

L자형 이동상수로에서 댐 붕괴파의 수치해석 Numerical Analysis of Dam-break Waves in an L-shaped Channel with a Movable Bed

김 대 근* / 황 건**

Kim, Dae Geun / Hwang, Gun

Abstract

We conducted a three-dimensional numerical simulation by using the FLOW-3D, with RANS as the governing equation, in an effort to track the dam-break wave—immediately after a dam break—in areas surrounding where the dam break took place as well as the bed change caused by the dam-break wave. In particular, we computed the bed change in the movable bed and compared the variation in flood wave induced by the bed change with our analysis results in the fixed bed. The analysis results can be summarized as follows: First, the analysis results on the flood wave in the L-shaped channel and on the flood wave and bed change in the movable-bed channel successfully reproduce the findings of the hydraulic experiment. Second, the concentration of suspended sediment is the highest in the front of the flood wave, and the greatest bed change is observed in the direct downstream of the dam where the water flow changes tremendously. Generated in the upstream of the channel, suspended sediment results in erosion and sedimentation alternately in the downstream region. With the arrival of the flood wave, erosion initially prove predominant in the inner side of the L-shaped bend, but over time, it tends to move gradually toward the outer side of the bend. Third, the flood wave in the L-shaped channel with a movable bed propagates at a slower pace than that in the fixed bed due to the erosion and sedimentation of the bed, leading to a remarkable increase in flood water level.

Keywords : dam-break wave, bed change, RANS, movable bed, fixed bed, suspended sediment, bend

요 지

댐 붕괴 직후에 댐 붕괴 근역에서의 댐 붕괴파 및 댐 붕괴파로 인한 하상변동을 추적하기 위하여 RANS를 지배방정식으로 하는 FLOW-3D를 이용한 3차원 수치모의를 수행하였다. 특히 이동상에서의 하상변동과 그 하상변동으로 인한 홍수파의 변동을 고정상에서의 해석결과와 비교하였다. 그 해석 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, L자형 실험수로에서의 홍수파 해석 및 이동상 실험수로에서의 홍수파와 하상변동 해석 결과는 해당 수리실험을 만족스럽게 재현하고 있다. 둘째, 부유사의 농도는 홍수파의 전면에서 가장 높은 값을 보이며, 하상침식은 흐름이 급변하는 댐 직하류 지점에서 가장 크게 발생한다. 수로의 상류에서 발생하는 부유사로 인해 하류에서는 침식과 퇴적이 번갈아서 발생한다. 홍수파가 도달하는 초기에는 L자형 만곡부의 내측에서 침식이 우세하게 발생하나, 시간이 지나며 침식은 점차 만곡부의 외측으로 이동하는 양상을 보인다. 셋째, L자형 이동상에서의 홍수파는 하상의 침식 및 퇴적으로 인해 고정상에서의 홍수파에 비해 그 전파가 지체되며 홍수위가 크게 상승한다.

* 교신저자, 목포대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (e-mail: kd05@mokpo.ac.kr)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Mokpo Univ., Jeonnam 534-729, Korea

** 목포대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (e-mail: bababbo@naver.com)

Master's Course, Dept. of Civil Engrg., Mokpo Univ., Jeonnam 534-729, Korea

1. 서 론

수자원을 확보하기 위하여 설치된 댐이 순간적으로 붕괴되는 경우에는, 홍수파의 전파와 범람으로 댐 하류부에 막대한 인명피해 및 재산피해를 야기할 수 있다(Alcrudo and Mulet, 2007; Capart et al., 2007; Hervouet and Petitjean, 1999). 댐 붕괴로 인한 홍수파의 추적은 흐름의 비정상성과 불연속성, 상류 및 사류 흐름의 혼재, 하류의 각종 구조물로 인한 홍수파의 반사, 마른 하도와 홍수터로의 전파와 같은 복잡한 흐름뿐 아니라 이동상(movable bed) 수로에서의 하상변동 현상을 포함한다. 특히, 하상은 댐 붕괴파에 의해 변동되지만, 이러한 하상변동에 의해 댐 붕괴파의 전파 양상 또한 영향을 받게 된다.

댐 붕괴 현상은 자주 발생하지 않으며 발생하더라도 그로 인한 홍수파의 전파를 정확히 측정하기 어렵기 때문에, 댐 붕괴에 따른 홍수파의 전파특성을 이해하기 위하여 다양한 실험연구가 시행되었다(Miller and Chaudhry, 1989; Fraccarollo and Toro, 1995; Lauber and Hager, 1998ab; Frazao and Zech, 1999, 2002; Frazao, 2007; Frazao and Zech, 2007) 특히, Leal et al. (2002)과 Spinewine and Zech (2007)는 이동상(movable bed) 수로에서 홍수파의 전파 현상을 실험하였다.

댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파를 해석하기 위한 수치모의는 1차원, 2차원, 3차원 해석으로 구분할 수 있다. 1차원 해석은 홍수파의 전파가 하도 내에 국한되고 하도내에 만곡 및 장애물이 없는 경우에 적용이 가능하며, 수심적분 천수방정식을 지배방정식으로 하는 2차원 해석은 유한차분법, 유한요소법, 유한체적법을 이용하여 수치모의하는 것으로, 불연속흐름 및 마른 하도에서의 흐름추적을 효과적으로 수행할 수 있도록 개선하는 모형연구가 최근까지 지속적으로 이루어지고 있다(김병현 등, 2009; 김병현 등, 2011; 김형준 등, 2009; Bai et al., 2007; Fraccarollo and Toro, 1995; Frazao and Zech, 2002; Zhou et al., 2004). 이러한 천수방정식에 기초한 2차원 해석은 대부분의 문제에서 좋은 결과를 도출하는 것으로 알려져 있으나, 댐 붕괴 직후 구간에서의 불연속 흐름이나 홍수파가 제방이나 구조물에 충돌하여 생성되는 충격파와 같은 흐름현상에 대한 재현은 연직방향의 속도를 무시할 수 있다는 가정과 정수압 가정이 도입된 천수방정식 모형의 한계로 지적되고 있다(조용준과 김권수, 2008; 김대근과 황건, 2011;

Fraccarollo and Toro, 1995; Vasquez and Roncal, 2009). 이상과 같은 1차원, 2차원 해석의 한계가 분명한 경우에는 즉, 시공간적으로 댐 붕괴 직후 및 댐 붕괴 근역에서의 댐 붕괴파 및 댐 붕괴파로 인한 하상변동을 추적하기 위해서는 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation)를 지배방정식으로 하는 3차원 동수역학모형의 해석이 필요하다. 최근 SPH (smoothed particle hydrodynamics) 기법을 이용하여 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파양상을 x-z 2차원으로 해석하는 연구(조용준과 김권수, 2008; Crespo et al., 2008)가 있으며, Vasquez and Roncal (2009)는 VOF 기반의 자유수면 추적방법을 이용하는 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여, 댐 붕괴 후 직하류에서의 복잡한 홍수파 전파현상을 성공적으로 모의할 수 있음을 보였다. 김대근과 황건(2011)은 댐 붕괴로 인한 3차원적인 흐름 특징이 지배하는 댐 직하류에서 댐 붕괴파의 전파 현상을 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 이의 구체적인 해석 예로 부분 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파(Fraccarollo and Toro, 1995)와 L자형 만곡을 가지는 실험수로에서의 홍수파 전파(Frazao and Zech, 1999)에서는, 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 사용하는 수치모의의 한계점으로 지적되었던 댐 붕괴 지점에서의 급격한 수위 변화와 저수지에서의 수위 진동 현상을 성공적으로 재현하였다. 또한 계단형의 이동상 수로(Spinewine and Zech, 2007)에서의 홍수파의 전파 및 하상변동을 성공적으로 재현할 수 있었다.

이상의 수치실험과 수치실험은 대부분 고정상에서 홍수파의 전파양상에 주안점을 두고 연구한 것으로 이동상에서 홍수파의 전파양상 및 하상변동에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. 특히, 고정상과 이동상에서 홍수파 전파양상의 차이를 구명하고자 한 연구는 찾아보기 힘들다. 이에 본 연구에서는 김대근과 황건(2011) 연구의 연속선에서 FLOW-3D를 이용하여 L자형 고정상 및 이동상수로에서 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파 및 이로 인한 하상변동을 해석하였다. 모의결과의 검증은 Frazao and Zech (1999)의 L자형 만곡을 가지는 고정상 실험수로에서의 홍수파 전파양상, Spinewine and Zech (2007)의 이동상 수치실험 결과를 이용하였다. 그리고 L자형 이동상에서 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파 및 이로 인한 하상변동 양상을 해석하였으며 더 나아가, 고정상과 이동상에서 홍수파 전파 양상의 차이를 비교, 고찰하였다.

2. 수학적모형

질량의 sink/source가 없는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계(x, y, z)에서의 다음과 같은 RANS이다(Flow science, 2007).

$$\frac{\partial(AU_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} AU_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \quad (2)$$

여기서, t 는 시간, U_i 는 x_i 방향의 속도, ρ 는 물의 밀도, P 는 압력, F_i 는 중력, 점성력 등과 같은 외력이다. 그리고 V_f 는 계산격자의 체적 중 유체가 차지하는 점유율이며, A 는 계산격자 각 방향의 유체가 흐를 수 있는 면적의 점유율이다.

물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF (volume of fluid) 함수, $F(x, y, z, t)$ 를 정의하여 사용하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다. $F(x, y, z, t)$ 의 계산을 위하여 다음 식이 사용된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \frac{\partial (FAU_i)}{\partial x_i} = F_{DIF} \quad (3)$$

여기서, F_{DIF} 는 VOF함수의 확산항이다. 난류운동에너지와 소산율을 계산하기 위한 난류모형으로 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다(Yakhot et al., 1992). 난류모형의 각종 매개변수는 모형의 기본값을 사용하였다. 벽면에서의 난류운동에너지와 소산율과 같은 난류경계를 계산하기 위해 필요한 벽면에서의 전단속도(shear velocity)를 산정하기 위해서는 모형에서 제공하는 벽함수(wall function)를 이용하였다.

FLOW-3D에서의 하상변동모형(sediment scour model)은 퇴적유사(packed sediment)와 부유사(suspended sediment)의 상호작용으로 설명할 수 있다(Flow science, 2007). 퇴적유사는 하상에 퇴적되어 있는 영역의 토사로, 이 영역에서는 유체의 흐름이 없는 고체영역으로 간주된다. 유체의 흐름에 의해 하상에 작용하는 전단력이 한계소류력(critical shear stress)보다 크게 되면 퇴적유사에서 침식, 분리된 토사는 부유사의 형태로 흐름을 따라 이송, 확산, 침강 과정을 거치게 된다. 즉, 계산격자에서 토사가 차지하는 부피비(f_s)가 점착성토사율(cohesive solid

fraction, $f_{s,c}$)보다 작은 영역에서는 부유사의 이송, 확산, 침강 과정으로 해석하고, f_s 가 $f_{s,c}$ 이상인 영역에서는 토사의 입자들이 서로 뭉쳐서 고체처럼 거동하기 시작하므로 이러한 현상을 해석하기 위하여 흐름의 운동량방정식에 선형의 항력항을 추가하여 해석하게 된다. f_s 가 계속 증가하여 한계토사율(critical solid fraction, $f_{s,c}$)에 도달한 영역에서는 항력이 무한대가 되면서 유체의 흐름은 멈추고 퇴적유사의 영역으로 간주하게 된다. 한계소류력을 구하기 위한 Shields number는 다음과 같은 Shields-Rouse의 방정식을 이용하여 산정하였다(Brethour and Burnham, 2010).

$$\theta_{cr} = \frac{0.1}{R^{*2/3}} + 0.054 \left[1 - \exp\left(-\frac{R^{*0.52}}{10}\right) \right] \quad (4a)$$

$$R^* = d_{50} \frac{\sqrt{0.1(\rho_s - \rho)\rho g d_{50}}}{\mu} \quad (4b)$$

여기서, ρ_s , d_{50} 은 토사의 밀도 및 중앙입경, g 는 중력가속도 μ 는 물의 점성계수이다.

모형에서 사용하는 지배방정식은 유한차분법으로 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형을 독립적으로 입력함으로써, 직육면체의 격자를 유지하며 격자내부의 경계면을 정의함으로써 각 격자에서 유체가 차지하는 체적비를 정의하는 방법인 FAVOR(fractional area and volume obstacle representation)기법을 사용한다. FAVOR기법은 격자계의 구성을 쉽게 할 수 있고, 각 격자에서의 물리량이 보존되는 장점이 있다. 지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 계산절차는 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각방향의 초기유속을 계산, (2) 연속방정식과 운동방정식을 연계하여 압력과 유속을 계산 및 보정, (3) 자유수면, 난류 및 유사의 특성을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

3. 모형의 검증

김대근과 황건(2011)은 Fraccarollo and Toro (1995)의 부분 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파 양상에 대한 수치실험을 RANS를 이용한 3차원 수치모의를 통해 재현하였으며, 여기에서 2차원 천수방정식에서 도입되는 정수압가정으로 인해 수치모의 결과에 한계가 있는 것으로 지적된 댐 붕괴부에서의 홍수파를 수면진동 현상까지 포함하여

정확히 예측할 수 있음을 보인다 있다.

Frazao and Zech (1999)는 Fig. 1과 같은 L자형 실험수로에서 장방형저수지를 연결하여 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파 양상을 실험하였다. Fig. 1은 실험수로의 평면형상 및 경계조건 그리고 자료의 측정위치를 도시하고 있다. 유리 재질로 제작된 실험수로의 바닥표고는 저수지의 바닥표고에 비해 0.33m 높게 위치하고 있으며, 하류는 열린경계로 상류에서 전파되는 홍수파가 반사 없이 실험영역 외로 흘러 나갈 수 있는 구조이다. 저수지는 모두 닫힌 경계이며 저수지와 실험수로의 경계에 설치된 수문을 순간적으로 개방함에 따라 발생한 댐 붕괴 홍수파가 실험수로에서 전파되도록 구성되었다. 댐 붕괴에 따라 수로를 따라 전파되는 홍수파는 만곡부의 벽면을 만나면서 속도 수두가 급격히 감소하며 흐름정체 및 수위가 상승하게 되는데 이러한 수위 상승으로 인한 반사파는 하류는 물론 상류방향으로도 전파된다.

김대근과 황건(2011)은 마른하도에 대해 상기 실험을 성공적으로 재현한 바 있다. 본 연구에서는 실험수로의

초기수위가 0.01 m인 젖은하도 조건에 대해서도 모의하였으며 그 모의결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 Frazao and Zech (1999)의 수리실험 및 2차원 천수방정식을 이용한 모의결과와 본 연구의 모의결과를 비교한 것이다. 천수방정식을 이용한 모의결과는 김병현 등(2011)에 의해 그 정확성 및 적용성이 검증된 삼각형과 사각형 혼합격자를 사용한 연구결과를 이용하였으며, 본 모의결과와의 상대적

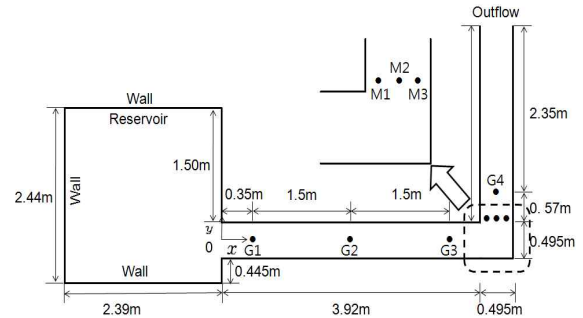


Fig. 1. Experimental Channel Layout and Boundary Conditions

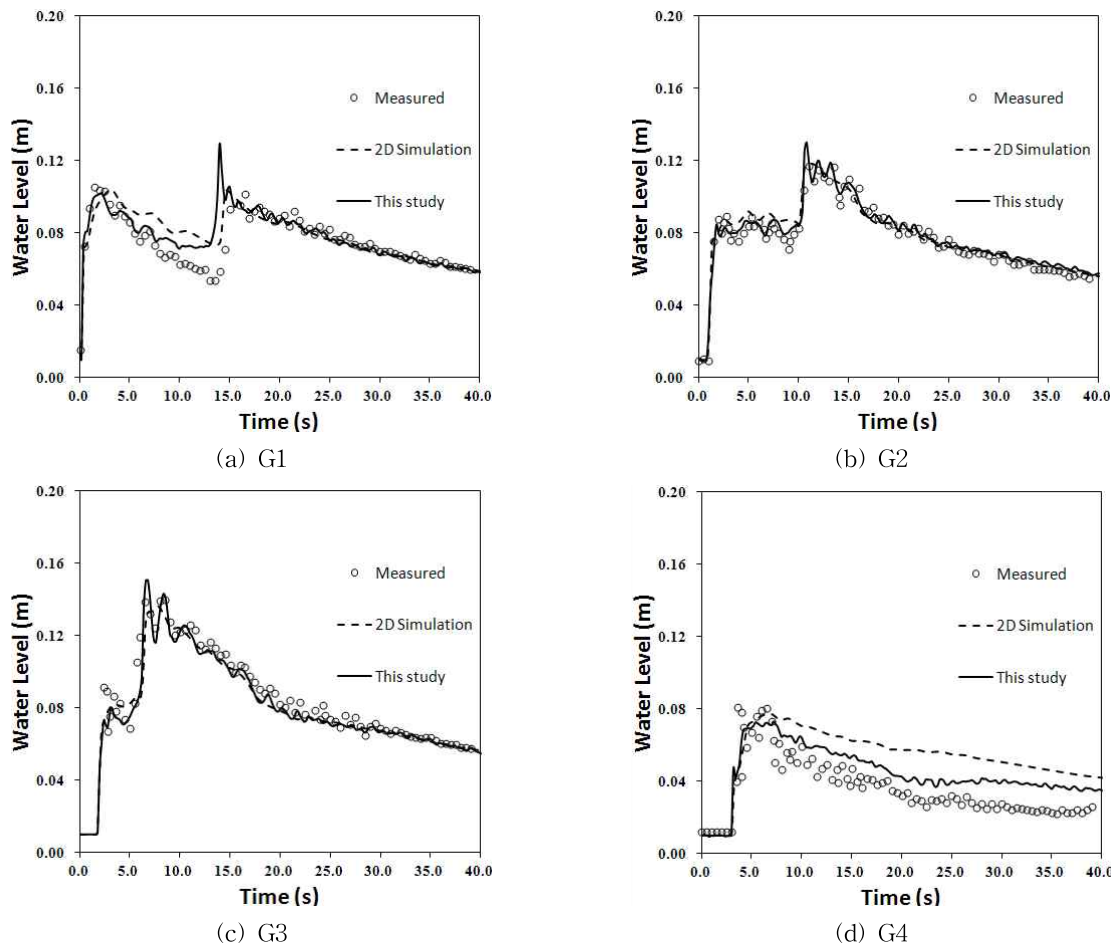


Fig. 2. Comparison of Measured and Simulated Water Levels in an L-shaped Channel with a Wet Bed

인 비교를 위하여 함께 도시하였다. Fig. 2의 (a), (b), (c)는 만곡부 상류에 위치하는 지점이며 (d)는 만곡부 하류에 위치하는 지점으로 대체로, 본 연구의 모의결과는 실험결과를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 특히 만곡부 상류에 위치하는 지점에서는 댐 붕괴로 인한 수위의 증가와 만곡부에서의 정체와 반사파로 인하여 2차레에 걸친 수위 급상승이 발생하는데 본 모의결과는 이러한 현상을 잘 재현하고 있으며, G2와 G3지점에서 확인할 수 있는 2번째 수위 급상승 전후에 발생하는 수면의 진동현상까지 본 모의결과는 잘 재현하고 있다. G1지점과 G4지점에서는 특히 3차원 모의결과가 2차원 천수방정식을 이용한 모의결과에 비해 양호한 결과를 보이고 있다.

이동상 실험수로에서 댐 붕괴로 인한 홍수파의 전파를 해석하기 위한 실험이 Spinewine and Zech (2007)에 의해 수행되었으며 김대근과 황건(2011)은 이를 수치모의를 통해 재현하였다. Fig. 3은 시간을 $(H/g)^{0.5}$ 로 무차원화하여 표현한 무차원시간 6.6에서 홍수파의 수위곡선과 하상변동 양상을 수리실험 결과와 비교한 것이다. Fig. 3에서 수

위는 저수지의 초기수심(H), 0.35m로 무차원화 하였다. 모의결과는 홍수파의 수위곡선과 하상변동양상을 잘 재현하고 있다. 특히 하상형태에 따른 수위곡선의 독특한 특징을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같이 FLOW-3D는 댐 붕괴 근역에서의 댐 붕괴파 및 댐 붕괴로 인한 하상변동의 추적에 적합함을 확인할 수 있다.

4. 모형의 적용

모형의 검증을 위한 Frazo and Zech (1999)의 L자형 실험수로(Fig. 1)와 동일한 제원을 가지는 경우에 대하여 수치모의를 수행하였다. 단, 이동상 수로에 대한 수치모의를 수행하기 위하여 기존 고정상 수로바닥에 0.1m 깊이의 하상재료를 포설하였다. 이동상 수로의 하상재료는 d_{50} 이 0.6mm이고 비중이 2.65이며 안식각(angle of repose)이 31°인 모래이다. 수로에 포설된 하상재료의 다짐정도는 53%로 공극률 47%에 해당한다. 하상변동을 모의하기 위해 필요한 입력변수인 짐착성토사율, $f_{s,cr}$ 은 김대근과 황

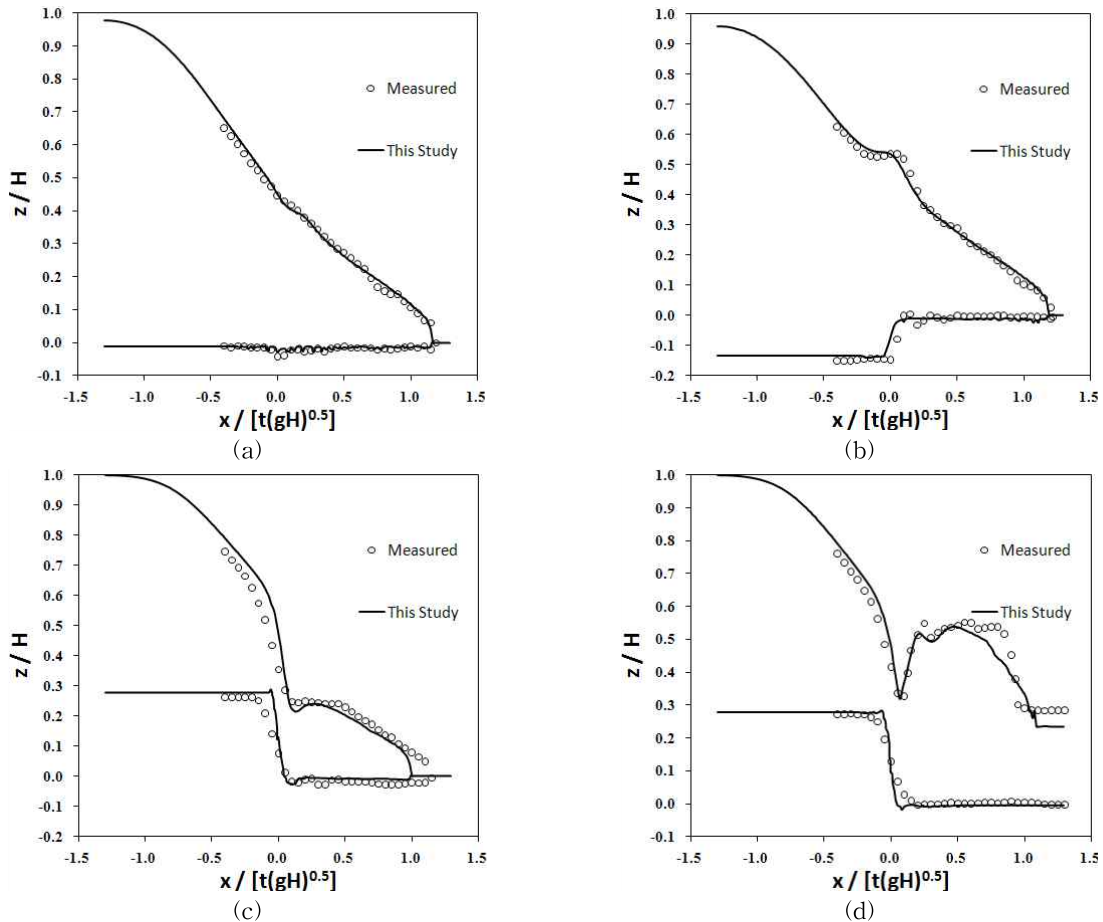


Fig. 3. Comparison of Measured and Simulated Water Levels and Bed Changes (after Kim and Hwang, 2011)

건(2011)에 의하면 0.15~0.30의 범위에서 계산결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석하고 있어 0.2를 사용하였으며, 한계토사율, $f_{s,cr}$ 은 퇴적층 여부를 구분하는 기준이 되므로 하상재료의 초기 다짐정도인 0.53을 사용하였다. 한계소류력을 계산하는데 필요한 Shields number는 Eq. (4)에 의하면 0.034이다. 단, 물의 점성계수는 20°C에서의 값을 이용하였다.

Figs. 4 and 5는 각각 고정상 수로와 이동상 수로에서 3초, 5초, 7초, 13초 후 홍수파의 수면형과 속도의 크기를 도시한 것이다. Fig. 4는 김대근과 황건(2011)에 의해 모의된 바와 같이 고정상 수로에서 댐이 순간적으로 붕괴되며 형성된 사류흐름은 L자형 만곡부의 벽면을 만나며 급

격히 수위가 상승하며, 여기서 반사된 흐름은 하류뿐 아니라 상류에도 전파되는 특성을 보인다. Fig. 5는 이동상 수로의 결과로 Fig. 4와 비교했을 때 홍수파의 이동이 지체되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 만곡부에서 반사된 흐름의 상류방향으로의 전파 역시 고정상 수로에서와는 달리 미약함을 알 수 있다. Figs. 6 and 7은 이동상 수로에서 3초, 5초, 7초, 13초 후의 부유사 농도와 하상변동 양상을 도시한 것이다. Fig. 6의 부유사 농도는 하상과 흐름의 경계에서의 농도로, 홍수파가 전파되며 하상재료를 침식하면서 흐름에 침식토사를 유입시킴에 따라 발생하는 부유사이다. 홍수파의 전면에서 가장 높은 농도를 보이고 있음을 3초, 5초, 7초 후의 부유사 농도분포에서 확인할

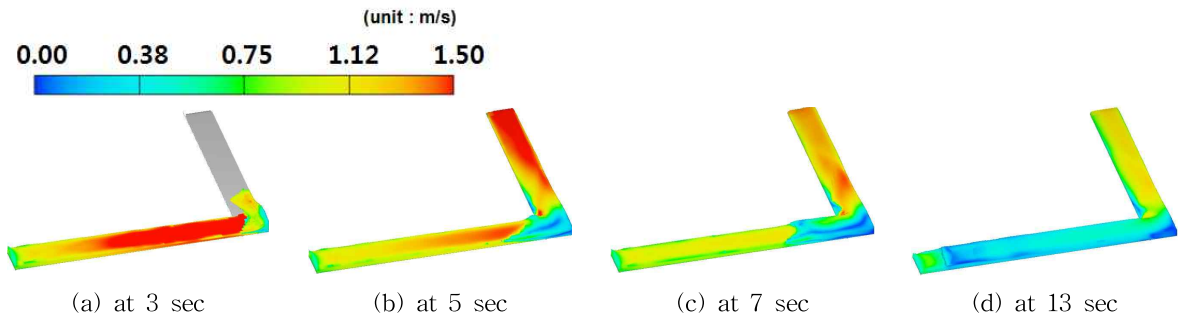


Fig. 4. Three-dimensional Dam-break Flow in an L-shaped Channel with a Fixed Bed

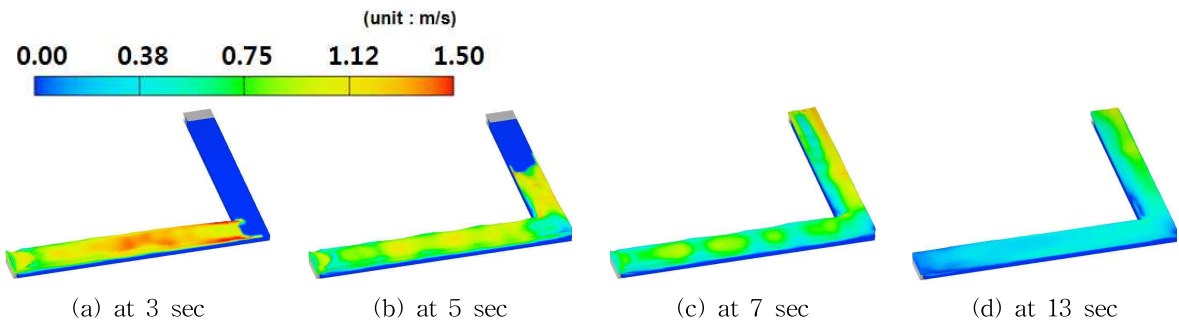


Fig. 5. Three-dimensional Dam-break Flow in an L-shaped Channel with a Movable Bed

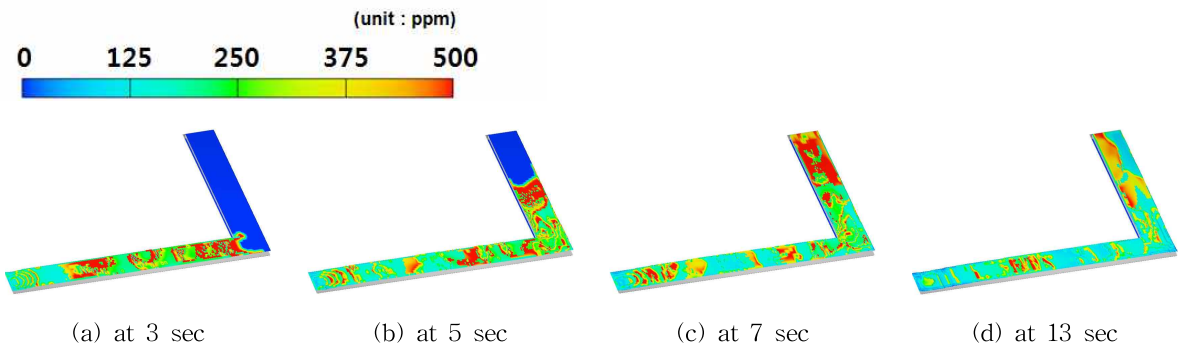


Fig. 6. Suspended Sediment Concentrations in an L-shaped Channel with a Movable Bed

수 있다. Fig. 7에서 하상변동이 가장 크게 발생하는 곳은 흐름이 급변하는 댐 직하류 지점이며, 여기서 발생하는 부유사로 인해 하류에서는 침식과 퇴적이 번갈아서 발생하는 구조를 보이고 있다. 또한 홍수파가 도달하는 초기에는 만곡부의 내측에서 침식이 발생하며 외측에서는 퇴적이 발생하나 시간이 지나면서 침식은 만곡부의 외측으

로 이동하는 양상을 보인다.

Fig. 8은 고정상과 이동상에서의 수위를 비교 도시한 것이다. G1은 댐 직하류 지점으로 이동상에서의 초기 침두홍수위가 고정상에서의 침두홍수위보다 약 40% 높은 결과를 보이고 있다. 이는 Figs. 6 and 7의 부유사농도와 하상변동 모의결과에서 유추할 수 있는데 댐이 순간적으

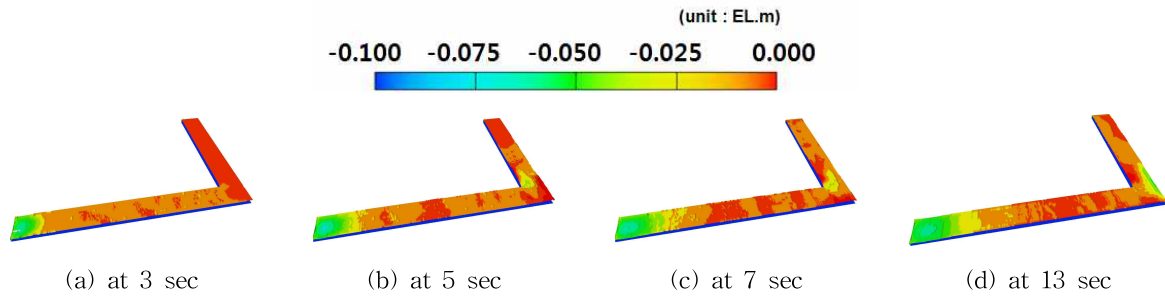


Fig. 7. Bed Changes in an L-shaped Channel with a Movable Bed

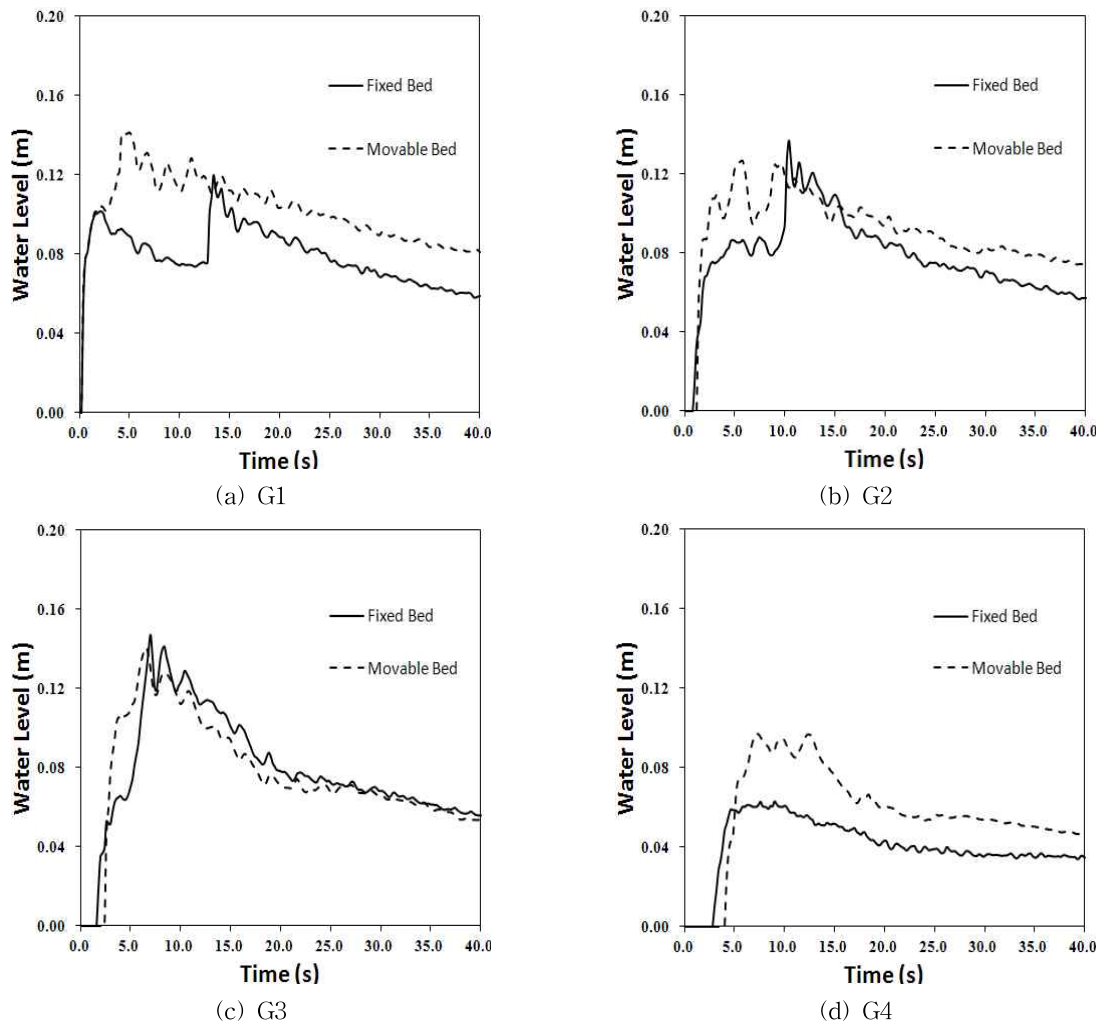


Fig. 8. Comparison of Water Levels between a Channel with a Fixed and Movable Bed

로 붕괴되면서 형성되는 홍수파는 하상의 토사를 급격히 침식시키며 고밀도의 부유사를 생산하는데 이 과정에서 수위를 상승시키는 것으로 해석할 수 있다. 반면에 고정상 수로의 홍수위에서 확인할 수 있는 만곡부에서의 반사파로 인한 2차 수위 상승은 이동상 수로의 홍수위에서는 나타나지 않는데, 이는 홍수파의 초기 수위가 충분히 높아 만곡부에서의 흐름 정체로 인한 수위 상승의 효과가 크지 않기 때문이다. 이는 Figs. 5 and 6의 3, 5초 후의 수면변위 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 G2, G3에서도 확인할 수 있다. G4에서는 이동상 수로의 홍수파가 지체되며 침두홍수위는 고정상 수로의 침두홍수위에 비해 약 55% 이상 높은 결과를 보이고 있다. 즉, 댐 붕괴로 인한 홍수파는 특히 댐 직하류에서 급격한 하상변동을 야기하고 이러한 하상변동은 홍수파의 수위를 크게 상승시킬 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9는 이동상 수로에서 시간에 따른 하상고의 변화를 도시한 것이다. G1은 댐 직하류 지점으로 댐 붕괴후 가장 큰 하상침식을 보이며 약 5초 후에 일부 퇴적이 발생한 후에는 거의 일정한 하상고를 보이고 있다. G2에서는 수로 상류의 급격한 하상침식에 의해 발생한 부유사로 인해 댐 붕괴 초기에는 하상 침식과 퇴적이 반복되는데 심지어 원 하상고보다 높게 퇴적이 발생하기도 하나 약 25초를 지나며 거의 일정한 하상고를 보이고 있다. G3에서는 G2와 같이 댐 붕괴 초기에는 하상 침식과 퇴적이 반복되며 약 15초를 전후하여 가장 큰 하상침식이 발생하며 약 20초 이후에는 퇴적이 우세하게 발생하다 거의 원 하상고를 회복한 후에 일정한 하상고를 유지하고 있다. G4에서는 G3와 달리 약 20초 이후에 하상침식이 우세하게 발생하며 약 30초 이후에 거의 일정한 하상고를 보이고 있다. 즉,

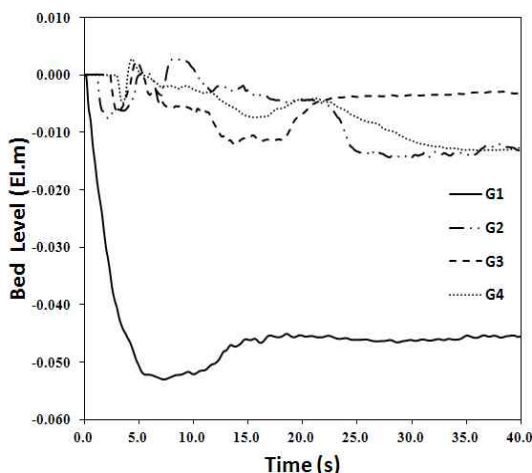


Fig. 9. Variation of Bed Elevations at Several Points

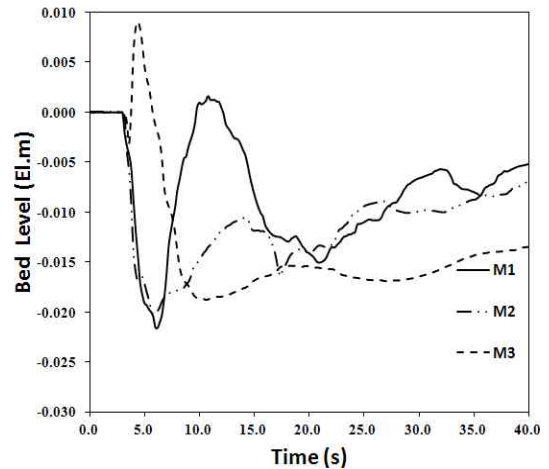


Fig. 10. Variation of Bed Elevations at a Bend

Fig. 7에서도 확인할 수 있듯이 댐 직하류에서 하상침식이 가장 크게 발생하며, 그 하류에서는 시간과 위치에 따라 침식과 퇴적이 번갈아 발생하는 구조를 보이며 만곡부 직상류 G3에서는 상대적으로 퇴적이 만곡부 직하류부 G4에서는 상대적으로 침식이 우세하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 만곡부 내측, 중간, 외측의 시간에 따른 하상고를 도시한 것이다. 만곡부 내측은 초기에 침식이 우세하게 발생하나 이후 퇴적과 침식을 반복하다 만곡부 외측에 비해 상대적으로 높은 하상고를 유지한다. 만곡부 외측은 초기에 퇴적이 발생하나 이후 침식이 발생하며 약 10초 이후에는 거의 일정한 하상고를 유지하고 있다. 이와 같이 댐 붕괴 초기에 만곡부 내측에 침식이 크게 발생하는 이유는 댐 붕괴파가 약 4초 이후에 만곡부에 도달하면서 5초와 6초를 지나며 만곡부 외측은 수위가 급상승하면서 정체하나, 만곡부 내측은 상대적으로 수위가 낮은 상태에서 국부적으로 강한 회전류가 유발되면서 침식이 크게 발생한다. 이후 하류 수위가 점차 높아지면서 만곡부 내측보다는 외측의 흐름이 강해지면서 상대적으로 만곡부 외측의 침식이 보다 크게 발생하게 된다.

5. 결론

시공간적으로 댐 붕괴 직후 및 댐 붕괴 근역에서의 댐 붕괴파 및 댐 붕괴파로 인한 하상변동을 추적하기 위하여 RANS를 지배방정식으로 하는 FLOW-3D를 이용하여 3차원 수치모의를 수행하였다. 특히, L자형 이동상에서의 댐 붕괴파로 인한 하상변동과 그 하상변동으로 인한 수위의 변동을 해석하였으며 이를 고정상 하상에서의 해석결

과와 비교하였다. 그 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, L자형 실험수로에서의 홍수파 전파 해석 및 이동상 실험수로에서의 홍수파 및 하상변동 해석은 수리실험 결과의 주요 특성인 마른 하도에서의 홍수파의 전파, 만곡부에서의 흐름 정체 및 반사파의 전파, 홍수파로 인한 하상변동 및 하상변동의 영향을 받는 홍수파의 재현에 만족할 만한 결과를 보여주었다.

둘째, 댐 붕괴파로 인해 생성되는 부유사는 홍수파의 전면에서 가장 높은 농도를 보이며 하상침식은 흐름이 급변하는 댐 직하류 지점에서 가장 크게 발생하고 있다. 수로의 상류에서 발생하는 부유사로 인해 하류에서는 침식과 퇴적이 번갈아서 발생한다. 또한 홍수파가 도달하는 초기에는 만곡부의 내측에서 침식이 우세하게 발생하며 외측에서는 퇴적이 발생하나 시간이 지나면서 침식은 점차 만곡부의 외측으로 이동하는 양상을 보인다.

셋째, L자형 이동상수로에서의 홍수파는 하상의 침식 및 퇴적으로 인해 고정상 수로에서의 홍수파에 비해 그 전파가 지체되며, 홍수위가 크게 상승한다. 이러한 특징은 특히 댐 직하류에서의 홍수위 추적 및 평가시에 주의해야 할 점인 것으로 사료된다. 향후 이동상 수로의 하상재료 및 댐 붕괴파의 특성에 따른 수위 상승의 정량적인 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김대근, 황건(2011). “고정상 및 이동상 수로에서 댐 붕괴파의 3차원 수치해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제4B호, pp. 333-341.
- 김병현, 한건연, 안기홍(2009). “Riemann 해법을 이용한 댐 붕괴파의 전파 해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제5B호, pp. 429-439.
- 김병현, 한건연, 손아롱(2011). “혼합격자의 적용이 가능한 2차원 유한체적모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제2호, pp. 109-123.
- 김형준, 김정민, 조용식(2009). “분할격자기법을 이용한 실험수조 댐붕괴파의 수치모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 121-129.
- 조용준, 김권수(2008). “체체의 갑작스런 붕괴로 인한 충격

파 수치해석-SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 를 중심으로.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제3B호, pp. 261-270.

- Alcrudo, F., and Mulet, J. (2007). “Description of the Tous Dam break case study.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, Extra Issue, pp. 45-57.
- Bai, Y.C., Xu, D., and Lu, D.Q. (2007). “Numerical simulation of two-dimensional dam-break flows in curved channels.” *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 19, No. 6, pp. 726-735.
- Brethour, J., and Burnham, J. (2010). Modeling sediment erosion and deposition with the FLOW-3D sedimentation & scour model. Flow Science Report # FSI-10-TN85.
- Capart, H., Spinewine, B., Young, D.L., Zech, Y., Brooks, G.R., Leclerc, M., and Secretan, Y. (2007). “The 1996 Lake Ha! Ha! Ha! breakout flood, Quebec: Test data for geomorphic flood routing methods.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, Extra Issue, pp. 97-109.
- Crespo, A.J.C., Gomez, G.M., and Dalrymple, R.A. (2007). “3D SPH simulation of large waves mitigation with a dike.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, No. 5, pp. 631-642.
- Flow Science (2007). Flow-3D(Theory Manual), Los Alamos, NM.
- Fraccarollo, L., and Toro, E.F. (1995). “Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 33, No. 6, pp. 843-864.
- Frazao, S.S. (2007). “Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, Extra Issue, pp. 19-26.
- Frazao, S.S., and Zech, Y. (1999). “Effects of a sharp bend on dam-break flow.” *Proceedings 28th Congress of IAHR*, Graz, Austria, pp. 1-20.
- Frazao, S.S., and Zech, Y. (2002). “Dam break in channels with 90° bend.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 11, pp. 956-968.
- Frazao, S.S., and Zech, Y. (2007). “Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, Extra

- Issue, pp. 27-36.
- Hervouet, J.M., and Petitjean, A. (1999). "Malpasset dam-break revisited with tow-dimensional computations." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 37, No. 6, pp. 27-36.
- Lauber, G., and Hager, W.H. (1998a). "Experiments to dambreak wave: Horizontal channel." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 3, pp. 291-307.
- Lauber, G., and Hager, W.H. (1998b). "Experiments to dambreak wave: Sloping channel." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 5, pp. 761-773.
- Leal, J.G.A.B., Ferreira, R.M.L., and Cardoso, A.H. (2002). "Dam-break waves on movable bed." River Flow 2002: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, pp. 981-990.
- Miller, S., and Chaudhry, M.H. (1989). "Dam break flows in curved channel." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 11, pp. 1465-1478.
- Spinewine, B., and Zech, Y. (2007). "Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 45, Extra Issue, pp. 73-86.
- Vasquez, J.A., and Roncal, J.J. (2009). "Testing RIVER 2D and FLOW-3D for sudden dam-break flow simulations." CDA 2009 Annual Conference, CDA, Whistler, BC, Canada, pp. 44-55.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., and Speziale, C.G. (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids*, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.
- Zhou, J.G., Causon, D.M., Mingham, C.G., and Ingram, D.M. (2004). "Numerical prediction of dam-break flows in general geometries with complex bed topography." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 332-340.

논문번호: 11-124	접수: 2011.11.15
수정일자: 2012.01.04/01.10	심사완료: 2012.01.10