

1차원 수치모형을 이용한 댐 여수로 설계

Design of Dam Spillway with One Dimensional Numerical Model

김 원*, 한건연**
Won Kim, Kun-Yeun Han

요 지

본 연구에서는 1차원 수치모형을 이용하여 댐 여수로에서 발생하는 흐름을 해석하였다. 본 연구에서 사용한 1차원 수치모형은 매우 복잡한 지형에 적용이 가능하며, 상류가 상류가 동시에 발생하거나 도수가 발생하는 흐름도 해석할 수 있는 모형이다. 이 모형은 해석해가 가지는 도수의 경우에 적용하여 검증된 바 있으며, 자연하천의 모에서 발생하는 불연속 흐름에 대해서도 적용된 바 있다. 또한 매우 불규칙한 자연하천에서 발생하는 흐름도 효과적으로 모의할 수 있다.

본 연구에서는 댐 여수로 흐름 해석을 평가하기 위해 단순화된 하도에서 발생하는 불연속 흐름에 대해 이론적인 해와 비교하였다. 또한 댐 수리모형 결과에 수치모형을 적용하여 빈도별로 발생하는 흐름을 해석하였다. 해석결과 여수로에서 발생하는 매우 작은 수심을 정확하게 모의하였으며, 여수로 직하류부에서 발생하는 도수의 발생위치, 발생 전후의 수위도 잘 모의하는 것으로 나타났다. 또한 여수로 및 도수 전후에 발생하는 유속도 정확하게 모의하는 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 1차원 수치모형을 여수로 뿐만아니라 댐 상류 하천, 저수부, 여수로 접근수로, 여수로, 도수, 하류하천 등으로 구성되는 전 구간의 흐름을 동시에 모의하기 적용하였다. 적용 결과 댐 저수지 상류 하천과 저수지, 저수지와 접근수로, 접근 수로와 여수로, 여수로와 도수, 도수 발생 후와 하류하천 등에서 복잡하게 형성되는 흐름을 동시에 잘 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용한 1차원 수치모형을 이용하면 댐 여수로나 저수지, 연계되어 있는 상하류 하천에서의 흐름을 동시에 해석할 수 있기 때문에 향후 수리모형실험과 연계하여 댐 설계에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

핵심용어 : 1차원 수치모형, 댐 여수로, 설계, 불연속 흐름

1. 서론

댐 여수로의 설계는 대부분 이론적인 설계를 바탕으로 기본 안을 작성한 후 수리모형실험을 통해 설계의 적정성을 분석하는 것으로 이루어진다. 여수로의 적정성 검토를 위해 수행되는 수리모형실험은 댐 모형을 만들고 축적에 의한 흐름을 발생시켜 이상흐름 발생여부, 도수 발생의 타당성 등 여러 가지 분석을 할 수 있는 장점이 있다. 반면 수리모형실험을 위해서는 많은 비용이 소요된다. 요구되는 축적에 의해 댐 모형을 제작해야 하기 때문에 상당한 비용이 소요되며, 제작을 위한 시간도 많이 소요된다. 또한 모형 제작의 한계로 인해 다양한 설계 조건에 대한 비교검토를 수행하는 것이 곤란하여 1-2개의 대안에 대한 검토가 이루어지는 것이 일반적이다.

댐 여수로 설계를 모형실험에 의존하는 큰 이유중의 하나가 흐름의 복잡성이다. 댐 여수로에서는 대략 10m/sec이상의 매우 빠른 흐름이 형성되고, 여수로 직하류부에서는 빠른 유속을 감쇄시키기 위한 시설에 의해 도수가 발생하기 때문에 여수로 주위의 흐름은 매우 복잡한 양상을 나타내게 된다. 지금까지 도수가 발생하는 지점, 도수의 크기, 도수 발생 전후의 흐름변화 등을 종합적으로 분석할 수 있는 대안이 거의 없었기

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : wonkim@kict.re.kr

** 정회원 · 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr

때문에 주로 수리모형실험에 의존해 왔다고 할 수 있다.

본 연구에서는 최근에 개발된 SNS(Super- and Sub- critical flow) 모형을 이용하여 댐 여수로에서 발생하는 흐름을 해석하였다.

2. SNS 모형의 기본 이론

1차원 하천흐름의 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} -q \\ -gI_2 - gA(S_o - S_f) \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 A = 단면적, Q = 유량, g = 중력가속도이며, I₁은 단면에 작용하는 정수압력을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$I_1 = \int_0^{h(x,t)} \{h(x,t) - \eta\} \beta(x, \eta) d\eta \quad (3)$$

여기서 h는 수심이며, β는 수심 η에서의 수면폭으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta(x, \eta) = \frac{\partial A(x, \eta)}{\partial \eta} \quad (4)$$

식 (2)에서 q는 지류 횡유입량을 나타내며, I₂는 하도 단면의 축소 또는 확대에 의해 발생하는 힘을 나타내는 것으로 다음 식으로 정의된다.

$$I_2 = \int_0^{h(x,t)} \{h(x,t) - \eta\} \frac{\partial \beta(x, \eta)}{\partial x} d\eta \quad (5)$$

또한 S_o는 하상바닥경사이며 S_f는 마찰경사로서 Manning 식에 의해서 정의될 수 있다.

본 연구에서는 상류이송기법과 생성형 처리기법을 이용하여 다음과 같이 차분방정식을 구성하였다(김원과 한건연, 2000; 김원 등, 2005).

$$\left[\mathbf{I} + \Delta t \alpha \left(\frac{\partial \mathbf{J}^{+n}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{J}^{-n}}{\partial x} + \mathbf{G}^n \right) \right] \Delta \mathbf{U}^{n+1} = -\Delta t \left\{ \left(\hat{\mathbf{J}}^+ + \hat{\mathbf{J}}^- \right) \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \left(\hat{\mathbf{J}}^+ + \hat{\mathbf{J}}^- \right) \mathbf{S} \right\}^n \quad (6)$$

3. SNS 모형을 이용한 댐 여수로 흐름 모의

본 연구에서는 SNS 모형을 이용하여 댐 여수로 흐름을 모의하였다. 댐 여수로 흐름의 모의를 위해서 여수로 뿐만 아니라 저수지 상류 하천을 상류 경계로 결정하였고, 하류 경계는 댐지점 하류 하천을 하류경계로 결정하였다. SNS 모형은 특별한 내외부 경계조건없이 하천, 저수지, 여수로, 도수, 하천으로 연결되는 모든 흐름을 동시에 모의할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 SNS 모형을 댐 여수로 수리모형실험에 적용하여 결과를 비교하였다. 수리모형실험은 저수지 일부, 여수로 유입부, 여수로, 도류부, 하천하천 부분으로 구성되어 있으며, PMF와 200빈도 홍수량에 대한 실험결과를 수치모의 결과와 비교하였다. 수치모의를 위해 주어진 지형조건을 이용하였고, 수리모형실험과 동일한 조도계수를 사용하였다. 상류와 하류 경계단에서 유량과 수위를 각각 경계조건으로 사용하였으며, 초기조건으로 임의의 수위와 유량을 각 지점에 부여한 후 계산시간을 0.1초로 하여 수렴될 때까지 모형을 실행하였다.

그림 1은 여수로 부분에 PMF에 대한 실측 수위를 모의 수위와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 여수로 유입부에서 두 값이 미미한 차이를 보이나 여수로 부분에서는 두 값이 잘 일치하고 있다. 또한 수치모형에서 계산된 도수 발생지점이 실제 발생지점과 정확하게 일치하고 있으며, 도수 발생 후의 수위도 잘 일치하고 있다. 도수 발생 직후 부분에서는 두 값이 서로 차이를 보이는데, 수치모형에 의한 수위는 급작스럽게 상승하는 반면, 실험 결과는 서서히 상승하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 차이는 도수 발생 지점에서는 흐름의 교란 및 변화가 매우 심하여 정확한 수위를 측정하는 것이 어려운 원인도 있으나 수치모형에서는 큰

도수 직후의 수심을 완벽하게 재현하는 데에는 어느 정도 한계가 있는 것으로 볼 수 있다. 그림 2는 200년 빈도 홍수에 대한 여수로 수위의 계산값과 실측값을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PMF와 비교하여 상대적으로 도수의 크기가 작는데, 이 경우에는 계산값과 실측값이 모두 잘 일치하고 있다. 이와 같이 SNS 모형에 의해 계산된 여수로 수위는 실측치와 잘 일치하고 있으며, 특히 도수 발생 지점이나 도수 발생 후의 수위도 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

그림 3과 그림 4는 여수로 부분에서 발생하는 수위와 유속을 나타낸 것이다. PMF 시에는 유속이 약 30m/sec로 나타나고, 200년 빈도시에는 약 16m/sec로 나타나 매우 빠른 흐름이 형성되는 것을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6은 상류 하천에서 저수지, 여수로, 도수 발생지점, 하류 하천까지 전체 구간의 계산 결과를 보여주는 것이다. SNS 모형에서는 이와 같이 전체 구간의 흐름을 동시에 별도의 내부경계조건없이 계산할 수 있다.

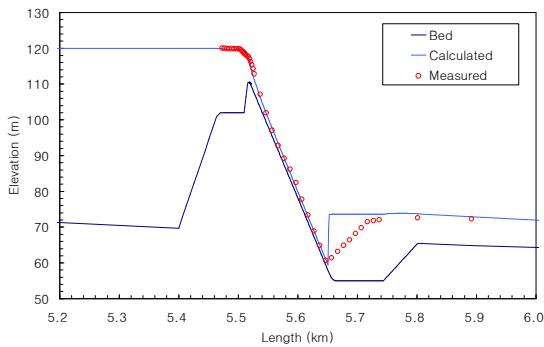


그림 1 PMF에 대한 여수로 흐름 모의와 실측

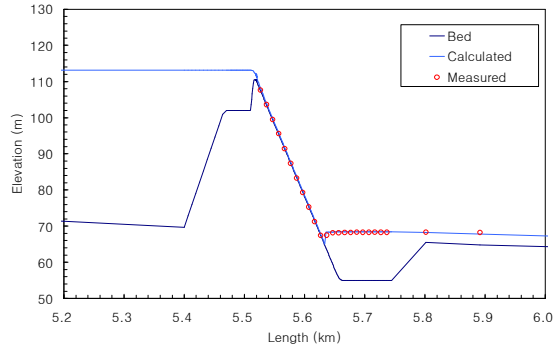


그림 2 200년 빈도에 대한 여수로 흐름 모의와 실측

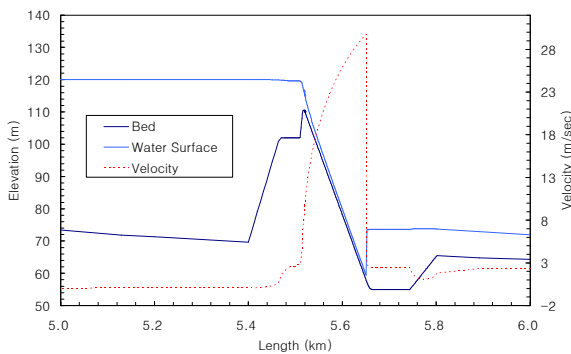


그림 3 PMF에 대한 여수로 수위와 유속 모의

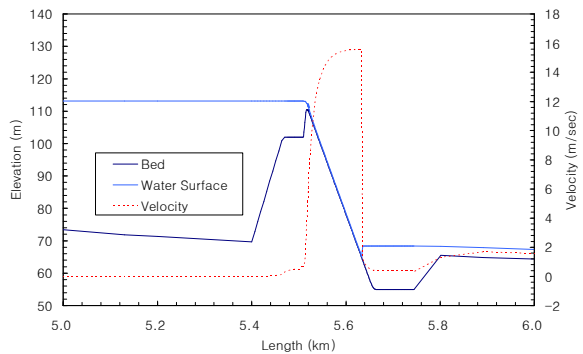


그림 4 200년 빈도에 대한 여수로 수위와 유속 모의

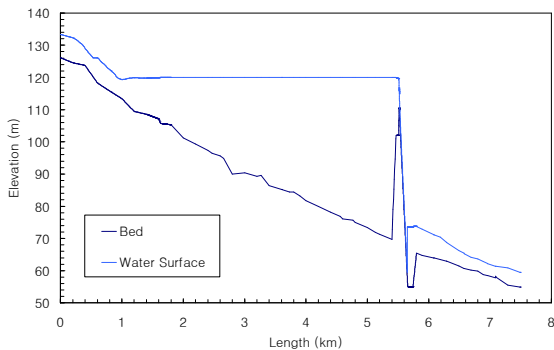


그림 5 PMF에 대한 전체 구간 모의 결과

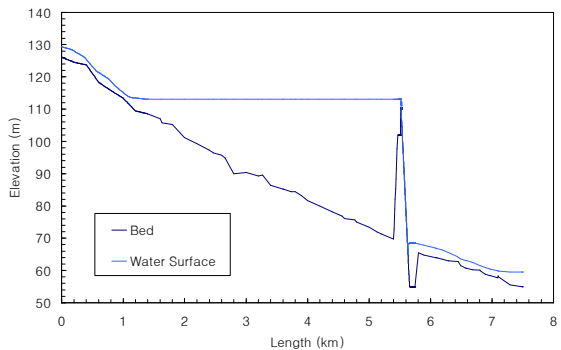


그림 6 200년 빈도에 대한 전체 구간 모의 결과

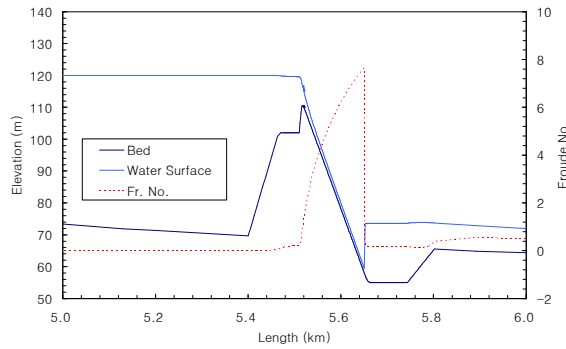


그림 7 PMF에 대한 여수로 주위 Froude 수

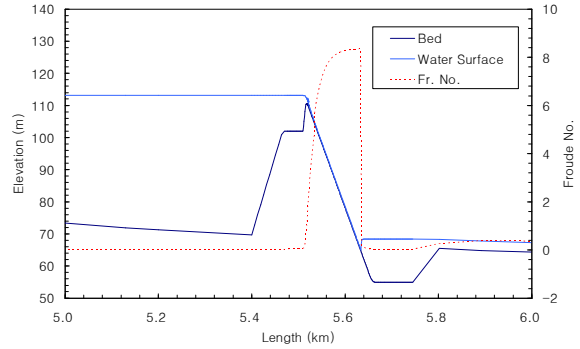


그림 8 200년 빈도에 대한 여수로 주위 Froude 수

4. 결론

본 연구에서는 최근에 새로이 개발된 SNS 모형을 이용하여 댐 여수로에서 발생하는 흐름을 모의하였다. 댐 여수로에서는 매우 빠른 흐름이 형성되고, 도수 전후로 불연속 흐름이 형성되면서 매우 불안정한 특성이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 흐름을 SNS 모형으로 모의해서 수리모형실험 결과와 비교하였는데, SNS 모형에서 계산된 수위가 수리모형실험의 실측수위를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 특히 도수가 발생하는 흐름 부근도 SNS 모형이 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 또한 댐 상류 하천에서 하류 하천까지 댐체를 포함하여 전체 구간을 흐름을 동시에 모의할 수 있기 때문에 상하류의 상황을 반영하여 댐 주위의 흐름을 효과적으로 해석할 수 있는 것으로 나타났다.

SNS 모형을 사용하면 댐 여수로 및 주위에서 발생하는 흐름을 잘 모의할 수 있기 때문에 댐 여수로 설계나 해석시 이 모형이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김원, 한건연 (2000). “고정확도 수치기법을 이용한 하천 천이류 해석 I. : 모형개발.” 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제1호, pp. 45-55.
2. 김원, 한건연, 우효섭, 최규현 (2005). “상류이송기법에서의 새로운 생성항 처리 기법.” 한국수자원학회 논문집, 제38권, 제2호, pp. 155-66.