

1-2차원 연계 홍수파 해석모형의 개발

Development of Flood Analysis Model Combined 1D and 2D

최흥석*, 최성열**, 이왕곤***, 권지혜****

Hong-Suk Choi, Sung-Yeul Choi, Wang-Gon Lee, Ji-Hye Kwon

요 지

댐 붕괴에 따른 홍수파의 전파 및 이에 따른 하류 제내지 범람은 그 영향범위가 매우 광범위하고, 흐름 양상이 복잡하며, 하도와 범람원 사이의 제방 붕괴특성에 따라 모의 결과가 달라지는 특징이 있으나, 이러한 요소를 모두 만족스럽게 재현하기가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 1차원(1-D) 홍수파 해석 모형과 2차원(2-D) 제내지 범람모형을 제방붕괴 모듈로 연계하여, 1-2차원 연계 극대홍수파 해석 모형(2DFM)을 개발하였다.

제방의 붕괴 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, 하천의 수위가 제방고를 초과하는 경우 월류에 의한 제방의 붕괴가 시작되는 것으로 설정하였으며, 제방붕괴 과정은 시간경과에 따른 붕괴폭과 붕괴심의 변화를 설정하여 과제부의 월류량으로 범람홍수량을 결정하고 2차원 범람모형과 연계하였다.

핵심용어 : 수치모형, 범람해석, 제방붕괴

1. 홍수파 해석모형의 검토

댐 등의 대규모 수공구조물 붕괴시, 이를 재현하거나 모의하는 것은 수치모형실험이 현실적으로 어려우며 각 종 수치모형이 활용하여 그 영향을 평가하고 있다.

댐 붕괴에 따른 홍수파의 전파 및 이에 따른 하류 제내지 범람은

① 그 영향범위가 매우 광범위 한 점

② 흐름의 양상이 매우 복잡한 점

③ 하도와 범람원 사이에 놓여 있는 제방이 시간의 흐름에 따라 붕괴양상이 발전한다는 점 등에서 매우 복잡한 물리적 기구를 갖고 있다고 할 수 있다.

그러나 이러한 요소를 모두 만족스럽게 재현 할 수 있는 모형은 현재 우리나라에 없는 실정이다. 즉, 수십 km 에 이르는 광역의 공간적 재현 범위를 모두 2차원으로 모의 하는 것은 자료의 구축이나 컴퓨터의 성능 상 적절치 않으며, 또한 1차원 홍수파 해석모형을 사용하는 것은, 계곡에 연한 범람원을 유하하는 홍수파(유하형 홍수파) 등에는 적절하나, 하도와 연하여 광활한 범람원이 존재하는 확산형 홍수파 해석에는 한계가 있다는 점, 또한 현재 상용모형에서 지형 구축에 있어서 시간에 따른 제방의 붕괴양상을 모듈화 할 수 있는 모형은 없다는 점 등, 현재 국내에서 사용되고 있는 모형으로 본 연구의 대상 유역과 같이 확산형 지형을 갖는 곳에 홍수파 해석을 할 수 있는 모형이 없다고 할 수 있으며, 이를 위한 모형의 개발이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 위에서 언급된, 대상의 광역성, 확산흐름의 복잡성, 제방붕괴의 물리적 실질성에 관한 제반 문제를 해결하여 실질적인 홍수범람현상을 구현할 수 있는 모형으로, 1차원 하도 부정류 모형과 2

* 정회원·한국시설안전공단 진단2본부 수리시설실 직원·공학석사·E-mail : hschoi@kistec.or.kr

** 정회원·(주)방재안전기술원 대표이사·공학박사·E-mail : ceo@dpsi.or.kr

*** 정회원·한국시설안전공단 진단2본부 수리시설실 과장·E-mail : leewg@kistec.or.kr

**** 정회원·한국시설안전공단 진단2본부 수리시설실 대리·공학석사·E-mail : wisdom@kistec.or.kr

차원 제내지 범람모형, 그리고 이를 잇는 제방 붕괴 모듈을 연계한 모형으로 1-2차원 연계 극대홍수과 해석을 위한 모형을 개발함으로써 EAP 수립이나, 댐붕괴에 따른 조기예경보 등에 사용하고자 한다.

댐 붕괴 등에 의해 발생하는 극대홍수과가 유하하는 범람원은 댐 하류 지형의 특성에 따라 유하형, 확산형 등으로 구분할 수 있으며, 하도에 연하여 평야나 분지 등을 갖는 하천구역에 있어서는 하도의 종횡단방향에서 본 범람원의 특성, 범람계산의 목적 등에 따라서 적절한 모형의 선택이 반드시 필요하다.

아래 <표 1>은 위와 같은 상황에 있어서 1차원, 2차원 모형의 선택에 관한 판단의 기준을 나타내는 것으로 하천폭과 범람원 경사 등에 따라서는 2차원 홍수범람 해석을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 1차원(1-D) 홍수과 해석 모형과 2차원(2-D) 제내지 범람모형을 제방붕괴 모듈로 연계하여, 1-2차원 연계 홍수과 해석 모형(2DFM)을 개발하였다.

<표 1> 1차원, 2차원 모형 적용 기준

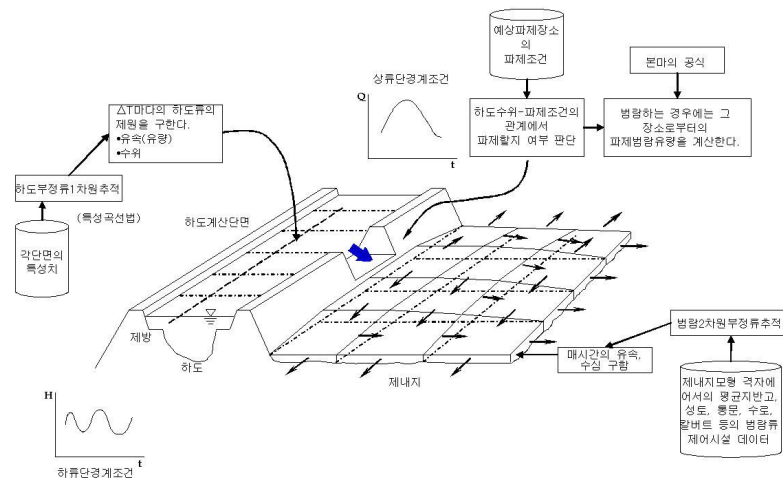
구분	$I_f \geq 1/300$	$I_f < 1/300$
$B_f < 500$	1 차원모형으로도 문제없음	1 차원모형으로도 문제없음. 단 하도와 평행하게 성토가 있는 경우에는 2차원 모형이 좋음
$B_f \geq 500$	1 차원 모형으로도 좋음. 단 하도횡단방향으로 범람구배가 완만하고 또한 범람수의 전과가 중요하게 되는 경우에는 2 차원 모형이 바람직함	2 차원 모형을 사용하는 것이 바람직함

※ B_f 는 하도 횡방향으로 본 범람류의 유하폭, I_f 는 하도 종단방향에서 본 범람원 구배

출처) “범람시물레이손-메뉴얼”, 토목연구소 제3400, 1986년 2월

2. 1-2차원 연계 홍수과 해석모형의 개발

홍수범람은 댐 붕괴에서 보편적으로 볼 수 있는 상류부에서 하도와 범람원이 일체가 되어 유하하는 형태, 또는 산허리로 둘러싸여 있는 저류형 형태로 구분되는 곳도 있으나, 부분적으로 확산형의 범람형태를 취하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 구축된 부정류 해석모형(2-Dimensional Flood Model, 2DFM)은 크게 다음 3개의 요소로 구성되어 있으며, 해석의 개념도는 다음 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 1-2차원 연계 홍수과 해석모형의 개념도

- ① 하도내의 홍수 추적모형(부정류의 1차원해석)
- ② 제내지의 범람류 추적모형(부정류의 2차원해석)
 - 단락오름, 내림, 성토부(인공구조물 등), 배수문, 배수펌프 등의 구조물이 고려됨
- ③ 위의 ①과 ②를 연결하는 파계유량계산 모형

1차원 하도추적모형은 일반적인 Saint-Venant 공식 계산을 위해 유한차분 양해법과 특성곡선법이 사용되었으며, 계산영역 내에서 흐름조건은 상류라고 가정하였다.

2차원 범람류 흐름 해석을 위해서는 2차원 천수방정식을 사용하였다.

편미분 방정식을 계산하기 위해서 Staggered 유한차분 양해법을 사용하였다. 침수구역과 침수영향이 없는 격자사이의 유량플럭스는 존재하지 않는 것으로 간주하고 산지로부터의 유출량은 각 경계조건으로 반영된다. 또한, 과제점에서의 월류유량과 제내지에서 하도로 배수되는 배수펌프장의 배수유량은 유량플럭스로 계산되며, 범람구역의 인접한 격자의 지반고가 현저히 변하는 경우도 수면경사로부터 유량플럭스를 계산한다. 범람수의 선단조건은 기본적인 수심을 0.001m로 가정하고, 이 이하의 수심이 발생하는 격자에서의 유량플럭스는 0으로 하며, 계산된 수심이 음인 경우에는 0으로 가정하여 계산하였다. 성토구조물이 존재하는 경우와 각종 배수구조물을 통과하는 흐름도 계산에 반영된다. 시간격자 간격, Δt 는 양해법의 안정조건을 고려하여 크기를 결정할 수 있다.

1차원 및 2차원 모형의 연계를 위하여 과제 유량산정 모형을 개발하였으며, 여러 가지 제방붕괴의 원인 가운데 큰 하천의 수위가 제방고를 초과하는 경우 월류에 의한 제방의 붕괴가 시작되는 것으로 설정하였으며, 제방붕괴 과정은 시간경과에 따른 붕괴폭과 붕괴심의 변화를 설정하여 과제부의 월류량을 계산하여 범람홍수량을 결정하고 2차원 범람모형과 연계하였다. 과제유량의 계산에는 완전월류와 잠수월류로 구분된 아래와 같은 혼마의 광정 위어공식을 적용한다.

- 완전월류: $Q = C' B \sqrt{2g} h_1 h_2$

- 잠수월류: $Q = C' B \sqrt{2g} h_1 h_2$

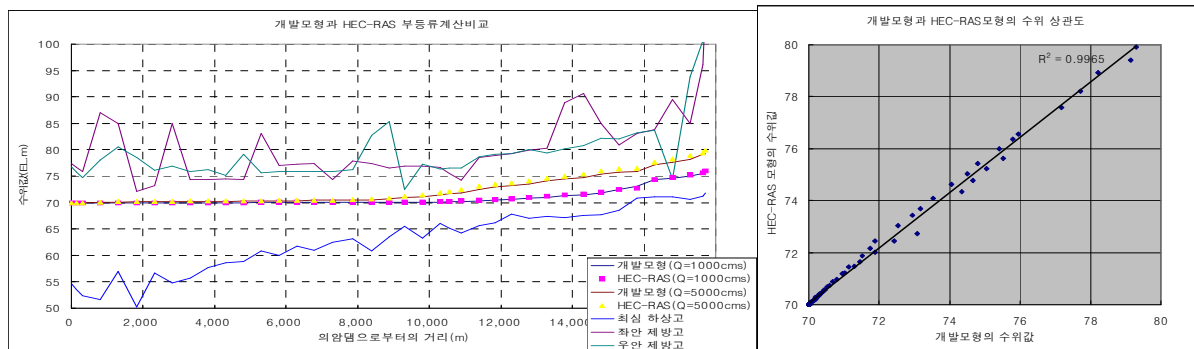
여기서, Q : 과제 월류량(m³/s), B : 과제폭(m), C, C' : 유량계수(=1.55, 4.03)

h₁, h₂: 월류부 제방을 기준으로하는 상류 및 하류측 수심(m)

3. 1-2차원 연계 홍수와 해석모형의 적용

가상하도에 대한 1차원 및 2차원 모형의 다양한 검증을 수행하였으며, 하류에 횡방향으로 확산할 광활한 범람원이나 지형적 장애가 있는 곳에 적용하기 위하여 소양댐 및 춘천댐의 하류에 위치하는 춘천시 실제 적용 대상구역으로 선정하였다. 제내지 및 제외지의 지형자료는 하천정비기본계획 자료와 국가지리정보 시스템의 수치지도를 활용하였으며, 경계자료는 상류 홍수수문곡선과 하류부 수위자료를 사용하였다.

가) 하도구간 홍수와 해석 결과



<그림 2> 개발모형과 HEC-RAS 모형과의 부등류 수면곡선 비교 및 상관도

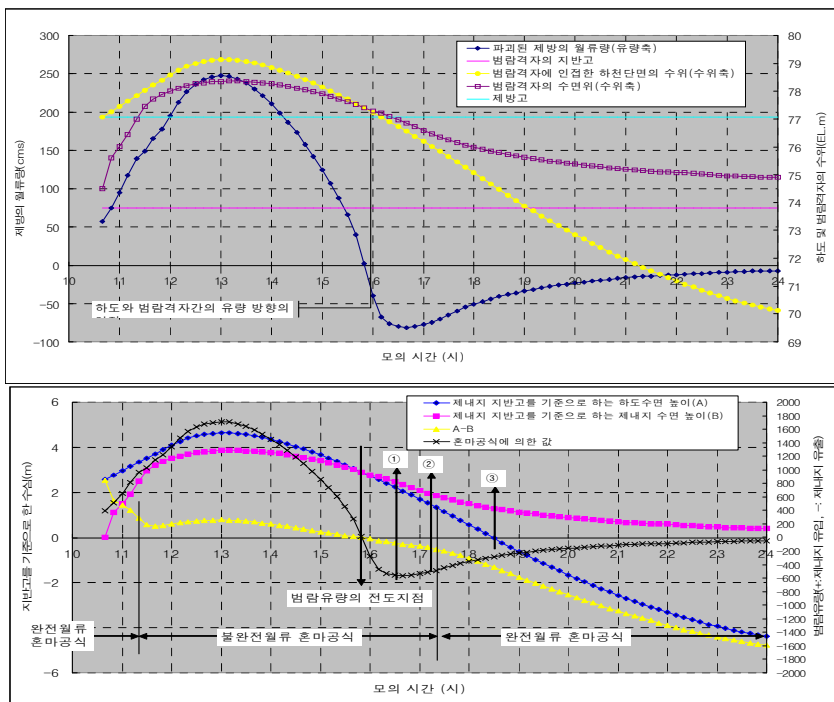
<그림 2>는 본 연구에서 개발한 1-2 차원 연계모형의 하도연산 모듈을 사용하여 소양강의 합류는 배제한 북한강 유역만을 대상으로 부등류 수면곡선을 모의하여 범용해석프로그램인 HEC-RAS 모형의 결과치와 비교한 것으로서 양 계산치의 상관관계가 99%이상으로 나타나 상당히 양호한 적합도를 나타내고 있다.

나) 과제 연계부 홍수와 해석 결과

<그림 3>의 위쪽 그림은 본 연구의 모형에서 규정된 범람 예상 제방을 통하여 제내지 및 하도로 유출입하는 양을 정리한 것으로서, 하도의 수위(노란색)가 제방고(하늘색)를 넘는 순간 범람유량(파란색)이 발생하여 제내지 침수가 유발되며, 제내지의 범람격자의 수위(보라색)가 하도수위를 넘게 되면 역으로 제내지에서 하도로 유량이 방출(마이너스 유량값)되는 현상을 정확히 구현하고 있다.

또한 아래쪽 그림은 본 모형에서 계산된 혼마식을 사용한 범람유량 산정이 적정한지를 나타내는 것이다. 그림 상에서 16시에서 17시에 걸쳐 제내지에서 하도로 범람류가 되돌아가는 현상을 볼 수 있으나, 그림 상의 ①번 지점에서의 하도-제내지 수면의 차가 ②번 지점의 하도-제내지 수면의 차보다 적음에도 불구하고 많은 유량이 되돌아가고 있음을 확인할 수 있다. 이는 본 구간이 불완전 월류구간의 조건, $H2 < \frac{2}{3} * H1$ (낮은 쪽 수심) $\geq \frac{2}{3} * H1$ (높은 쪽 수심)에 해당하여, 월류량 계산이 다음과 같이 H2 와 (H1-H2) 의 값에 의하기 때문에 수면차가 많더라도, 낮은 쪽 수심이 작아지면 범람유량이 작아지기 때문인 것으로 사료된다.

또한 ③ 번 지점 이후의 유량값이 작아지는 이유는, 하도의 수위가 제내지 지반고보다 낮아지는 경우에 제내지로부터의 완전월류에 의해서 하도로 되돌아가는 유량이 결정되므로, 그림의 분홍색 수심(B)에 의해서 유량이 결정되기 때문이다. 이러한 점들을 고려할 때, 본 연구에서 개발된 연계모형은 하도와 범람원을 정확히 연계시키고 있음을 알 수 있다.



<그림 3> 하도-제내지 연계모듈의 거동 특성

다) 범람원 홍수와 해석 결과

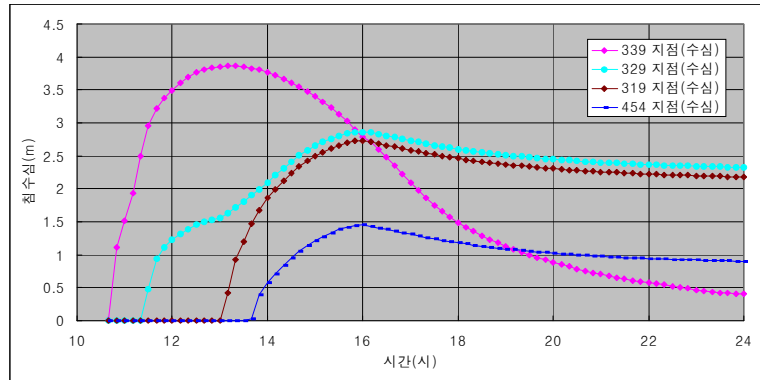
범람원에 대한 결과 분석에서 가장 중요한 것은 서로 이격된 범람 격자간의 수면위 곡선의 침두가 일정 간격 이격되어 있어야 한다는 것이며, 또 하나는 하도에 인접된 범람격자에서는 지형의 영향에 의해 하도로의 유출, 주변 제내지 격자로의 유출로 침수위가 시간의 경과와 함께 낮아져야 한다는 점이다.

따라서 이와 같은 2가지 점에 대해 범람해석결과를 분석하면 다음과 같다.

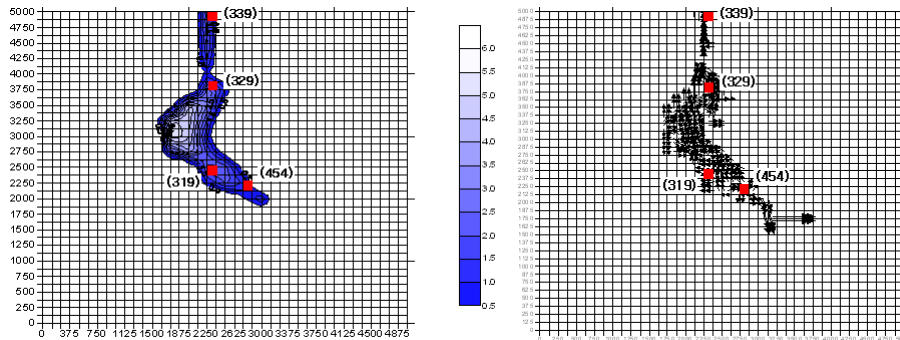
1) 제내지 홍수파의 전파

다음 <그림 4>는 과제 지점에서 각각 떨어진 지점에 대한 침수심의 시간경과를 수위와 수심으로 나타낸 것으로, 수심의 침두발생이 제방에서 멀리 떨어진 곳(454지점, <그림 5> 참조)일수록 늦게 발생한다는 점, 제

방과 인접된 격자(329지점)에서의 침수심의 상승과 하강 현상 등 범람류의 일반적인 거동 특성을 매우 양호하게 설명하고 있음을 알 수 있다.



<그림 4> 제내지 격자 지점에서의 침수 특성



<그림 5> 제내지 범람류의 전파(파제후 5시간 후)

4. 결 론

1차원 하도 부정류 모형과 2차원 제내지 범람모형에 대해 다양한 조건에 대해 검증하였으며, 범용 프로그램과 그 결과를 비교하였을 때 만족할 만한 적합도를 나타내고 있다. 파제 연계부에 대한 홍수와 해석결과에서도 연계부에서의 범람류 유출입 양상과 이로 인한 하도 및 제내지 수위 변화를 검토하였을 때 하도와 범람원, 파제부의 연계가 합리적으로 이루어져 있음을 확인하였다. 또한 범람원 홍수와 해석결과 침수심의 상승 및 하강 현상 등 범람류의 일반적인 거동 특성을 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국방재협회 (2004). 댐붕괴 등에 따른 비상대처계획(EAP) 수립지침 작성방안 연구
2. Abbott, M. B. (1992). Computational Hydraulics
3. Bourdarot, E., Mazars, J., Saouma, V. (1994). Dam Fracture and Damage
4. Committee on Hydraulics for Dams (1998). Dam-Break Flood Analysis
5. Iwasa Y., Inoue K., Mizutori M. (1980). Hydraulic analysis of overland flood flows by means of numerical method. Annuals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto university, No.23 B.
6. Kawaike K., Inoue K., Toda K., Saraga R. (2002). Refinement of Inundation Flow Model in Urban Area Located in Low-lying River Basin, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto university, No.45 B.
7. 栗城 掄 (1996). "氾濫シミュレーション・マニュアル (案) -シミュレーションの手引き及び新モデルの検証-", 土木研究所資料3400.