

# 자연하천에 적용 가능한 2차원 유한체적 모형의 개발

## Development of 2D Finite Volume Model for Applying Natural Channels

김병현\*, 한건연\*\*, 김태형\*\*\*, 김영주\*\*\*\*

Byung Hyun Kim, Kun Yeun Han, Tae Hyung Kim, Young Joo Kim

---

### 요 지

자연하천에 적용가능한 수치모형은 지형의 변화를 합리적으로 계산할 뿐 아니라, 하도의 초기상태가 마름상태이거나 혹은 계산과정 중에 마름상태가 나타나더라도 충분히 계산할 수 있을 만큼 안정적이어야 한다. 본 연구에서는 비정형 및 비구조적 격자를 사용하여 지형변화를 고려한 흐름해석의 정확성과 효율성을 높이기 위해 보존변수의 재구성을 수면경사법과 MUSCL 기법을 연계하였으며, 하상경사항은 발산정리를 이용하여 이산화 하였다. 개발 모형의 정확성, 적용성 그리고 보존특성 등을 검증하기 위하여 해석해가 존재하는 불규칙 하상이 존재하는 하도 및 실험자료가 존재하는 실험하도에서의 댐 및 제방 붕괴와 같은 다양한 조건의 흐름에 적용하였다. 그리고 자연하천에 대한 적용 및 검증을 위해 Malpasset 댐 붕괴 모의를 수행하여 계산결과를 관측자료와 비교하였다.

**핵심용어** : 자연하천, 유한체적모형, 수면경사법, MUSCL

---

### 1. 서 론

자연하천에서의 흐름은 마름·젖음 하도흐름, 댐이나 제방의 붕괴로 인하여 발생하는 급격한 유량의 변화와 흐름영역의 변화로 인한 천이류 및 도수의 발생 그리고 불연속 흐름과 같은 다양한 흐름형상이 나타난다. 이러한 점변부정류나 급변부정류의 흐름형상 및 특성에 대한 해석을 위해 일반적으로 많이 사용되는 지배방정식은 천수방정식이다. 천수방정식의 여러가지 형태 중에서 자연에서 발생하는 물리적 현상을 가장 잘 반영하는 형태는 적분 보존형으로, 최근 이 형태를 사용한 고정확도 Godunov형 유한체적 기법에 관한 많은 발전이 있었다. 본 연구에서는 적분 보존형의 천수방정식을 지배방정식으로 하여 천이류, 불연속류, 마른하도 흐름류 등을 포함하는 급변부정류와 점변부정류 등을 안정되고 정확하게 해석하기 위해, 흐름율의 계산에 Riemann 해법을 적용하여 흐름율과 생성항의 보존 특성을 만족시킬 수 있는 2차원 유한체적모형을 개발하였다.

### 2. 연구내용

유한체적법에 의한 해석시 split 기법과 unsplit 기법의 차이는 차원 및 생성항의 분리 유무에 있다. 지금까지 국내에서 적용되었던 Split 기법의 대표적인 fractional step 기법은  $x$  및  $y$ 방향으로

---

\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 Post-Doc · E-mail : hydrobk@knu.ac.kr  
\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail: sun3515@hotmail.com  
\*\*\*\* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: fishone03@naver.com

차원을 분리하여 각 방향에 대한 하지만, 본 연구에서는 fractional step 기법이 아닌 공간적으로는 차원을 분리하지 않고, Godunov형 지배방정식에서 생성항을 분리하지 않는 차원 및 생성항 비분리 기법인 unsplit 기법을 적용하여 2차원 유한체적 모형을 개발하였다. Fractional step 기법은  $x$  및  $y$ 방향에 대한 sweep이 적용되는 준이차원 기법이라 할 수 있으므로 비구조적 격자의 적용에는 제약이 따르나, unsplit 기법은 차원을 분리하지 않는 완전한 이차원 기법으로 구조적 및 비구조적 격자 모두에 적용될 수 있어, 복잡한 지형에 대해서도 2차원 격자의 구성에 제약없이 효과적으로 처리할 수 있다.

## 2.1 지배방정식

보존변수로 이루어진 2차원 천수방정식을 벡터형태로 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y = S(U) \quad (1)$$

여기서,  $U$ 는 보존변수,  $F(U)$ ,  $G(U)$ 는 각각  $x$  및  $y$ 방향의 흐름을 그리고  $S(U)$ 는 생성항으로 Eq. (2)와 같다.  $S_0$ 는 하상경사로  $S_f$ 는 마찰경사를 나타낸다.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}(gh^2) \\ huv \end{bmatrix}, G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}(gh^2) \end{bmatrix}, S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.2 보존특성(C-property)의 검증

개발모형의 하상경사항 처리에 대한 검증을 위해 Goutal과 Maurel(1997)이 제안한 불규칙 하상을 가진 정상류 흐름 모의를 수행하였다. 길이 1500m, 폭 1m인 하도를 격자간격  $\Delta x=0.25m$ 로 하여 200개의 직사각형 격자로 구성하였으며, CFL은 0.9, 모의 종료시간은 200초로 하였다. 초기조건은 정수 중의 수위 16m이고, 경계조건으로 상류단은 유량의 유입이 없으며, 하류단은 16m의 수위를 유지하는 조건으로 적용하였다. 모의결과, 그림 1과 같이 정상상태에서의 수위 및 유량이 일정하게 유지되어 보존특성을 만족함을 보였다.

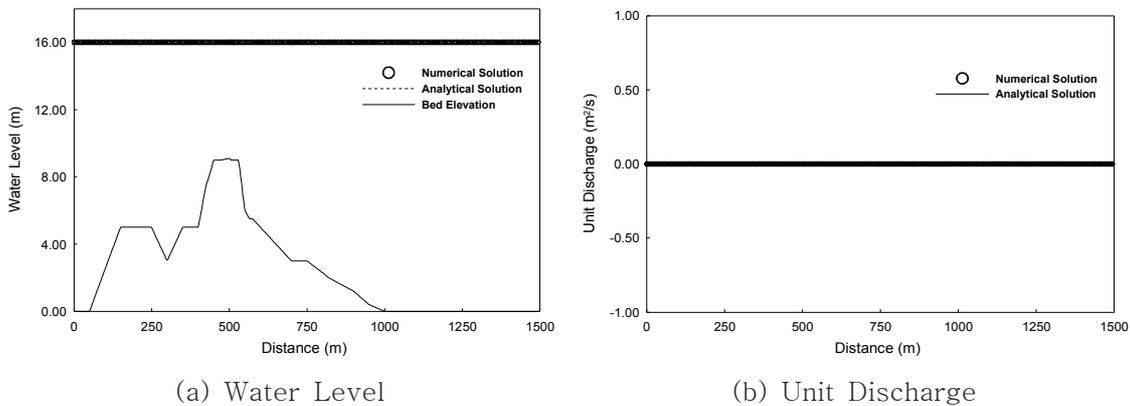


그림 1. 보존특성의 검증

### 2.3 2차원 댐 붕괴 해석

단면의 급확대 및 축소 구간이 있고, 하상경사가 존재하는 하도에 대한 2차원 댐 붕괴 흐름을 모의하였다. 초기조건으로 저수지의 수위는 0.3m, 하도부분의 수위는 0.18m를 적용하였으며, 경계조건으로는 상류단은 닫힌 경계조건, 하류단은 자유유출 경계조건을 적용하여 모의를 수행하였다. 초기에 하도부분의 수위 0.18m를 유지하기 위해 하류단에 약 1%의 경사로 보가 설치되었다. 단면은  $\Delta x=0.2m$ ,  $\Delta y=0.03m$ 로 하여 1150개의 비정형 사각형 격자로 구성하였고, Manning 조도계수는 0.014, 전체 계산시간은 댐 붕괴후 30초, CFL은 0.9를 사용하여 모의를 수행하였다. 모의결과, 계산수심은 실측수심과 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주었으며, 실측지점 O1 및 O2에서의 실측수심과 개발모형의 계산수심을 비교하여 그림3에 나타내었다.

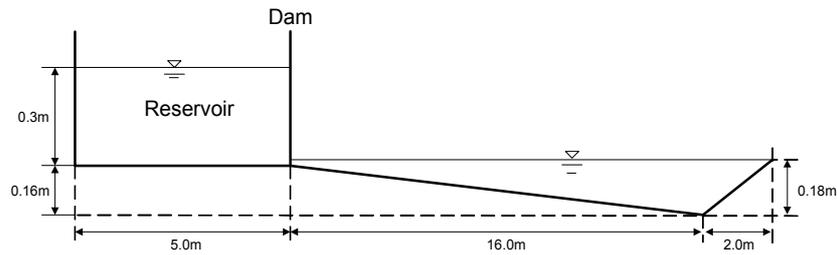


그림 2. 실험 및 모의를 위한 초기조건

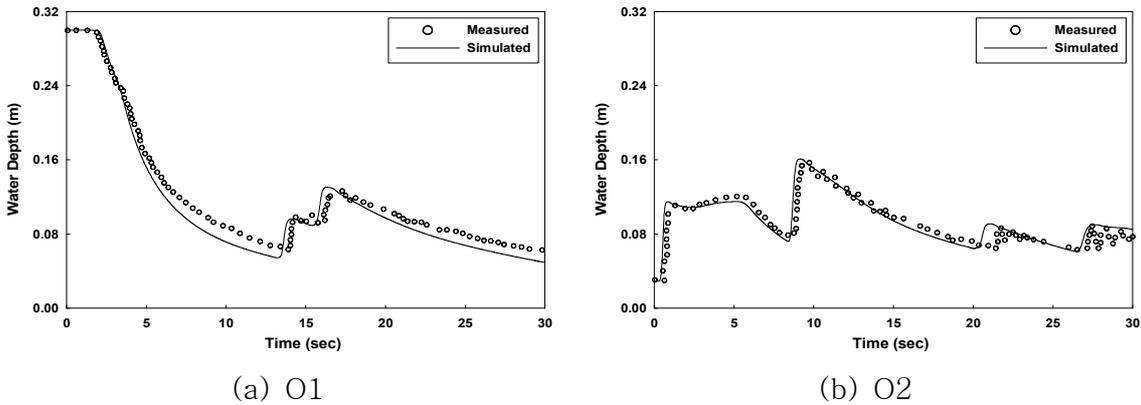


그림 3. 실측치와 계산결과와의 비교

### 2.4. Malpasset 댐 붕괴

Malpasset 댐은 1959년 12월 2일 붕괴되어 421명의 사상자가 발생하였다. 본 연구에서는 Malpasset 댐 붕괴 모의를 위해 SMS 모형을 이용하여 14912개의 사각형 격자를 구성하였다. 상류부 경계조건은 유입유량이 없는 닫힌 경계조건으로 지정하였으며, 하류부 경계조건은 해안으로 홍수파가 유출되므로 자유유출 경계조건으로 지정하였다. 초기조건으로는 저수지의 초기수위는 100m으로 설정하였으며, 댐 하류부의 초기 수심은 0.0m로 지정하여 마른하도로 모의하였다. Manning 조도계수는 모든 영역에 0.033로 설정하였다. 그림 4는 계산수위를 ArcGIS를 이용하여 시간별 2차원 범람수심 및 3차원 범람양상으로 나타낸 것이다.

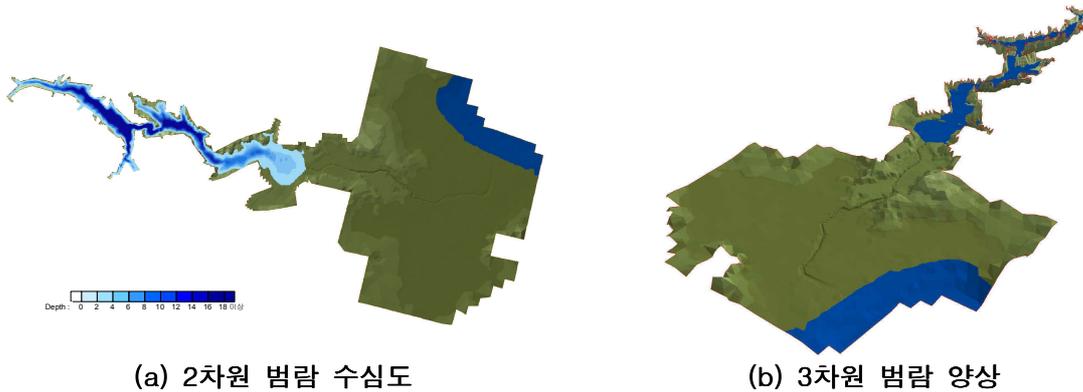


그림 4. Malpasset 댐 붕괴 모의결과

### 3. 결론

불규칙을 하상을 가진 하도에 대해 개발모형을 적용하여 흐름율과 생성항과의 보존특성을 검증하였다. 그리고 개발모형의 정확성 및 적용성을 검증하기 위해 실험치가 존재하는 단면 확대·축소구간이 존재하는 하도에 대한 2차원 댐 붕괴 모의와 자연하천인 Malpasset 댐 붕괴 모의를 수행하여 실험치 및 관측치와 비교하였다. 비교결과, 실험치 및 관측치 그리고 기존의 연구결과와 일치하는 결과를 나타내어 모형의 정확성 및 적용성을 입증할 수 있었다. 따라서 본 연구모형은 하천에서 발생할 수 있는 다양한 조건을 모의할 수 있어 향후 실제하천의 2차원 해석 및 범람모의에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 분포형 강우-유출모형과 연계하여 홍수량을 정확하고 효율적으로 계산함으로써 이상기후나 돌발홍수를 대비한 홍수위험지도(Flood Risk Map) 작성에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 김병현 (2009). “고정확도 Godunov 기법을 이용한 자연하천에서의 2차원 극한홍수 해석모형”. 공학박사학위논문, 경북대학교.
- Guo, W.D., Lai, J.S., and Lin, G.F. (2007) “Hybrid flux-splitting Finite-volume schemes for shallow-water flow simulations with source terms.” *Journal of Mechanics*, Vol. 23, No. 4, pp. 399-414.
- Valiani, A., Caleffi, V., and Zanni, A. (2002), “Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation using a Two-Dimensional Finite Volume Method.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pp. 460-472.
- Won Kim, Kun-Yeun Han, and Hyoseop Woo (2005). "Application of the Upwind Scheme to the Discontinuous Flow in Natural River" ASCE, 2005