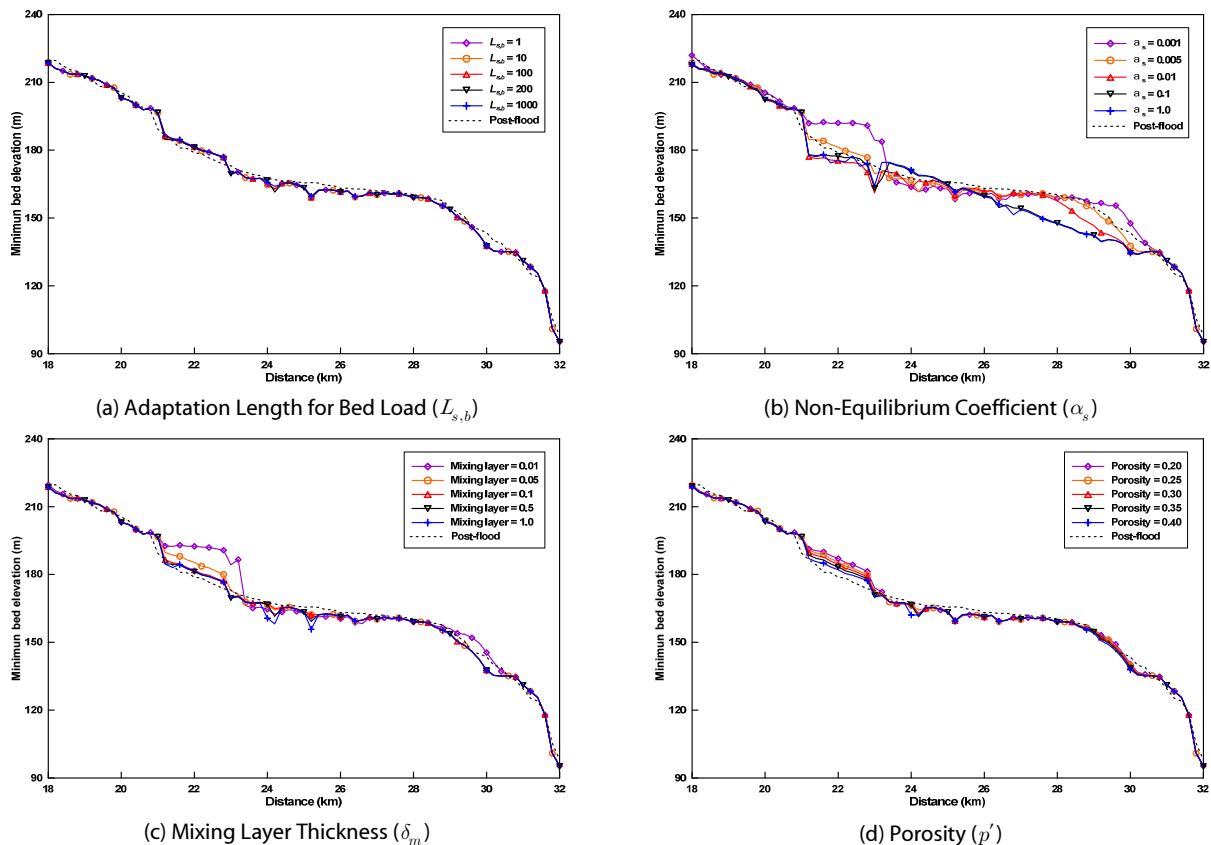


Fig. 7. Model Sensitivity Analysis According to the Input Parameters

전체 모의 구간에 걸쳐 동일한 공극률이 입력되었을 경우 결과 값의 변화를 보기 위해 0.2~0.4까지 공극률을 변화시키면서 최상하상의 변화를 살펴보았다. α_s 와 δ_m 과는 조금 차이가 있으나 공극률의 변화에 따라 최상하상의 모의 결과 값이 변화하는 것으로 나타났다. 붕괴지점으로부터 22km 하류지점에서의 변화가 약 5m 정도의 차이를 보였다.

성능을 평가하는 통계 변수인 Brier Skill Score (BSS)를 이용하였다. 전체 수로에 대한 하상 지형 변화를 계산하는 모형의 성능을 측정하기 위한 BSS값은 Eq. (10)과 같이 표현된다. 지형 변화와 관련한 모형 중 BSS의 값이 0.2이상이면 비교적 정확한 모형이라는 연구도 있다(Davies et al., 2002).

3.3.4 최적값 선정을 위한 모형 성능평가

모형이 얼마나 정확한가에 대한 문제는 일반적으로 정성적인 표현보다는 정량적인 방법이 사용되어지며, 본 연구에서는 모형의

$$BSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [(z_b(x_i, t)_{mes} - z_b(x_i, t))]^2}{\sum_{i=1}^N [(z_b(x_i, t)_{mes} - z_b(x_i, 0))]^2} \quad (10)$$

Table 3. BSS (Brier Skill Score) for Change in Variables

Sediment Transport Capacity	Variables	BSS (Brier Skill Score)				
		$L_{s,b}(1000)$	$L_{s,b}(200)$	$L_{s,b}(100)$	$L_{s,b}(10)$	$L_{s,b}(1)$
SEDTRA module	Adaptation length for bed load	$L_{s,b}(1000)$	$L_{s,b}(200)$	$L_{s,b}(100)$	$L_{s,b}(10)$	$L_{s,b}(1)$
		0.31278	0.30827	0.32222	0.32222	0.32222
	Non-equilibrium coef. for suspended load	$\alpha_s(0.001)$	$\alpha_s(0.005)$	$\alpha_s(0.01)$	$\alpha_s(0.1)$	$\alpha_s(1.0)$
		0.10263	0.30827	0.47880	0.36265	0.22573
	Mixing layer thickness	$\delta_m(0.01)$	$\delta_m(0.05)$	$\delta_m(0.1)$	$\delta_m(0.5)$	$\delta_m(1.0)$
		0.19949	0.30117	0.29963	0.30827	0.29603
	Porosity	$p'(0.20)$	$p'(0.25)$	$p'(0.30)$	$p'(0.35)$	$p'(0.40)$
		0.23921	0.23064	0.25831	0.22131	0.28341
Wu, Wang and Jia	Adaptation length for bed load	$L_{s,b}(1000)$	$L_{s,b}(200)$	$L_{s,b}(100)$	$L_{s,b}(10)$	$L_{s,b}(1)$
		0.75246	0.73975	0.72679	0.72679	0.72679
	Non-equilibrium coef. for suspended load	$\alpha_s(0.001)$	$\alpha_s(0.005)$	$\alpha_s(0.01)$	$\alpha_s(0.1)$	$\alpha_s(1.0)$
		0.21833	0.73975	0.38229	-0.94590	-1.21440
	Mixing layer thickness	$\delta_m(0.01)$	$\delta_m(0.05)$	$\delta_m(0.1)$	$\delta_m(0.5)$	$\delta_m(1.0)$
		0.23136	0.69003	0.75416	0.73975	0.69876
	Porosity	$p'(0.20)$	$p'(0.25)$	$p'(0.30)$	$p'(0.35)$	$p'(0.40)$
		0.66157	0.70979	0.72866	0.73920	0.73297
Modified Ackers and White	Adaptation length for bed load	$L_{s,b}(1000)$	$L_{s,b}(200)$	$L_{s,b}(100)$	$L_{s,b}(10)$	$L_{s,b}(1)$
		0.37700	0.32203	0.31675	0.31675	0.31675
	Non-equilibrium coef. for suspended load	$\alpha_s(0.001)$	$\alpha_s(0.005)$	$\alpha_s(0.01)$	$\alpha_s(0.1)$	$\alpha_s(1.0)$
		0.06067	0.32203	0.55942	0.53738	0.44529
	Mixing layer thickness	$\delta_m(0.01)$	$\delta_m(0.05)$	$\delta_m(0.1)$	$\delta_m(0.5)$	$\delta_m(1.0)$
		0.18929	0.32729	0.32475	0.32203	0.36767
	Porosity	$p'(0.20)$	$p'(0.25)$	$p'(0.30)$	$p'(0.35)$	$p'(0.40)$
		0.22094	0.27282	0.25822	0.28537	0.30349
Modified Engelund and Hansen	Adaptation length for bed load	$L_{s,b}(1000)$	$L_{s,b}(200)$	$L_{s,b}(100)$	$L_{s,b}(10)$	$L_{s,b}(1)$
		-0.87701	-1.0424	-0.90773	-0.87715	-0.87707
	Non-equilibrium coef. for suspended load	$\alpha_s(0.001)$	$\alpha_s(0.005)$	$\alpha_s(0.01)$	$\alpha_s(0.1)$	$\alpha_s(1.0)$
		0.47790	-1.04240	-2.50354	-7.25207	-8.36374
	Mixing layer thickness	$\delta_m(0.01)$	$\delta_m(0.05)$	$\delta_m(0.1)$	$\delta_m(0.5)$	$\delta_m(1.0)$
		0.14409	-0.335	-0.6503	-1.0424	-0.9801
	Porosity	$p'(0.20)$	$p'(0.25)$	$p'(0.30)$	$p'(0.35)$	$p'(0.40)$
		-0.15206	-0.20456	-0.38281	-0.52561	-0.83343

여기서, $z_b(x_i, t)_{mc}$ 는 관측 하상고, $z_b(x_i, t)$ 는 계산 하상고, $z_b(x_i, 0)$ 는 초기 하상고를 나타낸다. 본 연구에서는 BSS를 활용하여 Ha!Ha! 저수지 붕괴로 인한 하류하천의 하상변동에 대하여 민감도 분석에 사용된 4가지 변수들($L_{s,b}$, α_s , δ_m , p')에 대한 성능평가를 실시하였다. 또한 유사이송 능력을 구하기 위해 CCHEID 모형에 포함되어 있는 4가지 공식(Table 1)에 대한 성능평가도 함께 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 보여주듯이, 유사이송 능력 공식에 따라 하상변동이 차이가 나는 이유로는 각 공식에 의한 유사이송 능력이 상대적으로 크거나 작게 산정되기 때문이다. 4가지 공식에 사용되는 변수들은 유속(V), 수위(h), 전단응력(τ), 침강속도(ω_s), 유사입경(d) 등으로 그 중에서 특히 유속의 변동성은 침식구간에서 하상변동의 편차가 심하게 발생하는 원인으로 판단된다.

또한, 민감도분석에 사용된 4가지 변수에 대한 모형 성능평가 결과를 다음과 같이 정리하였다. 비평형 소류사 조정거리($L_{s,b}$), 부유사 조정계수(α_s), 혼합층 두께(δ_m), 공극률(p')의 입력값을 변화시키면서 얻은 최심하상의 결과를 이용하여 BSS값을 산정한 결과, $L_{s,b}$ 는 1000(BSS=0.75246), α_s 는 0.005(BSS=0.73975), δ_m 은 0.1(BSS=0.75416), p' 는 0.35(BSS=0.73920)일 때 가장 높은 것으로 나타났다.

3.3.5 하상변동 검증

CCHEID 모형의 하상변동 입력변수 $L_{s,b}$, α_s , δ_m , p' 에 대해 일정 범위 내에 있는 이들 변수를 조합하여 민감도 분석과 모형성능평가를 통해 매개변수의 가장 적절한 조합을 구하였다. 이 과정에서 $L_{s,b}=1000$, $\alpha_s=0.005$, $\delta_m=0.1$, $p'=0.35$ 가 최적의 조합으로 선정되었으며, 이 값들을 적용한 모형의 결과와 Ha!Ha! 강에 대한 하상변동 관측자료를 비교함으로써 적용모형을 검증하였다.

Ha!Ha! 강 유역의 홍수에 대한 유로 변동은 붕괴지점으로부터 23km 지역에서 가장 크게 발생하였다. 하상변동에 대한 검증 자료는 1996년 홍수전후의 지형자료가 획득되어 있어서 홍수전후의 최심하상의 비교가 가능하다. Fig. 8은 홍수 전과 후의 실측된 최심하상의 변화 및 모의 결과의 비교를 보여준다. Fig. 8(a)는 전체 하도를 대상으로 홍수전후의 최심하상과 CCHEID를 이용한 계산결과를 도시한 것이며, Fig. 8(b)는 붕괴지점으로부터 23km를 전후한 최심하상 변화의 비교를 확대하여 보여주었다. Fig. 8에서 보여주듯이, 23km 지점에서의 수로붕괴와 30km 지점에서의 침식과 하류 수로 폭의 확대에 의해 하상의 큰 변화가 발생하였으나, 계산치가 관측치 최심하상의 양상을 잘 반영하였고 또한 붕괴부 지점에서도 홍수 후의 최심하상을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

Ha!Ha! 강의 전체 구간에 대하여 홍수발생 후 침식이 크게 발생한 3개의 구간, 저수지 직하류부 1~2km 구간, 붕괴지점으로부터

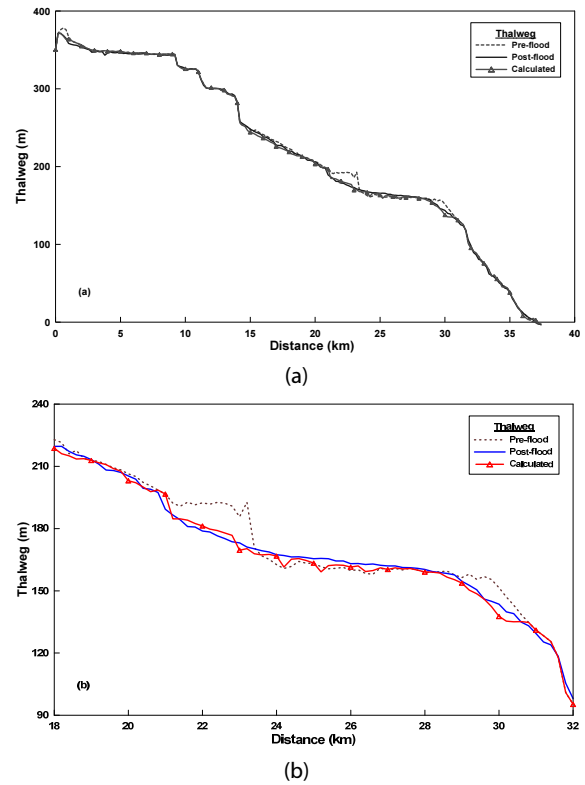


Fig. 8. Comparison of Calculated and Surveyed Thalweg; (a) Whole Section and (b) Section 18~32km

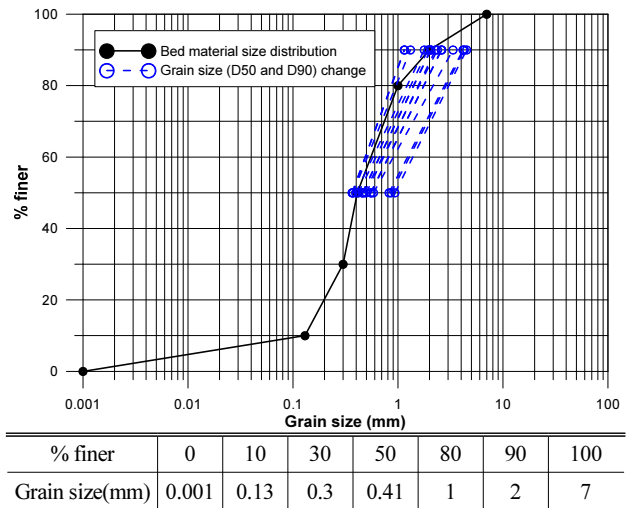


Fig. 9. Bed Material Size Distribution and Grain Size (D50 and D90) Change

터 23~24km 구간, 그리고 29.5~30.5km 구간에 대하여 입경크기의 변화를 검토하였다. 전체 분석에 사용된 입도분포곡선은 Fig. 9의 검은색 실선 그래프와 같고, 대규모 침식 발생에 따른 하상도 입경변화도 입도분포곡선 내의 입경크기에서 변화할 것이다. Fig.

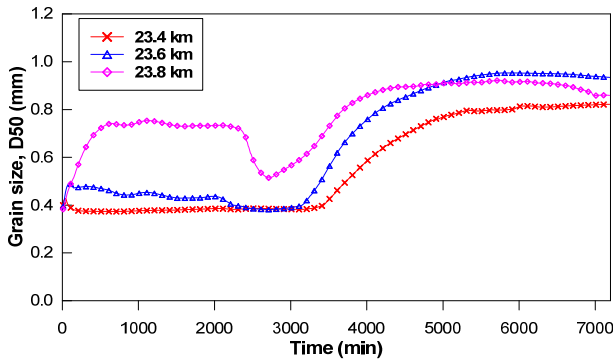


Fig. 10. Grain Size (D50) Change in Section 23-24 km

9에는 입력자료인 입도분포곡선과 함께 3개의 구간에 대한 입경크기(D50, D90) 변화가 나타나 있는데 상대적으로 큰 입자의 물질이 우세하게 발생하고 있는 것으로 분석되었다. 앞서 고려한 3개의 구간 중에서 침식이 가장 크게 발생한 23~24km 구간에서의 D50의 입경크기 변화를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 D50의 크기가 침투홍수가 나타난 시점부터 모의 종료시간까지 점점 커지는 것으로 보여주어 모의 시작 전보다 조립화된 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 Ha!Ha! 저수지 붕괴로 인한 극한 홍수 발생 시 예상되는 하류하천에서의 단기간 하상변동과, 비균일, 비평형 유사의 이송 현상을 CHE1D 모형을 이용하여 분석하고, 계산결과와 실측치와 비교하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 붕괴지점으로부터 23.2km 하류지점에서 측정된 홍수잔후 최상하상의 차이는 21.5m로 이 지점을 전후로 많은 침식이 발생하였으며, 본 연구에서 이 지점에 대한 최상하상 차이는 22.4 m로 나타나 5%내의 정확도를 보여주었다.
- (2) 저수지 붕괴에 따른 하상변동의 실측자료가 있는 유역에 대한 하상변동 모의를 실시하였고, 관측값에 가장 근접한 결과를 가지는 입력변수를 도출하여 민감도 분석 및 모형 성능 평가를 통해 입력변수에 대한 일정 범위를 설정하였다.
- (3) BSS (Brier Skill Score)를 활용하여 모의결과에 대한 성능평가를 실시하였으며, CCHE1D 모형에서 제공하는 4가지의 유사이송 능력 공식 중에서 Wu, Wang and Jia 공식을 적용하고 $L_{s,b}=1000$, $\alpha_s=0.005$, $\delta_m=0.1$ 그리고 $p'=0.35$ 일 때, BSS가 각각 0.75246, 0.73975, 0.75416, 0.73920로 가장 크게 산정되었다.
- (4) 4가지 입력 변수($L_{s,b}$, α_s , δ_m , p')에 대해 적용 범위를 설정하

고 그 범위에 해당하는 하상변화를 분석하였다. 조합된 4가지 입력 변수에 대한 하상변화 계산치와 관측치 최상하상고와의 결과 비교를 통해 최적 변수를 채택을 고려하였다. 붕괴부 23km 하류에서 변화를 비교했을 때 α_s 의 값에 따라 약 15 m의 차이를 보여 변화가 가장 컸고, δ_m , p' , $L_{s,b}$ 순으로 변화 폭이 큰 것으로 나타났다.

- (5) 홍수로 인한 흐름 및 하상변동의 검증, 민감도 분석과 최적 모형 성능평가를 위해 본 연구에서 적용한 방법론 및 결과들은 하상의 변화에 대한 관측값이 없는 하천에 대한 적용의 가이드 라인으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MPSS-자연-2014-75).

References

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., Yang, C. T., Boyd, P. M., Pridal, D. B. and Remus, J. I. (2013). "Numerical modeling of sediment flushed from lewis and clark lake." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 182-193.

Ahn, J. M. and Lyu S. W. (2013). "Analysis of flow and bed change on hydraulic Structure using CCHE2D : Focusing on Changnyong-Haman." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 7, pp. 707-717 (In Korean).

Brooks, G. R. and Lawrence, D. E. (1999). "The drainage of the Lake Ha!Ha! reservoir and downstream geomorphic impacts along Ha!Ha! River, Saguenay area, Quebec, Canada." *Geomorphology*, Vol. 28, No. 1-2, pp. 141-167.

Capart, H., Spinewine, B., Young, D. L., Zech, Y., Brooks, G. R., Leclerc, M. and Secretan, Y. (2007). "The 1996 lake Ha! Ha! breakout flood, québec: Test data for geomorphic flood routing methods." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, Extra Issue, pp. 97-109.

Choi, B. H. (2015). *Disaster Risk Analysis and Management Impro-*

- vement Plans of Agricultural Reservoirs, Master's Thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea (in Korean).
- CSTGB (Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages) (1997). Rapport: Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. Quebec, Janvier 1997, p. 241.
- Davies, A. G., van Rijn, L. C., Damgaard, J. S., van de Graaff, Jand J. and Ribberink, J. S. (2002), "Intercomparison of research and practical sand trans- port models." *Coastal Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-23.
- Ding, Y. and Altinakar, M. S. (2015). "Simulation and control of morphological changes due to dam removal in the Sandy River, Oregon, USA." *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, No. 367, pp. 207-214.
- El kadi Abderrezzak, K. and Paquier, A. (2009). "One-dimensional numerical modeling of sediment transport and bed deformation in open channels." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 5, W05404.
- Garbrecht, J., Kuhnle, R. and Alonso, C. (1995). "A sediment transport capacity formulation for application to large channel networks." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 50, No. 5, pp. 527-529.
- Gessese, A. and Yonas, M. (2008). "Prediction of sediment inflow to Legedadi reservoir using SWAT Watershed and CCHE1D." *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine*, Vol. 1, pp. 65-74.
- 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 (In Korean).
- INRS-Eau (1997). Simulation hydrodynamique et bilan sédimentaire des rivières Chicoutimi et des Ha!Ha! suite aux crues exceptionnelles de juillet 1996. Rapport INRS-Eau No. R487, Travaux realises pour le compte de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, p. 207.
- Jeong, W. J., Ji, U. and Yeo, W. K. (2010). "Sensitivity analysis of bed changes for different sediment transport formulas using the HEC-6 model -The lower nakdong river." *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 10, pp. 1219-1227 (In Korean).
- Proffitt, G. T. and Sutherland, A. J. (1983). "Transport of non-uniform sediments." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 33-43.
- Son, A. L., Kim, B. H., Moon, B. R. and Han, K. S. (2015). "An analysis of bed change characteristics by bed protection work." *Journal of the Korean Society of Civil Engineer*, Vol. 35, No. 4, pp. 821-834 (In Korean).
- Son, I. H., Kim, B. H. and Han, K. Y. (2015). "Flood risk analysis considering the sediment transport in a river." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Gosung, Korea, pp. 132 (In Korean).
- Wu, W. (2008). Computational River Dynamics, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Wu, W. and Vieira, D. A. (2002). One-dimensional channel network model CCHE1D version 3.0-Technical manual. Technical report No. NCCHE-TR-2002-1. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, Oxford, MS.
- Wu, W. and Wang, S. (2008). "Simulation of morphological evolution near sediment mining pits using a 1-D mixed-regime flow and sediment transport model." *World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 1-10.
- Wu, W., Wang, S. S. Y. and Jia, Y. (2000). "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.