

범람 홍수류에 대한 2차원 수치모의

한건연* · ○정재학** · 이종설*** · 이올래****

1. 서 론

최근에 들어 하천주변의 제내지 지역 및 홍수터에서의 토지이용도 증가에 따라 범람홍수에 대한 수리학적 연구의 필요성이 크게 대두되고 있다. 홍수터내에 설치되고 있는 각종 도로 및 교량 시설물, 공원 및 레크레이션 시설 설치 등은 홍수터에서 수리학적 흐름특성의 변화를 야기시켰으며, 이로 인해 이 구간에 대한 흐름특성의 정확한 파악과 수공학적 대책이 필요하게 되었다. 자연 하천은 주수로와 홍수터로 구성된 복합단면을 가지고 있으며 어느 정도의 사행성을 가지는 것이 보편적이다. 특히 홍수시 홍수범람의 거동을 해석하는 것은 하천계획 및 관리에 있어서 중요한 정보가 될 수 있다. Toobes와 Sooky(1967)은 범람 홍수해석시 홍수터의 흐름에 대해 사행수로에서의 2차 순환의 영향을 연구한 바 있으며, Rajaratnam과 Ahmadi(1981)은 주수로와 홍수터 흐름 수심 비와의 상호작용에 대해 특성길이와 연관시켰고, 그에 따른 선형관계를 해석하였다.

본 연구에서는 하천의 범람에 대해서 2차원 동수역학적 특성을 파악하기 위해서 다양한 하도 조건하에서 King(1986), King과 Roig(1998) 등에 의해 제안된 2차원 유한요소모형인 RMA를 적용하였고, 결과를 비교 검토함으로써 하천 치수방재 대책에 필요한 기본 자료를 제시하였다. 제시한 모형은, 사다리꼴 단면 수로와 다양한 사행도를 가진 하천에 적용함으로써 범람홍수의 하천수로 및 홍수터 전달특성을 합리적으로 모의하였으며, 이러한 계산기능은 국내 하천유역에서 범람해석을 위해서 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 범람홍수의 물리적 특성

자연 수로는 저수시 및 평수시에 물을 소통시키는 주수로부와 홍수시 수위 상승에 따라 주수로부로부터 범람하게 되는 홍수터로 구성된다. 홍수터는 홍수류의 일시적인 저장이나 하류로 흐름을 전달하는 복합수로의 부분으로 사용되어진다. 자연수로에서 이와 같은 흐름구조는 불규칙한

* 경북대학교 토목공학과 교수

** 국립방재연구소 연구원

*** 국립방재연구소 방재연구관(공학박사)

**** 경북대학교 토목공학과 박사과정 수료

단면형상, 조도계수 등에 의해서 더욱 복잡하게 나타난다. 하천은 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 홍수시 수위 상승과 함께 범람되어 젖은 하도가 되었다가 수위가 하강함에 따라 마른 하도 상태가 되는 과정을 반복하게 된다. 또한, 그림 1(b)에서와 같이 하도구간내에 섬이 존재할 경우 수위 상승과 하강에 따라 섬의 출현 및 소멸할 수 있는데, 이것에 대한 모의기법으로는 이동경계를 도입하거나 wet/dry 처리를 통해서만 가능하다.

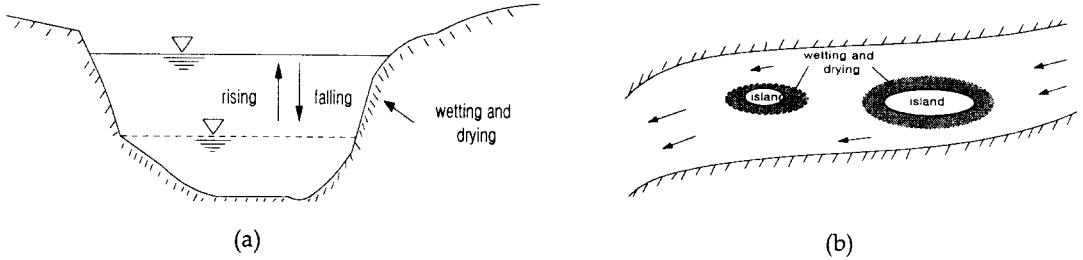


그림 1. 하천에서 젖은하도와 마른하도의 예
(a) 홍수터 흐름 (b) 섬의 존재

3. 범람홍수의 2차원 모형

3.1 기본방정식

본 모형의 기본 방정식은 식 (1)~(3)과 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) + \frac{g}{C^2} |V| + uq_s - \Omega v h \right) \\ & - h \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - W_x = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_0}{\partial y} \right) + \frac{g}{C^2} |V| + vq_s + \Omega u h \right) \\ & - h \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - W_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 Wetting과 drying의 처리

Wet/dry 처리 과정은 홍수터 흐름 문제를 위해서 요구되어지는 지형적 이산화에 따른 복잡성에 대처하기 위해서 제안되었다.

3.2.1 요소제거기법

요소제거기법은 요소의 수심이 마른 상태가 되었을 경우에 수치계산에서 동요를 일으키는데 이 경우 해당요소를 제거하여 새로운 지형조건을 경계를 가지게 하여 실행이 가능하도록 하는 기법이다. 이 기법은 격자가 감소함으로 인해 방정식의 수가 줄어들게 되어 좀 더 빠르게 모의수행할 수 있고 wet/dry 현상을 좀 더 실제적으로 표현할 수 있다. 그러나 넓은 지역에서 시간 간격 동안 wet/dry가 발생한다면 모형에 수치적 문제를 야기할 수 있다. 또한 요소의 제거로 인한 불규칙한 경계의 형성으로 인해 수치동요가 야기되고, 요소에 포함된 유량이 더해지거나 감해짐으로 질량의 불연속성이 나타날 수도 있다.

3.2.2 MP 기법

MP(Marsh Porosity)기법은 조석이 발생하는 지역이나 범람에 의한 경계를 계산하는데 있어 유용하게 적용될 수 있다. 특히 홍수터가 범람에 의해 수위가 점차로 증가하다가 다시 주수로로 물이 빠져나가는 현상에 대해 적용하기에 유용하다. 즉, 한 요소에 대해 네개의 절점이 있을 경우 종전의 기법은 하나의 절점만 마른상태가 되면 요소가 제거되었지만 이 기법은 모든 절점이 어떤 최소값 아래로 떨어질 때만 제거된다. 즉 하나의 절점이라도 젖은 상태라면 나머지 절점들도 계산에 참여하게된다.

4. 수치해석 모형의 적용

4.1 사다리꼴 단면 수로의 경우

본 수치모의는 사다리꼴 하도내에 홍수수문곡선이 유입되었을때 하도내의 wet/dry 과정을 검토하기 위해 실시되었다. 하도단면형은 저면폭 50 m, 측벽면경사 1 : 2인 사다리꼴 단면으로 고려하였고 하도의 길이는 4 km, 하도경사는 0.0001, 조도계수는 0.025로 지정하였다.

상류단에서는 침투유량 $2000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 유량수문곡선이 유입되었고 하류단에서는 양해형 수위-유량관계가 부여되었으며 계산시간 간격은 0.5시간으로서 총 계산시간은 15시간이었다. 그림 2, 3은 각각 0.5초, 4.5초 후의 하도 구간에서의 유속분포도를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 홍수터유역의 시간에 따른 흐름의 변화현상이 하나의 유한요소망에서 wet/dry 조건에 홍수류의 거동을 합리적으로 모의하고 있었다.

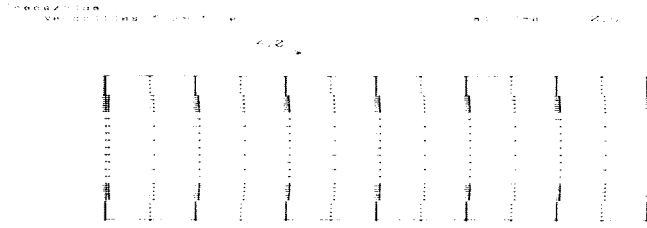


그림 2. 하도 구간에서의 유속분포도($t=0.5$ 초)

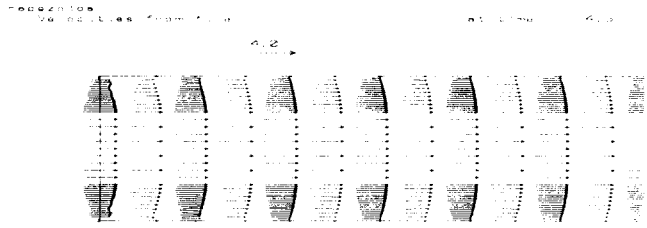


그림 3. 하도 구간에서의 유속분포도($t=4.5$ 초)

4.2 사행하천의 경우

사행하천의 구간은 7 km, 하상경사는 0.0002로 고려하였다. 모의실험을 실시하기 위하여 선택한 수로와 홍수터의 제원들은 하천 개수가 완료된 주요하천단면의 전형적인 형상을 고려하여 사행도 L_r 은 1.0, 1.1, 1.2, 주수로 조도계수 n_c 는 0.030, 홍수터 조도계수 n_f 는 0.050, 주수로 하폭 B_c 는 70 m, 전체 하도폭 B_f 는 500 m, 주수로 깊이 Y_b 는 6 m로 설정하였으며, 하천으로부터 제방으로의 홍수터의 경사는 0.0016이고 측방 유입은 고려하지 않았다.

사행효과에 대한 전체 구간에 있어서의 2차원적 흐름 양상을 그림 4에 도시하였다. 유입유량은 초기 유량 $350 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에서 첨두유량 $7000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 까지 변하는 수문곡선에 의한 흐름 양상으로 시간 간격은 0.5시간이며 홍수기간은 21시간이었다. 그림에서는 8시간에 대한 모의결과를 나타내고 있다. 하도구간에서의 사행에 따른 영향은 사행도가 클수록 홍수전파가 지체됨에 따라 홍수위의 증가를 일으키는 것으로 나타나 홍수파의 물리적인 특성을 효과적으로 반영하고 있었다.

4.3 홍수터의 조도변화에 따른 흐름 분석

사행하천구간에서 홍수터 조도변화에 따른 홍수위의 변동양상을 검토하였다. 주수로의 조도계수는 0.030으로 고정된 상태에서 홍수터의 조도계수를 각각 0.030, 0.050 및 0.100인 상황하에서 모의수행을 실시하였다.

사행도 1.1의 하도에서 1625 m 지점과 5375 m 지점에서 주수로와 홍수터에서 조도계수의 변화에 따른 각각의 유속과 수위의 변화를 검토하였다. 여기서 홍수터는 흐름 방향에 따른 좌측홍수

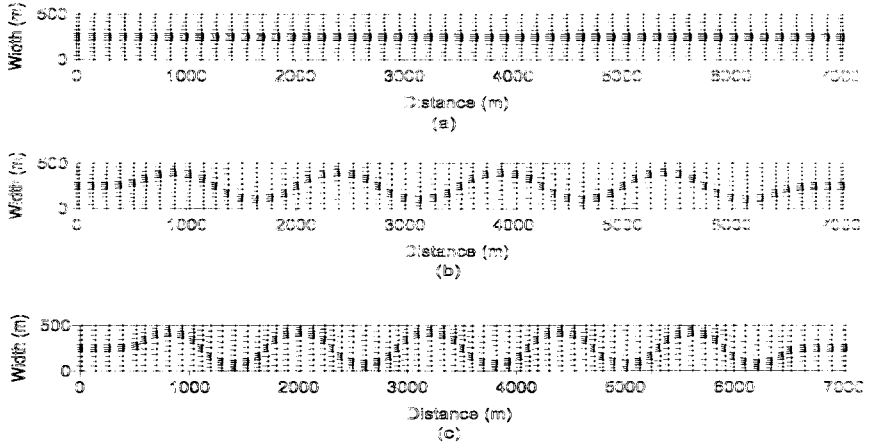


그림 4. 사행도에 따른 유속 분포도
(a) 사행도; 1.0, (b) 1.1, (c) 1.2

터와 우측 홍수터로 구분하였다. 그림 5는 사행도의 영향을 고려한 하도내에서 하도길이가 1625m와 5375m에서의 각각의 조도계수에 따른 유속결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 홍수터 조도가 유속에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다. 즉, 조도계수 값의 증가에 따른 홍수터에서의 유속 저하현상이 현저하게 나타났다. 그림 6는 하도내의 주요지점별 수위의 변화양상을 도시한 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 조도가 증가됨에 따라 홍수터의 수위가 크게 증가하는 것으로 나타나 이는 실제 물리적인 특성이 효과적으로 반영하고 있는 것으로 사료되었다.

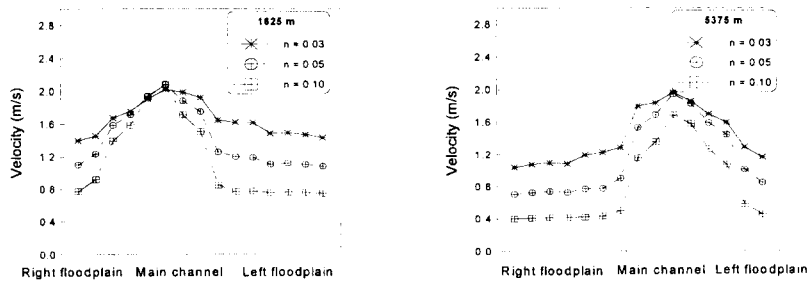


그림 5. 주수로와 홍수터에서의 유속변동 양상

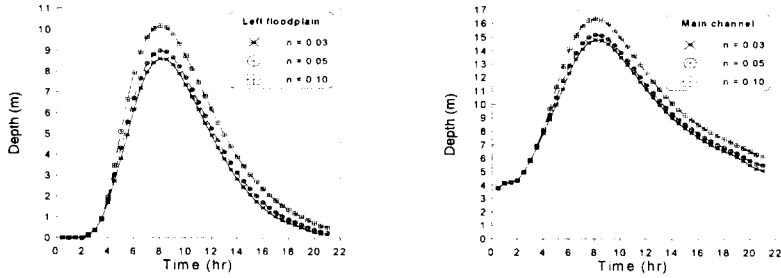


그림 6. 주수로와 홍수터에서의 수심변화 양상

5. 결론

본 연구는 하천에서의 범람홍수에 대한 2차원 유한요소모형을 적용한 것으로서 그 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 사행하천의 홍수터 범람을 하나의 유한요소망에서 모의하기 위해서 wet/dry기법을 이용하였는데 이를 위해서 요소제거기법과 MP(Marsh Porosity)기법이 적용되었다.

(2) 수치해석 모형의 검증을 위해서 사다리꼴 하도 구간에서의 홍수전과양상을 모의하였는데 이 경우의 해석결과는 wet/dry를 합리적으로 처리하였다.

(3) 넓은 홍수터를 가진 사행 하도구간에 대한 적용에 있어서 사행도를 1.0~1.2까지 증가시켜 해석한 결과 홍수터 범람에 따른 흐름의 경로 단축현상이 이차원적으로 모의될 수 있었다.

(4) 단일 유한요소망에서 다양한 wet/dry 조건을 효과적으로 계산할 수 있는바, 제내지에서의 홍수범람을 보다 정교하게 처리할 수 있도록 마른 하도구간에 대한 전과, 이동경계조건 등이 도입된다면 실제적인 2차원 범람모의에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

6. 참고문헌

- King, I.P., and Roig, L.C. (1998). "Two dimensional finite element models for floodplains and tidal flats." *Computational Methods in Flow Analysis*, Proceedings of the International Conference on Computational Methods in Flow Analysis, Okayama, Japan, pp. 711-718.
- King, I.P. (1986). "An inundation algorithm for finite element hydrodynamic and sediment transport modeling." *Third International Symposium on River Sedimentation*, The Univ. of Mississippi, March 31-April 4, pp. 1583-1593.
- Rajaratnam, N., and Ahmadi, R. (1981). "Hydraulics of channels with floodplains." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 19, pp. 43-60.
- Toobes, G.H., and Sooky, A.A. (1967). "Hydraulics of meandering rivers with floodplains." *J. of the Waterways and Harbours Division, ASCE*, Vol. 93, pp. 213-236.