

# 이차원 유한체적모형을 이용한 도시지역 홍수범람에 관한 수치적 연구 : 스페인 Tous 댐 붕괴 사례 적용

## A Numerical Study on Flood Inundation of Urban Areas Using 2D Finite Volume Model: Application to Tous dam failure, Spain

김경환\*, 정우창\*\*

Woo Chang Jeong, Kyung Hwan Kim

### 요 지

1982년 10월 21일 스페인에서 발생한 Tous 댐 붕괴 시 발생한 유출로 인하여 댐에서 5km 하류에 위치한 도시지역을 홍수파가 관통하면서 시간에 따라 변화되는 홍수파의 특성을 수치모형을 이용하여 분석하였다. 분석에 적용된 수치모형은 비구조적 2차원 유한체적법과 불연속 흐름을 모의하기 위해 시간과 공간상으로 1차 정확도를 가진 HLLC 기법을 적용한 모형이다. 본 연구에서는 도시지역의 침수현상을 두 가지 Case에 대해 구성하였으며, 모의결과를 침수흔적 자료 및 기존의 수치모의 결과와 비교하였다. 첫 번째 Case는 Mulet and Alcrudo(2004)에 의한 수치모의결과와의 비교를 통해 모형의 적용성 검증을 하였으며, 두 번째 Case는 도시지역에서의 건물 투수여부에 따라 변화되는 홍수파의 흐름특성 및 지점별 최대 침수심을 모의하였을 경우이다. Case 1에서 모형의 검증결과 수치모형을 통해 계산된 지점별 수심변화는 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었으며, Case 2의 경우 지점별 수심은 Case 1에 비해 다소 과소산정 되는 경향을 나타내었다.

핵심용어 : Tous Dam, 천수방정식, 유한체적법, 도시지역, 홍수파

### 1. 서 론

최근 온난화, 엘리뇨 현상 등 범지구적 기후변화로 인해 홍수, 태풍 등 자연재해의 규모가 점차 대형화 되고 있으며, 특히 인구와 자산이 밀집된 도시지역에서의 홍수피해가 빈번히 발생하여 막대한 인명과 재산피해를 입고 있다. 본 연구에서는 1982년 10월 21일 스페인에서 발생한 Tous 댐 붕괴 시 발생한 유출로 인하여 댐에서 5km 하류에 위치한 도시지역을 홍수파가 관통하면서 시간에 따라 변화되는 홍수파의 흐름특성을 수치모형을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 모형의 현장 적용성 검증을 위해 도시지역에서의 지점별 침수심을 Mulet and Alcrudo(2004)에 의해 적용된 모형으로부터의 결과와 비교하였으며, 도시지역 내의 건물의 투수성 여부에 따라 홍수파의 흐름 특성 및 지점별 최대 침수심을 비교하였다.

### 2. 적용된 수치모형

본 연구에서 적용된 수치모형은 2차원 천수방정식(Shallow Water Equation, SWE)을 지배방정식으로 한

\* 정희원, 경남대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : kimkh@hanma.kr

\*\* 정희원, 경남대학교 토목공학과 전임강사 · E-mail : jeongwc@kyungnam.ac.kr

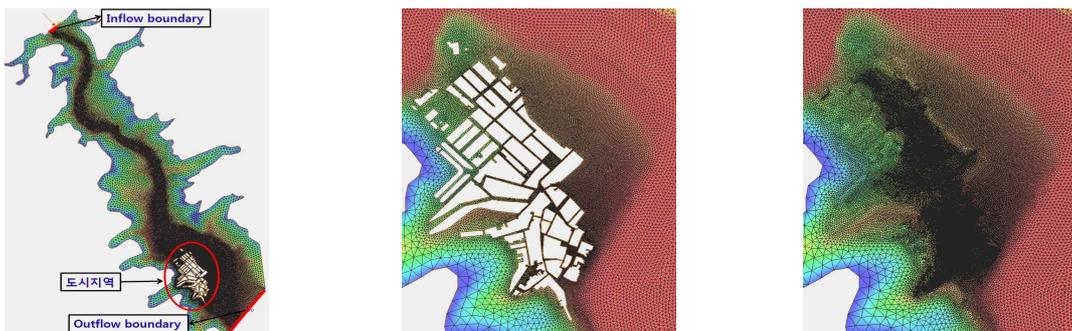
유한체적모형으로 동적메모리 할당이 가능한 Fortran90 언어를 사용하였다(정 등, 2009). 본 모형에 적용되는 격자시스템은 삼각형 또는 사각형 형태의 비구조적 격자망으로 구성되며, 매우 불규칙한 하상지형으로 인한 수치진동을 효과적으로 감소시키기 위해 well-balanced HLLC 기법을 적용하였다. 또한 본 연구에서 적용되는 모형은 마른 및 젖은 하상조건에도 적용이 가능하다.

### 3. 스페인 Tous 댐 붕괴 사례에의 적용

1982년 10월 21일 스페인에서 발생한 Tous 댐 붕괴 시 발생한 유출로 인해 댐에서 5km 하류에 위치한 도시지역에 홍수파가 관통하면서 시간에 따라 변화되는 홍수파의 특성을 수치모형을 이용하여 분석하였다. 본 모의에서는 두 가지 서로 다른 Case에 대해 홍수파의 전파양상을 모의 및 분석을 수행하였다.

#### 3.1 Case 1 : 모형의 적용성 검증

Case 1은 본 연구에서 적용된 수치모형의 검증차원에서 Mulet and Alcrudo(2004)에 의한 수치모의결과와의 비교를 수행하였으며, Mulet and Alcrudo(2004)가 적용한 모형은 Roe기법과 양해적 2차 정확도를 가진 유한체적모형이다. 본 모의에서 적용된 Manning 조도계수는 그림 2에서와 같이 하천에 대해서는 0.025, 도시지역은 0.100이며, 이는 Mulet and Alcrudo(2004)에 의해 적용된 것과 동일하다. 또한 그림 1(a)에 나타나 있는 격자시스템은 SMS 모형을 이용하여 비구조적 삼각형 격자망으로 구성되어 있으며, 구성하는 격자는 43,581개의 절점과 81,555개의 요소로 이루어져 있으며, 그림 1(b)와 같다. 그리고 Tous 댐 상류경계에는 유입경계조건 그리고 하류경계에는 개경계조건을 부여하였고, 초기조건으로 마른하상조건을 부여하였다. 최대 유입량은 43,200sec에서 15,000m<sup>3</sup>/sec로 유입경계에 적용된 수문곡선은 그림 3에 나타내었으며, 총모의시간은 140,400sec이고, CFL조건으로 0.9를 적용하였다.



(a) 적용 대상지역의 격자시스템 (b) T1 도시지역 (건물-불투수성) (c) T2 도시지역 (건물-투수성)

Fig 1. Case 1 및 Case 2에서 적용된 격자시스템

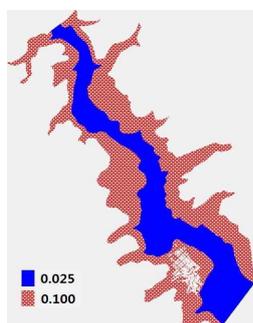


Fig 2. 적용된 조도계수 분포

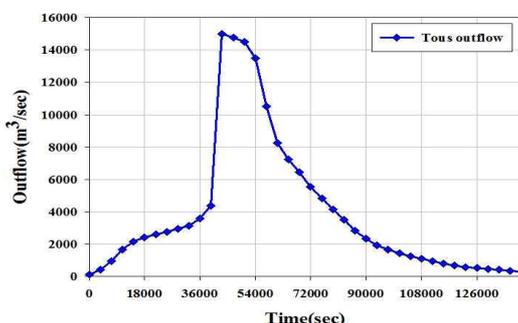


Fig 3. 유입경계에 적용된 수문곡선

Case 1에서는 도시지역내의 21개 지점에서 홍수과에 의한 최대 침수심을 Mulet and Alcrudo(2004)에 의한 모의결과와의 비교를 통해 모형의 적용성을 검증 하였으며, 침수심 측정 지점은 그림 4와 같다. 모형의 적용성을 검증한 결과는 표 1과 그림 5와 같으며, 지점별 절대오차의 평균값은 0.198m로 모의결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

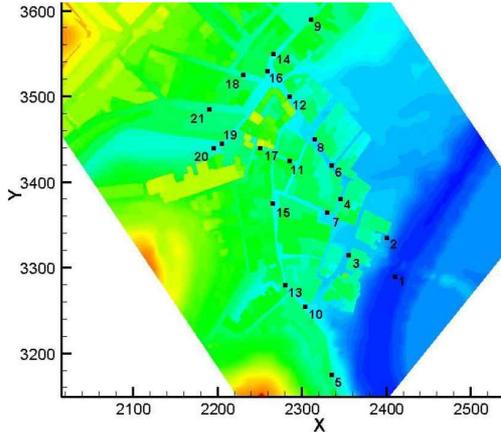


Fig 4. 침수심 측정 지점

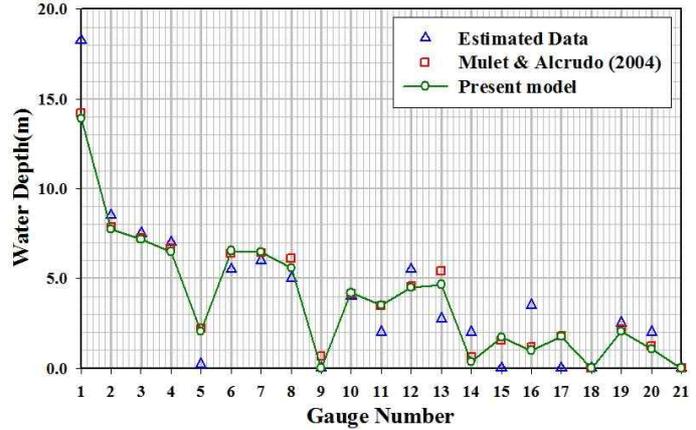


Fig 5. Case 1의 침수심 비교

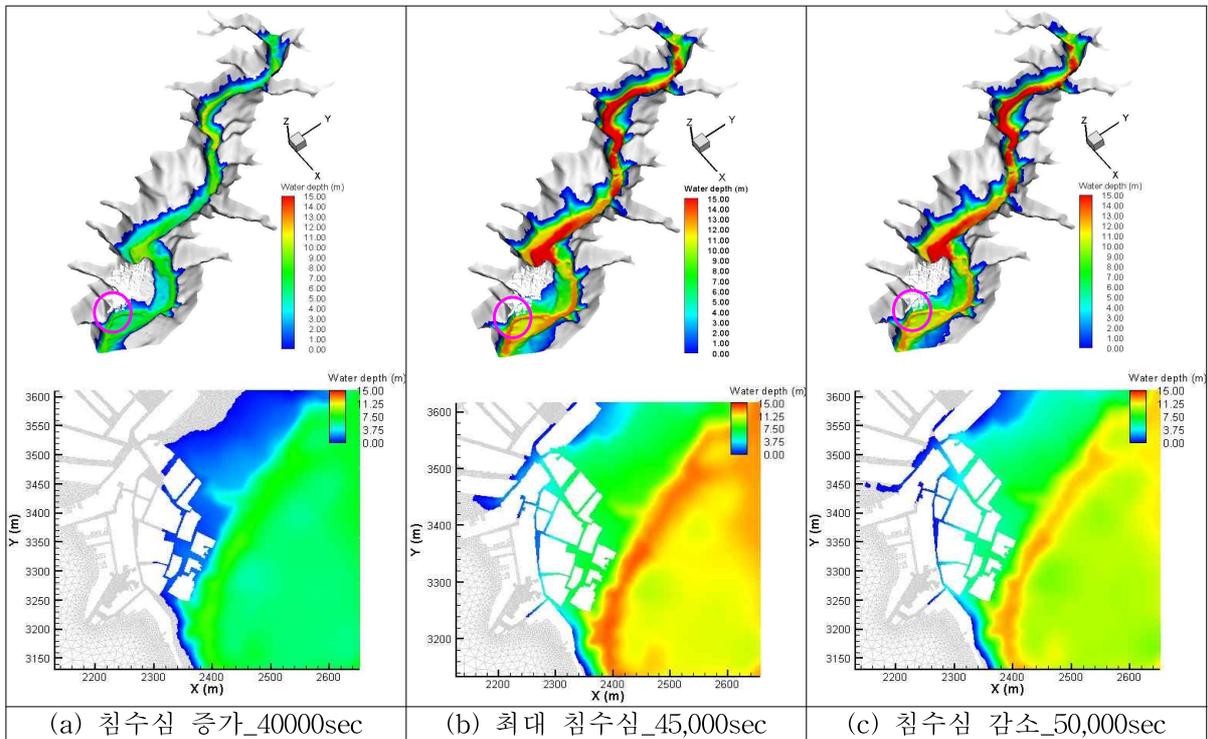


Fig 6. 시간에 따른 도시지역에서의 침수분포 양상

### 3.2 Case 2 : 건물 투수성 여부에 따른 도시지역 범람 모의

Case 2에서는 Tous 댐 붕괴로 인한 유입량이 5km 하류에 위치한 도시지역에서의 건물 투수여부에 따라 변화되는 홍수과의 흐름특성 및 지점별 최대 침수심을 모의하였으며, 모의결과는 표 1에 나타내었다. 본 모의에 적용된 격자수는 건물 불투수성(T1)일 때 43,581개의 절점과 81,555개 요소, 건물 투수성(T2)일 때 64,630개의 절점과 128,594개 요소로 이루어져 있으며, 모의조건은 Case 1과 동일하다.

표 1. 침수심 비교(단위:m)

Gauge	Estimated Maximum Water Level(m)		Mulet & Alcrudo(2004) (absolute error, m)	Present Model (absolute error, m)	Present Model (absolute error, m)
	Range	Middle		Case 1	Case 2
1	17.5~19.0	18.25	14.209(4.041)	13.905(4.345)	13.033(5.217)
2	8.0~9.0	8.50	7.848(0.652)	7.737(0.763)	7.028(1.472)
3	7.0~8.0	7.50	7.272(0.228)	7.167(0.333)	6.200(1.300)
4	7.0	7.00	6.672(0.328)	6.492(0.508)	5.174(1.826)
5	0.2	0.20	2.217(2.017)	2.029(1.829)	1.136(0.936)
6	5.0~6.0	5.50	6.399(0.899)	6.538(1.038)	5.747(0.247)
7	6.0	6.00	6.427(0.427)	6.457(0.457)	5.748(0.252)
8	5.0	5.00	6.125(1.125)	5.572(0.572)	4.690(0.309)
9	0.0	0.00	0.671(0.671)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
10	4.0	4.00	4.143(0.143)	4.191(0.191)	3.433(0.567)
11	2.0	2.00	3.476(1.476)	3.493(1.493)	2.674(0.674)
12	5.0~6.0	5.50	4.574(0.926)	4.510(0.990)	3.676(1.824)
13	2.5~3.0	2.75	5.412(2.662)	4.659(1.909)	3.555(0.805)
14	2.0	2.00	0.605(1.395)	0.335(1.665)	0.000(2.000)
15	0.0	0.00	1.552(1.552)	1.716(1.716)	0.909(0.909)
16	3.0~4.0	3.50	1.185(2.315)	0.993(2.507)	0.456(3.044)
17	0.0	0.00	1.806(1.806)	1.778(1.778)	1.009(1.009)
18	0.0	0.00	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.000(0.000)
19	2.0~3.0	2.50	2.170(0.330)	2.031(0.469)	1.249(1.251)
20	2.0	2.00	1.244(0.756)	1.047(0.953)	1.586(0.414)
21	0.0	0.00	0.000(0.000)	0.000(0.000)	0.532(0.532)
Mean			1.131	1.094	1.171

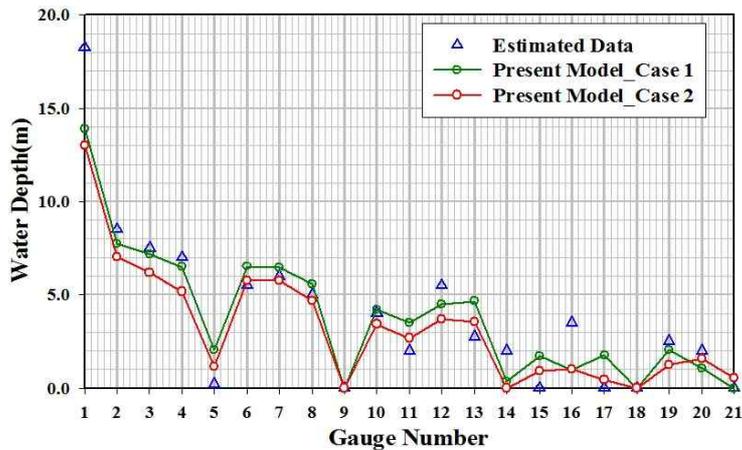


Fig 7. Case 2의 침수심 비교

수치모의 결과 건물을 불투성 격자망을 구성한 경우와 불투수성 격자망으로 구성한 경우의 최대수심의 절대평균 오차는 0.077m로 나타났으며, 투수성 격자망일 경우 수심이 과소산정 되는 경향을 보이고 있다.

그림 8은 수치모의 결과 중에서 도시지역 내에서 최대 침수심이 발생한 45,000sec일 때 건물의 투수성 여부에 따른 도시지역 내에서의 유속장, 유선 그리고 Froude 수 등 홍수파의 흐름특성을 비교하여 나타내었다. 불투수성일 경우 유선은 건물을 따라 흐르는 경향을 보이고, 유속장은 좁은 건물 사이에서 비교적 빠른 흐름을 보이고 있지만 평균적으로 유속의 흐름은 느린 것으로 나타났으며, 건물이 투수성일 경우 유선은 도시지역 내에서 큰 회전류의 흐름을 보이고 유속장 또한 상대적으로 빠른 흐름을 보이고 있다. 그리고 도시지역 내에서의 Froude 수의 변화를 살펴보면 건물이 불투수성일 경우 Froude 수가 0.05~0.25, 건물이 투수성일 경우 모두 Froude 수가 0.15~0.5로 두 경우 모두 상류 형태의 흐름을 보이나, 불투수성일 경우 도시지역내의 홍수파가 보다 빠르게 전파되는 것을 알 수 있다.

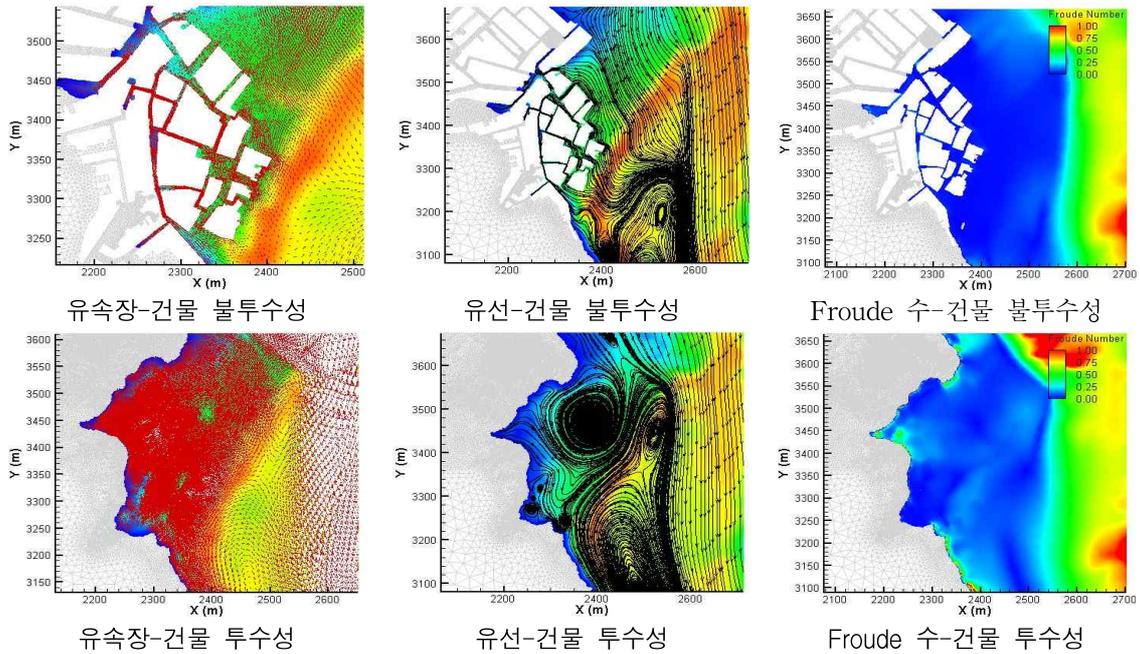


Fig 8. 건물의 투수성 여부에 따른 도시지역 내에서의 홍수와 흐름특성 비교(45,000sec)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1982년 10월 21일 스페인에서 발생한 Tous 댐 붕괴 시 발생한 유출로 인하여 댐에서 5km 하류에 위치한 도시지역을 홍수과가 관통하면서 시간에 따라 변화되는 홍수과의 흐름특성을 정 등(2009)이 개발한 수치모형을 이용하여 모형의 검증 및 도시지역 내에서의 홍수과 흐름특성에 모의 하였다. Case 1에서는 도시지역내의 21개 지점에서 홍수과에 의한 최대 침수심을 Mulet and Alcrudo(2004)에 의한 모의결과와의 비교를 통해 모형의 적용성을 검증한 결과 점별 절대오차의 평균값은 0.198m로 모의결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한 건물을 불투수성으로 고려하였을 경우와 그렇지 않은 경우에서는 유속장, 유선 그리고 Froude 수 등의 홍수과의 흐름현상 및 지점별 침수심을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서는 건물군으로 격자망을 작성하였지만 건물 하나하나를 고려하여 격자망을 작성하면 건물과 건물사이에서의 흐름특성을 모의할 수 있을 뿐만 아니라 실제 침수양상에 더 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 정우창, 이진우, 조용식 (2009). “도시지역을 관통하는 홍수과의 특성에 관한 수치적 연구(1) : 수치모형의 개발 및 검증”. 한국방재학회논문집, 하천방재, 제9권, 6호, pp.89~97.2.
2. Frazão, S.S., Noël, B. and Zech, Y. (2008). “Dam-break through an Idealized City”, Journal of Hydraulic Research.
3. Mulet, J. and Alcrudo, F(2004) “Impact Flood Propagation Case Study: The flooding of Sumacárcel after Tous Dam Break - University of Zaragoza modelling”, Impact Project Technical Report.
4. Toro, E.F. (2001), “Shock-capturing methods for free-surface shallow flows”, Wiley, New York.