

하천범람위험도 평가를 위한 추계학적 부정류 해석

김종해* · 한건연** · 최혁준*** · 김지성***

1. 서론

최근에 들어 지구온난화에 따른 이상기후 및 집중호우 빈발, 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화, 인명·재산 등의 홍수피해규모의 증대에 따라 설계빈도의 무조건적인 상향조정 에 따른 확정론적인 방법에 의존하기보다는 추계학적 방법을 도입한 수문량 확충, 매개변수에 포함된 불확실성 해석이 필요하게 되었다. 따라서, 하천시설물의 설계와 평가과정에는 불확실성이 포함되기 때문에 이에 따른 위험도의 산정이 반드시 고려되어야 하고 이를 기초로 신뢰도 분석개 념을 도입한 하천시설물 설계가 필요하게 되었다. 미 육군 공병단의 경우 1920년 대 이래로 홍수 피해 경감 과제를 수행함에 있어 불확실성을 고려한 위험도를 평가하기 위하여 신뢰도 분석의 개 념을 도입하고자 하였으며, 활발한 연구가 시작된 계기는 1990년대 초 하천제방의 여유고 개념이 지역에 따른 지리 및 수문학적인 차이를 설명할 수 없다는 의문을 갖기 시작하면서 그 시발점이 되었다. 본 연구에서는 Saint-Venant 방정식의 매개변수인 단면 형상, Manning의 조도계수와 상하 류부 경계조건 불확실성에 대한 추계학적 특성을 조사함으로써 하천 부정류 해석에 불확실성을 포함하고자 하였고, 홍수 기간동안 수위가 제방을 월류할 확률을 예측하고자 하였다. 또한 하도의 홍수위와 제내지의 범람수위를 연계하여 제내지에서의 홍수범람 특성에 대한 분석을 실시하였다.

2. 하천흐름 해석에서의 불확실성

하천흐름 해석의 정확도에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중 하나는 하천의 지형적 자료에 대한 불확실성과 이와 관련된 복잡한 수리현상에 기인한 수위-유량관계 곡선에서의 불확실성이다. 특히 수리학적 홍수해석 모형의 경우 하천의 단면자료와 수리학적 흐름에 대한 매개변수들의 불 확실성이 홍수위 계산결과에 대한 오차의 중요한 원인이 된다. 본 연구에서는 측량을 통한 실제 단면인 HEC-2형 단면을 사용하였고, 각 단면의 좌표와 Manning의 조도계수, 경계조건을 변동성 을 가지는 매개변수로 가정하여 Monte Carlo 기법을 도입한 하천 부정류 해석을 모의하였다.

* 한국수자원공사 댐건설처 부장

** 경북대학교 토목공학과 교수

*** 경북대학교 토목공학과 박사과정, 석사과정

또한 홍수시 제방 월류의 불확실성을 해석하기 위하여 주요 매개변수인 유량계수와 월류폭 또한 변동성을 가지는 매개변수로 가정하여 Monte Carlo 해석을 실시하였다.

Monte Carlo 모의의 근본 원리는 추계학적 입력 매개변수의 가능한 값을 각 확률분포에 따라 반복적으로 생성하여 관련된 지배 방정식을 해석하는 것이다. 모형의 결과는 예측된 종속 변수들의 평균, 분산, 확률밀도함수 등과 같은 통계적 특성치들을 결정하기 위해 분석하는 것이다. 하천의 부정류 해석에 있어서 불확실성의 주요 원인은 모형의 지배방정식과 모형의 매개변수에 달려 있다. 그러나 Saint-Venant 모형은 무수히 많은 모형의 적용을 통해 믿을만한 모의 모형으로서 분석가들에게 신뢰를 주었다. 따라서 이번 연구에 Saint-Venant 모형이 적용되었고, 불확실성의 정도는 각 매개변수들의 불확실성 정도와 관련되어 있다.

3. 하천제방의 안정성 평가

하천에서의 1차원 부정류 해석은 Saint-Venant식으로 구성된다. 이 식에서 하도단면 및 조도계수에 대한 불확실성을 고려하면 식 (1), (2)와 같은 연속방정식과 운동량 방정식이 구성된다.

$$\frac{\partial h(x, t; \omega)}{\partial t} + \left[\frac{A(x, t; \omega)}{T_w(x, t; \omega)} \right] \frac{\partial \bar{u}(x, t; \omega)}{\partial x} + \bar{u}(x, t; \omega) \frac{\partial h(x, t; \omega)}{\partial x} - \frac{q_s(x, t; \omega)}{T_w(x, t; \omega)} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}(x, t; \omega)}{\partial t} + \bar{u}(x, t; \omega) \frac{\partial (\beta \bar{u}(x, t; \omega))}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g S_o(x, t; \omega) + g S_f(x, t; \omega) \\ - \frac{q_s(x, t; \omega) \bar{u}(x, t; \omega)}{A(x, t; \omega)} + \frac{q_s(x, t; \omega) u_s(x, t; \omega)}{A(x, t; \omega)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$S_f(x, t; \omega) = \frac{\bar{u}^2(x, t; \omega) n^2(x, t; \omega)}{R^{4/3}(x, t; \omega)}, \quad T_w(x, t; \omega) = T_w[I(x, t; \omega), h(x, t; \omega)],$$

$$A(x, t; \omega) = A[I(x, t; \omega), h(x, t; \omega)] \text{ 이고 } R(x, t; \omega) = R[I(x, t; \omega), h(x, t; \omega)] \text{ 이다.}$$

부정류 해석에 있어 하천 구역의 하도단면의 형상을 결정하기 위해 필요한 자료정보는 통상 지형자료로부터 얻게 된다. 하도단면의 불확실성에 관한 오차의 주요 원인은 실제 관측에 의한 오차, 지형도 상의 등고선 간격간의 선형변화를 가정한 오차, 등고선 간격간의 거리가 측정될 때 도입되는 수작업에 의한 오차 등이다. Manning의 조도계수는 하천에 있어 흐름에 대한 수로내의 저항력을 포괄적으로 표시하고 있으나 직접적인 관측은 불가능하다. 통상적인 강우-유출에 의한 홍수의 경우에 있어서 Manning의 조도계수는 주로 실제 관측에 의해서 평가되며 과거의 홍수기록으로부터 관측된 홍수위를 사용함으로써 검정하게 된다. 그림 1은 부정류 해석시 고려되어야 하는 하도단면의 불확실성의 개념도를 나타내고 있다.

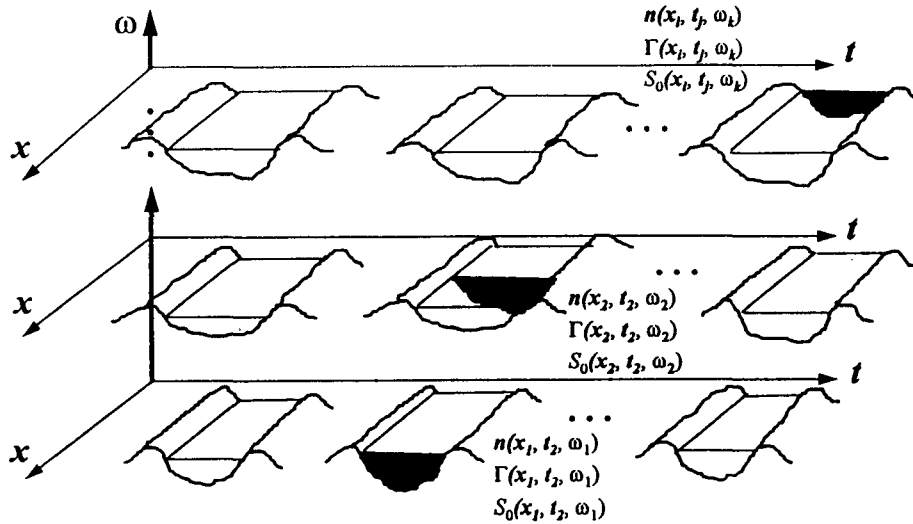


그림 1. 부정류 해석을 위한 불확실성의 개념

4. 제내지에 대한 홍수피해 평가

제방월류에 의한 월류홍수량 계산은 상류로부터 단계적으로 수행하는데 각 하천단면에서 계산 홍수위와 해당 단면 제방고를 비교하여 계산 홍수위가 높은 경우에 제방월류가 발생하게 된다. 제방월류 가능지점을 통한 월류량과 이로 인한 제내지에서의 범람홍수특성을 분석하기 위해 제내지의 형상을 표고와 이에 해당하는 수표면적으로 지형자료를 구성하였다.

붕괴부에서의 유입수문곡선과 제내지의 침수저류량에 영향을 미치는 인자들로서는 붕괴부의 폭, 붕괴시간, 제내지 수위와 하천 수위 등을 들 수 있다. 붕괴부의 폭은 식 (3), (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$B_b = 2.0 (\log_{10} B)^{3.8} + 77 \quad : \text{하천 합류점의 경우} \quad (3)$$

$$B_b = 1.6 (\log_{10} B)^{3.8} + 62 \quad : \text{하천 합류점 이외의 경우} \quad (4)$$

여기서, B_b = 붕괴제방폭 (m)이고 B = 하천폭 (m)이다.

본 연구에서는 붕괴부에 영향을 미치는 인자인 붕괴부의 폭과 유량계수에 대하여도 Monte Carlo 모의를 실시하였다.

5. 실제유역에 대한 적용

본 연구에서 도입된 식들의 적용성을 검증하기 위하여 낙동강 유역의 홍수로에 대해 적용하였다. 계산구간은 현풍~적포교의 33.55km 구간으로서 전체 단면의 개수는 67개이며 평균적인 계산 거리간격은 0.5km이다. 상류단에서는 침투유량 $16,755 \text{ m}^3/\text{sec}$ 인 유량수문곡선이 유입되었고 하류단에서는 단일 수위-유량 관계곡선이 부여되었으며, 계산시간 간격은 1시간으로 총 계산시간은 84 시간이었다.

그림 2는 구간별 홍수위 계산결과로서 수면곡선의 변화폭과 제방의 월류위험도를 나타내고 있다. 285와 283 단면은 100%의 제방 월류위험도를 나타내고 있어 이 지점에서 많은 양의 제방월류가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

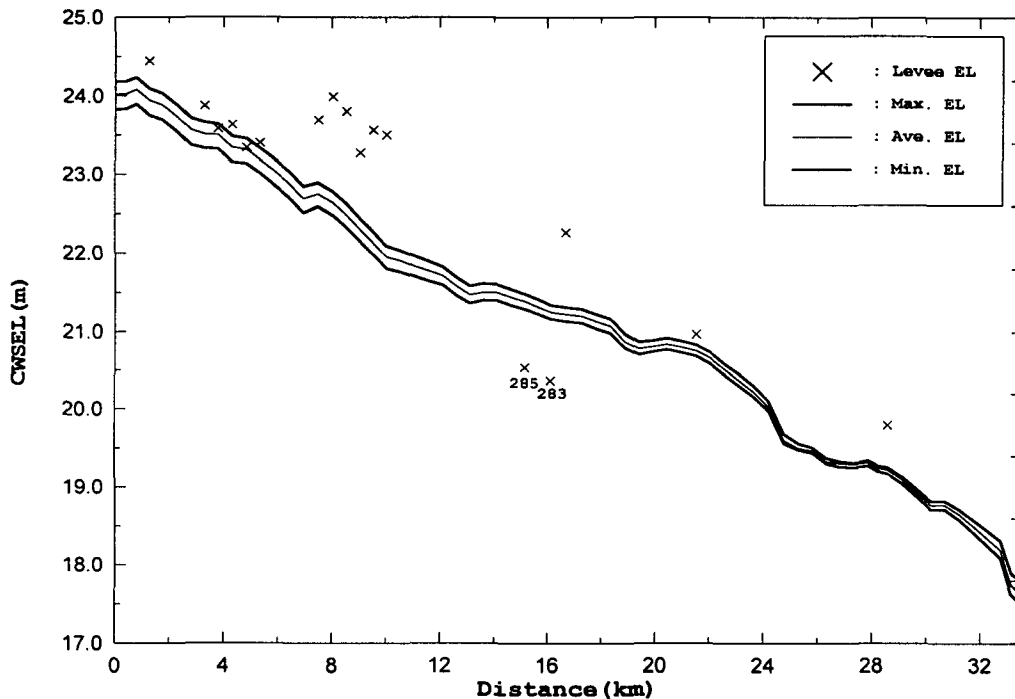


그림 2. 수면곡선의 변화폭과 제방의 월류위험도

그림 3과 4는 285와 283 단면에서의 하도 홍수위와 제방 월류에 의한 제내지에서의 침수위를 최대 및 최소값의 범위로 나타낸 것이다.

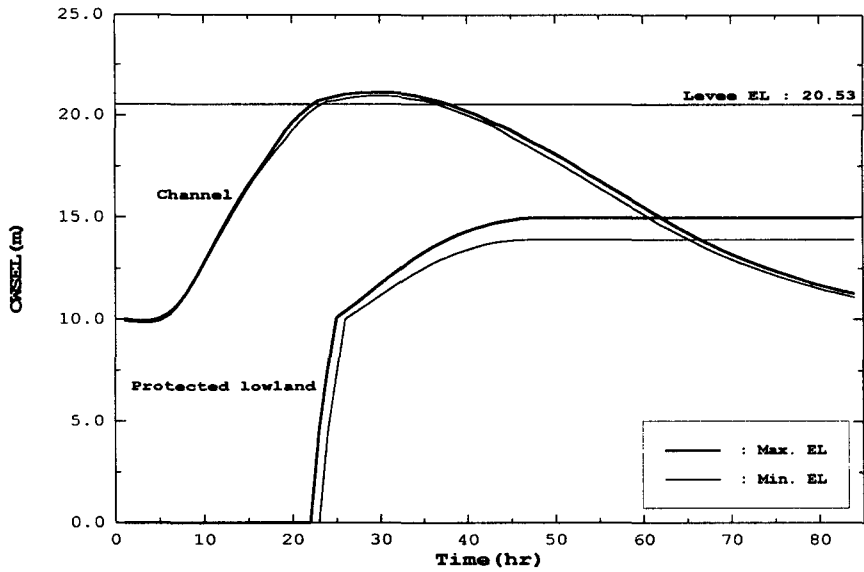


그림 3. 하도와 제내지에서의 수위(No. 285)

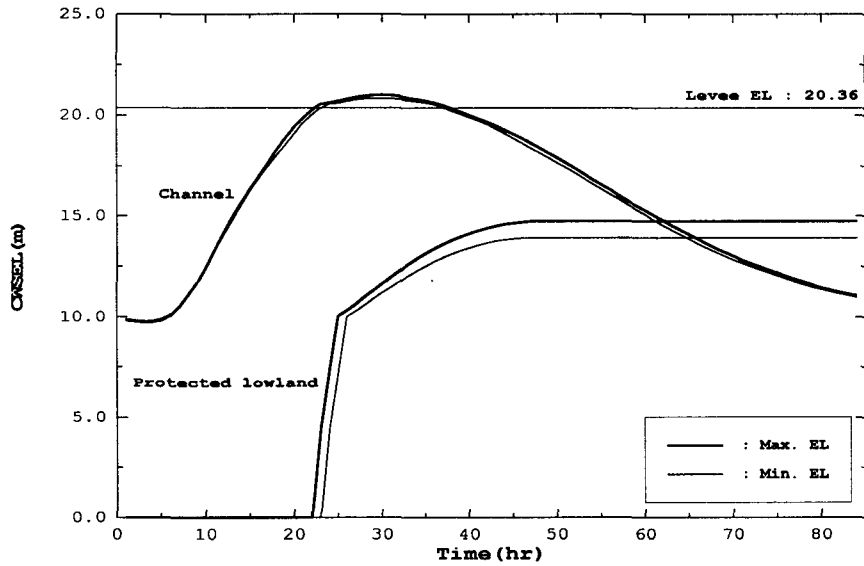


그림 4. 하도와 제내지에서의 수위(No. 283)

하천단면의 형상과 조도계수 및 제방 붕괴부의 폭과 월류유량계수를 변동성을 가지는 매개변수로 취하여 계산수위의 변동영향을 분석하였는데, 하천단면의 불확실성이 다른 매개변수의 불확실성보다 수위 계산에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 하천범람위험도 평가를 위하여 Saint-Venant 방정식에 Monte Carlo 기법을 도입하여 추계학적 부정류 해석을 실시한 것으로서 연구결과는 다음과 같다.

Saint-Venant 방정식의 매개변수인 하도단면, Manning의 조도계수와 경계조건의 불확실성에 대한 추계학적 특성을 조사함으로써 하천 부정류 해석에 불확실성을 포함하였다. 하도단면에 있어서 불확실성을 고려하기 위해서 하도에 대한 종횡단 측량자료인 HEC-2형 단면을 사용하였다.

불확실성을 고려한 추계학적 홍수위 계산결과를 이용하여 실제 제방고와 비교함으로써 제방월류 위험도를 산정하였다. 또한 하도의 홍수위와 제내지에서의 범람수위를 연계하여 침수현상이 발생한 제내지에서의 침수위와 침수면적 및 범람홍수량 등을 산정하였다. 제내지의 침수위가 상승할 경우 하도에서의 홍수위와 제내지에서의 침수위를 비교하여 홍수량의 교환현상을 분석하였다.

본 모형을 현풍~적포교 구간에 적용하여 실제 제방고와 비교한 결과 기존의 확정론적 모형의 계산결과로는 안전한 것으로 판단되는 여러 단면지점의 제방에서 월류의 위험이 있었으며, 월류 위험이 가장 높은 두 지점을 선정하여 제방 붕괴에 의한 하도의 홍수위와 제내지의 침수위를 계산하여 최대 및 최소값의 범위로 제시함으로써 공학적인 결정을 강화할 수 있는 신뢰구간이 구축되어 변동성에 대한 보다 많은 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단되었다.

7. 참고문헌

- 건설교통부 (1992). 낙동강 하천정비기본계획 보고서.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 모형 및 이론" 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제6호, pp. 679-690.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예" 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제6호, pp. 691-698.
- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975). *Probability concepts in Engineering planning and design*. Vol. I, II, John Wiley and Sons, Inc.
- Askew, A.J., Yeh W.W-G., and Hall, W.A. (1971). "Use of Monte Carlo technique in the design and operation of a multipurpose reservoir system." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 819-833.
- Chow, V. T.(1978). "Risk and Reliability Analysis Applied to Water Resources in Practice." *Intern. Symp. on Risk and Reliability in Water Resources*, Univ. of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, June 26-28.
- Williams Jr., C. Arthur, and Richard M. Heins(1976). *Risk Management and Insurance*, McGraw Hill, 3rd Edition.