

# 장애물을 고려한 붕괴파의 수치해석

## Numerical Analysis of Dam-Break Waves against an Isolated Obstacle

김대근\*, 황 건\*\*  
Dae Geun Kim, Gun Hwang

### 요 지

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모의를 통해 댐 붕괴로 인한 3차원적인 흐름 특징이 지배하는 댐 직하류에서 고립된 장애물로 인한 댐 붕괴파의 전파현상과 이동상 수로에서의 붕괴파의 전파현상, 특히 붕괴파의 비정상성과 불연속성, 붕괴파와 반사파의 영향, 상류 및 사류의 흐름의 혼재와 같은 복잡한 현상을 포함하는 붕괴파의 전파를 해석하였다. 장애물로 인한 댐 붕괴파의 전파 해석 결과, 댐의 순간적인 붕괴로 인해 붕괴파가 형성되고 붕괴파가 장애물에 부딪치면 반사파가 발생하며 이는 다시 수로에 부딪치며 반사되는 과정에서 사류와 상류 및 도수현상이 발생하는 복잡한 흐름 양상을 보인다. 이동상 수로에서의 댐붕괴파 해석 결과 붕괴파 전파는 고정상 수로에서의 붕괴파 전파에 비해 그 전파속도가 느리게 형성되었다. 기존 수리실험 결과와 비교 하였을 때 본 모의결과는 국부적인 수면진동의 모의에서 다소 오차가 발생하고 있으나 대체로 그 경향성은 잘 추적하고 있다.

**핵심용어 : RANS, 댐 붕괴, 붕괴파, 장애물**

## 1. 서론

국내를 포함하여 전 세계적으로 수많은 댐이 건설되어 있으며, 이러한 댐들에 의해 확보된 수자원은 치수, 이수 및 환경기능을 위해 사용되고 있다. 하지만 이러한 댐이 순간적으로 붕괴되는 경우에는, 홍수파의 전파와 범람으로 댐 하류부에 막대한 인명피해 및 재산피해를 야기할 수 있다(Alcrudo and Mulet, 2007; Capart 등, 2007; Hervouet and Petitjean, 1999). 따라서, 댐 붕괴(dam break)로 인한 붕괴파에 관한 연구는 홍수재해의 예측과 계획 그리고 평가를 위해 매우 중요하다. 댐 붕괴로 인해 붕괴파가 하류하천에 위치하는 건물이나 다리 등의 구조물에 부딪치면 붕괴파는 비정상성과 불연속성, 상류 및 사류 흐름의 혼재와 같은 복잡한 흐름을 나타낸다.

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모의를 이용하여 장애물로 인한 댐 붕괴파의 전파 현상과 이동상 수로에서 하상변동을 고려한 홍수파의 전파현상을 해석하였다. 모형의 검증은 Soares-Frazao and Zech(2007)와 Spinewine and Zech(2007)의 수리실험을 이용하였다.

## 2. 수학적 모형

질량의 sink/source가 없는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 사용하는 지배방정식은 직교좌표계( $x, y, z$ )에서의 다음과 같은 RANS이다(Flow Science, 2007).

\* 정회원·목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 부교수·E-mail : kdg05@mokpo.ac.kr

\*\* 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 석사과정·E-mail : bababbo@naver.com

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

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

여기서  $t$ 는 시간,  $U_i$ 는  $x_i$ 방향의 속도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $P$ 는 압력,  $F_i$ 는 중력, 점성력 등과 같은 외력이다. 그리고  $V_f$ 는 계산격자의 체적 중 유체가 차지하는 점유율이며,  $A_j$ 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.

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

여기서  $F_{DIF}$ 는 VOF함수의 확산항이다. 난류운동에너지와 소산율을 계산하기 위한 난류모형으로 RNG  $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다(Yakhot, 1992).

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 장애물을 고려한 댐 붕괴파의 전파

Soares-Frazao and Zech(2007)는 Fig.1과 같은 실험수로에서 고립된 장애물로 인한 홍수파의 전파 양상을 실험하였다. 제작된 실험수로는 길이 방향으로 17.7m, 폭 방향으로 3.6m, 저수지 높이는 0.5m이며, 저수지와 홍수터 2개 부분으로 구분되어 있고, 수로의 단면은 사다리꼴 모양이다. 수로바닥을 기준면으로 했을때 저수지의 초기수위는 0.4m이며 홍수터의 초기수위는 0.2m이다. 장애물은 높이 0.8m, 너비 0.4m이고 사각형 모양이고, 원점(0,0)에서 높이 0.55m, 너비 3.4m 떨어진 곳에  $64^\circ$  틀어져 있다. 계산 격자의 수는  $\Delta X = 455$ ,  $\Delta Y = 182$ ,  $\Delta Z = 33$  개로 구성되었다. 저수지는 모두 닫힌 경계이며 홍수터의 끝은 열린경계인 상태에서 댐의 가운데 부분 1m가 순간적으로 붕괴 되었을 경우의 홍수파 전파 과정을 실험하였다.

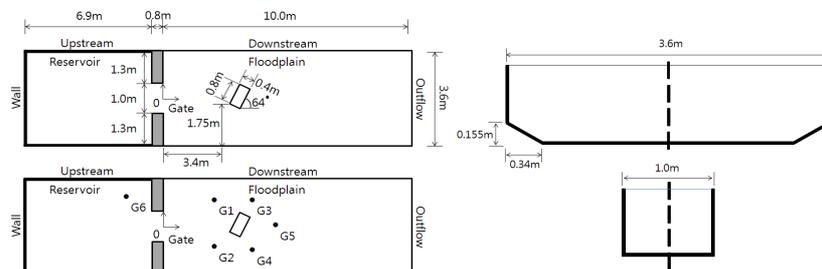
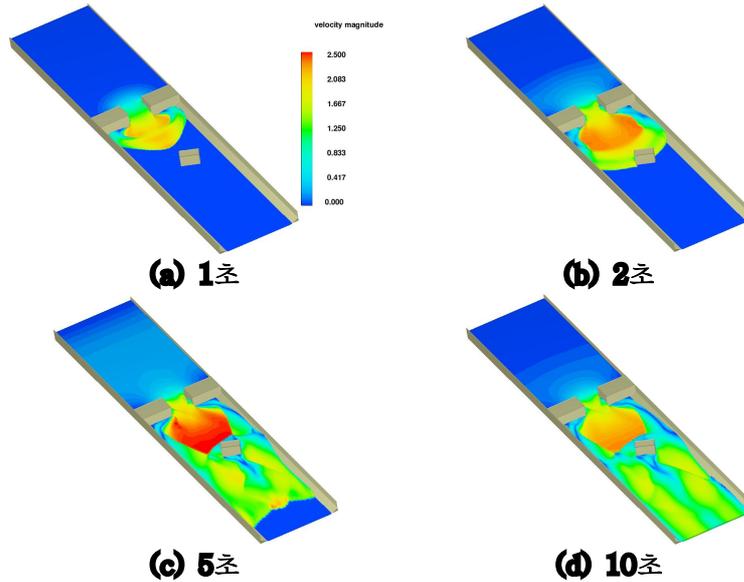


Fig. 1 실험수로의 제형 및 경계 조건

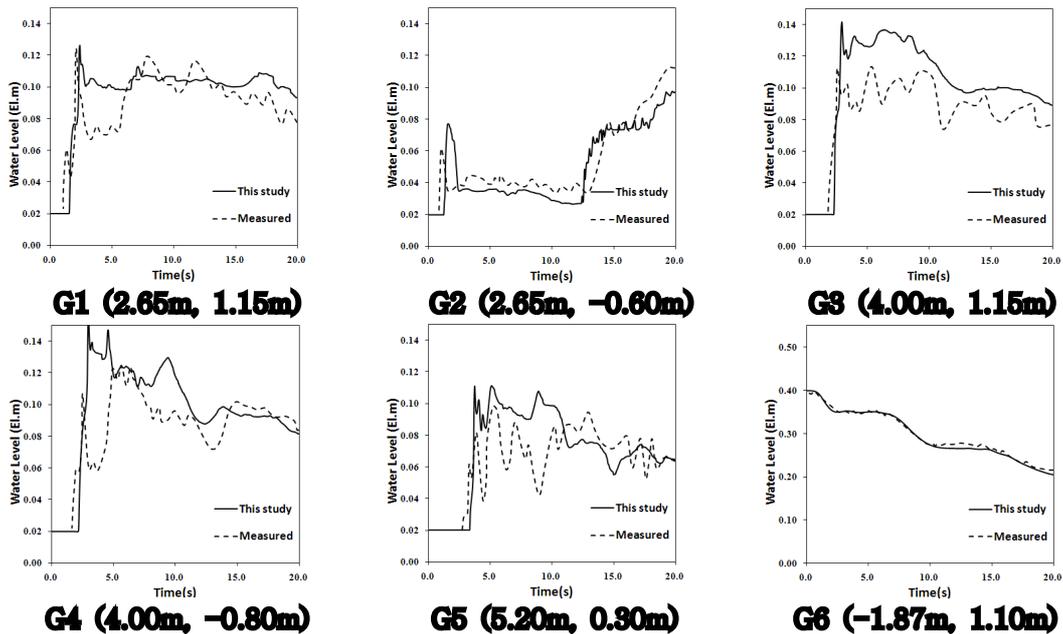
Fig. 2은 댐 붕괴후 1초, 2초, 5초, 10초 후의 수면형과 속도의 크기를 도시한 것이다. 댐이 순간적으로 붕괴하며, 댐 붕괴파가 홍수터로 전파하는 양상을 잘 재현하고 있다. 1초에 댐 붕괴가 일어

나며 붕괴파가 발생하고 2초에 붕괴파가 장애물에 부딪치며 반사파가 발생하며 수로의 양쪽 벽으로 이동한다. 5초에 붕괴파가 장애물에 부딪치며 도수가 발생하고 장애물을 지나 다시 붕괴파가 형성된다. 10초에는 유량이 줄어들면서 유속이 함께 줄어들고 있다.



**Fig. 2 수면 범위 및 속도의 크기 (1초, 2초, 5초, 10초)**

Fig. 3은 Soares-Frazao and Zech(2007)의 수리실험과 본 연구의 수위 수문곡선 모의 결과를 비교한 것으로, 모의결과와 실험결과는 국부적인 수면진동의 오차는 있으나 대체로 그 경향은 잘 일치하고 있다.



**Fig. 3 고정된 장애물이 존재하는 수로에서의 수위 수문곡선**

### 3.2 이동상 수로에서 댐붕괴파의 전파

Spinewine and Zech(2007)는 Fig. 4와 같은 이동상 수로에서의 댐붕괴파 전파양상을 실험하였다. 수리실험을 재현하기 위하여 길이 방향으로 6m, 폭 방향으로 0.02m, 연직방향 높이는 0.4m이고, 저수지와 홍수터로 구분하였다. 저수지의 초기수위는 0.35m이며 홍수터의 초기수위는 0m로 마련하였다. 이동상 수로의 하상재료는  $D_{50}$ 이 1.82mm이고 비중이 2.683인 모래이다. 이동상 수로에서의 홍수파의 전파특성을 모의하기 위하여 추가로 입력되는 매개변수로 한계소류력을 계산하는데 사용되는 Shields number는 0.05 점착성토사율,  $f_{s,co}$ 는 0.2 한계토사율,  $f_{s,cr}$ 은 0.53, 하상재료의 안식각은 30도를 사용하였다. 계산 격자의 수는  $\Delta X = 300$ ,  $\Delta Y = 4$ ,  $\Delta Z = 104$  개로 구성되었다. 저수지는 모두 닫힌 경계이며 홍수터의 끝은 열린경계인 상태에서 댐이 순간적으로 붕괴 되었을 경우의 홍수파 전파 과정을 실험하였다.

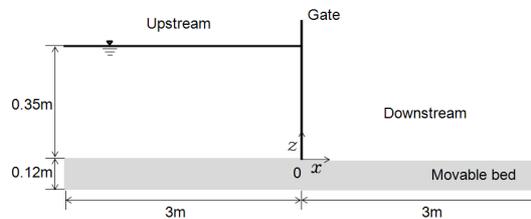


Fig. 4 실험수로의 제원 및 경계조건

Fig. 5와 Fig. 6은 Spinewine and Zech(2007)의 수리실험과 본 연구의 수위 수문곡선 모의 결과를 비교한 것이다. Fig. 5는 시간에 따른 댐 붕괴파의 이동거리를 나타낸 그래프로  $t$ 는 시간,  $H$ 는 초기수위,  $g$ 는 중력가속도,  $x$ 는 붕괴파의 이동거리이다. Fig. 6은 시간별 댐 붕괴파의 수면곡선을 나타낸 것이다. 비교결과 실험결과와 모의결과는 잘 일치하고 있다.

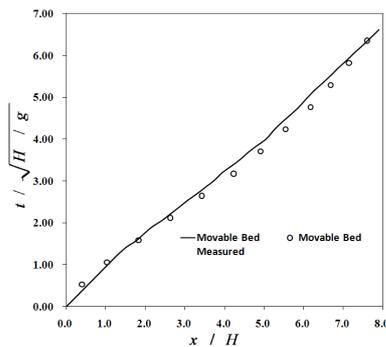


Fig. 5 시간에 따른 붕괴파의 이동거리

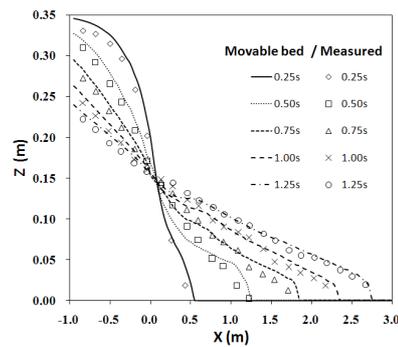


Fig. 6 시간별 붕괴파의 수면곡선

## 4. 결론

본 연구에서는 RANS를 지배방정식으로 하는 3차원 수치모의를 이용하여 댐붕괴로 인한 3차원적인 흐름 특징이 나타나는 댐 직하류에서 고립된 장애물로 인한 댐 붕괴파의 전파 현상, 특히 흐름이 비정상성고 불연속성, 붕괴파와 그 반사파의 영향, 상류 및 사류흐름의 혼재, 고립된 장애물

로 인한 댐 붕괴파의 전파 현상을 해석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

고립된 장애물로 인한 댐 붕괴파의 전파 해석 결과, 댐의 순간적인 붕괴로 인해 붕괴파가 형성되고 붕괴파가 장애물에 부딪치면 반사파가 발생하며 이는 다시 수로에 부딪치며 반사되는 과정에서 사류와 상류 및 도수현상이 발생하는 복잡한 흐름 양상을 보인다.

이동상 수로에서의 댐 붕괴파 전파 해석결과, 이동상 수로에서의 붕괴파 전파는 고정상 수로에서의 붕괴파 전파에 비해 그 전파속도가 느리게 형성되는데 그 원인은 이동상 수로에서의 마찰력이 고정상 수로에 비해 크고, 초기 홍수파에 의해 침식되어 홍수파에 혼입되는 정지해 있던 토사의 관성력 때문이다.

본 모의결과 댐 붕괴파의 전파 해석은 기존 수리실험 결과와 비교 하였을 때 국부적인 수면진동의 모의에서 다소 오차가 발생하고 있으나 대체로 그 경향성은 잘 추적하고 있다.

### 감 사 의 글

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행 되었습니다(No. 2009-0077855).

### 참 고 문 헌

1. Alcrudo, F. and Mulet, J. (2007). Description of the Tous Dam break case study, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp. 45-57.
2. Capart, H., Spinewine, B., Young, D.L., Zech, Y., Brooks, G.R., Leclerc, M., Secretan, Y. (2007). The 1996 Lake Ha! Ha! Ha! breakout flood, Quebec: Test data for geomorphic flood routing methods, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp. 97-109.
3. Flow Science (2007). *Flow-3D (Theory Manual)*, Los Alamos, NM.
4. Hervouet, J.M. and Petitjean, A. (1999). Malpasset dam-break revisited with two-dimensional computations, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, pp. 27-36.
5. Soares-Fraza, S and Zech, Y. (2007). Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp.27-36
6. Spinewine, B. and Zech, Y. (2007). Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, pp.73-86
7. 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, pp. 1510-1520.