

하천 제방의 신뢰도 분석을 위한 HEC-2 모형의 Monte Carlo 모의

김종해* · ○한건연** · 박종석***

1. 서론

최근 이상기후의 영향으로 나타나는 홍수발생 빈도의 증가에 의한 인명 및 재산상에 피해가 커지고 있다. 이에 대처하기 위해서 홍수위험도의 경감, 홍수제어 구조물의 설계 등 다양한 홍수 방지시스템의 구축에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 특히 하천에서 수면곡선의 정확도는 상당히 중요한 의미를 갖는다. 홍수제어 구조물에서 수위는 구조물의 계획과 설계, 목표하는 바의 경제적인 타당성을 결정하는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 수면곡선 계산의 불확실도해석과 그에 따른 제방의 월류위험도산정을 위하여 Manning의 조도계수와 하도 각 단면의 좌표, 설계유량, 초기 수위를 임의변수로 가정하고 이 변수들의 불확실도가 하천홍수위 계산에 미치는 영향을 산정하였다. 이를 위해, 미 공병단에서 수면곡선의 계산을 위해 개발한 HEC-2 프로그램에 Monte Carlo 기법을 도입하였다.

2. 하천 제방의 신뢰도 분석을 위한 HEC-2 모형의 개발

2.1. 기본 방정식

수면곡선 계산프로그램인 HEC-2 모형은 자연하천이나 인공하천에서의 정상류상태의 점변류 수면곡선을 계산하기 위해서 개발되었다. 계산절차는 Manning 공식에 의해 산정된 마찰에너지 손실을 고려한 1차원 에너지방정식의 수치해를 기본으로 하며, 하천 각 단면에서 미지의 수위를 계산하기 위하여 정상상태의 일차원 점변류를 계산하는 방정식을 표준축차법에 의해서 반복적으로 계산하게 된다.

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

$$h_f = L \bar{S}_f \quad (2)$$

여기서, Z_1, Z_2 = 구간 양단에서의 수위, V_1, V_2 = 구간 양단에서의 평균유속,
 α_1, α_2 = 구간 양단에서 흐름의 유속계수, g = 중력가속도,
 h_f = 구간의 마찰손실수두, L = 구간거리, S_f = 구간의 마찰경사

* 한국수자원공사 댐건설처 부장

** 경북대학교 토목공학과 교수

*** 남원건설엔지니어링

그림 1은 단면 ①과 ②에서의 에너지 방정식을 나타내고 있다.

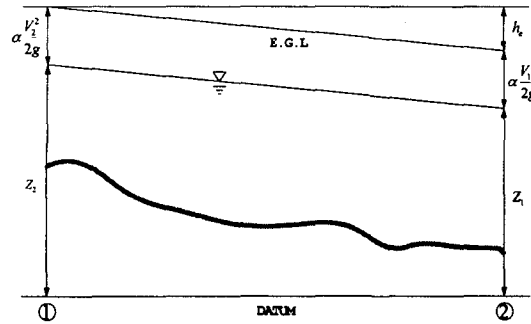


그림 1. 부동류계산의 기본방정식

2.2. 부동류 해석에 의한 하천제방의 신뢰도 분석

제방은 홍수를 소통시키기 위해 하도를 제한하는 시설물로서, 홍수소통능력을 상회하는 홍수량이 상류로부터 전달되어 유하하는 경우에는 제방의 정상부를 월류하게 된다. 홍수시의 월류에 의한 붕괴확률 P_F 는 식 (3)과 같다.

$$P_F = P[h_F > H_D - H_0] \quad (3)$$

여기서 h_F , H_D , H_0 는 각각 홍수의 유입에 의한 최대 상승수위, 제방제체의 높이, 저유량시의 하천수위를 나타내고 있다. 식 (3)을 실행함수 g_F 에 의하여 표시하면 식 (4)와 같으며, Monte Carlo 해석으로 기대되는 위험도는 식 (5), (6)과 같이 평가될 수 있다.

$$g_F = H_D - H_0 - h_F \quad (4)$$

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (5)$$

$$P_f = P[Z < 0] \quad (6)$$

여기서 Z 는 실행함수, x_m 은 관련변수, P_f 는 위험도를 나타낸다.

2.3 Monte Carlo 기법

Monte Carlo 기법은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합을 기초로 하여, 특정 확률분포에 따라 난수를 추출하여 실제 상황에 대한 충분히 많은 횟수의 반복수행으로 기대값과 불확실도를 산정하여 공학적 문제를 해결하는 방법이다. 이러한 처리과정을 반복함으로써 각 변수에 상응하는 값들에 대한 해의 변동성을 얻게 되며, 그 결과는 실제 관측치의 변동성과도 유사하기 때문에 Monte Carlo 모의수행의 결과는 통계학적으로 처리될 수 있고, 통계적 예측과 추론은 적절하다고 할 수 있다. 제방의 월류 위험도 산정을 위해서 Monte Carlo 기법에 의한 위험도 계산 방법은 다음과 같

이 요약될 수 있다.

- ① 각 매개변수에 대한 분포형을 결정하고 평균과 표준편차(또는 변동계수)를 산정한다.
- ② 각 분포형에 맞게 난수를 발생시킨다.
- ③ 정해진 실행함수의 각 매개변수 값들을 계산한다.
- ④ 반복계산 후 발생빈도 및 반복계산 수에 의하여 식 (7)을 이용하여 위험도를 구한다.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (7)$$

여기서, N_f 는 발생빈도수, N 는 반복계산수이다.

3. 실제유역에의 적용

표준축차법을 이용한 수면곡선 계산의 오차는 기법의 적용성에 의한 오차, 계산오차, 자료의 오차로 분류할 수 있다(McBean, 1984). 기법의 적용성은 전문 기술자에 의해 결정되며 많은 경험이 적절한 결정을 하는 데 도움이 된다. 계산오차는 절삭오차와 수치해석오차를 포함한다. 근래에 컴퓨터의 발전으로 인해 절삭오차는 대부분 무시할 수 있고, 수치해석오차는 수학적 해석기법을 사용하여 최소화 할 수 있다. 자료의 오차는 불완전하고 부정확한 자료의 수집과 부정확한 자료의 추정 등으로 인해 생기는 오차이며 본 연구에서 이 오차를 주로 고려하여 해석하였다.

본 모형을 낙동강 유역의 홍수로에 대해 적용하였다. 계산구간은 현풍~적포교의 33.55km구간으로서 전체 단면의 개수는 67개이며 평균적인 계산거리간격은 $\Delta x = 0.5km$ 이다.

3.1 모의대상 임의변수의 선정

① 설계유량과 초기수위의 불확실성

홍수위는 주로 특정 재현기간을 가진 설계유량에 의해 계산된다. 설계유량의 산정 시 댐의 붕괴나 산사태 등의 재해로 인한 경우가 배제된다. 그러므로 유량에 대한 입력자료에도 변동성을 고려하였다. 그리고 마찰경사 계산에 있어서 수직거리의 영향을 고려하기 위하여 초기수위값에 변동성을 부여하였다. 본 연구에서는 설계유량과 초기수위의 변동계수를 각각 5%, 1%로 결정하였다.

② 단면좌표의 불확실성

흐름단면적과 윤변의 변동성은 종방향 및 횡방향 좌표의 변동성 향으로써 나타낼 수 있다. 단면 자료의 불확실도는 측정이 얼마나 정밀하게 되었는가에 따라 결정된다. 국내하천측량기준에 나타나 있는 종단 및 횡단측량의 정확도 및 오차한계를 고려하였다. 단면좌표는 그 측량이 매년 이루어지지 않고 대략 10년 단위로 행해지므로, 시간이 흐름에 따른 침식과 퇴적에 의한 하상의 변화를 고려하여야 한다. 부등류 해석에 사용되는 지형자료가 실시간으로 측정된 값이 아닌 한, 침식과 퇴적에 의한 하상의 변화를 고려하여야 하며, 특히 사행하천 등의 경우에는 그 영향이 매우 클 것으로 판단된다.

단면좌표의 적절한 변동성을 결정하기 위하여 건설부(1993)의 낙동강 하천정비기본계획 보고서에 제시된 1993년에 측정된 최심하상고와 1983년에 측정된 것을 비교하였다. 그림 2에 최심하상고의 변화를 나타내었고, 그림 3에 임의의 횡단면의 변화를 나타내었다. 대상구간의 최심하상고의

차이를 계산한 결과 평균 1.2, 최대 5.2m의 변화가 있었다. 이 값은 사용되는 지형자료가 최신의 자료일수록 보다 적은 값으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 종·횡단측량의 허용오차를 계산한 결과 0.25m의 값을 얻었으며 최심하상고와 더한 값 1.45m를 대상구간의 하도단면의 평균높이 24.38m로 나눈 결과, 본 구간에 대해서는 6%의 변동계수를 사용하는 것이 타당하다고 판단되었다.

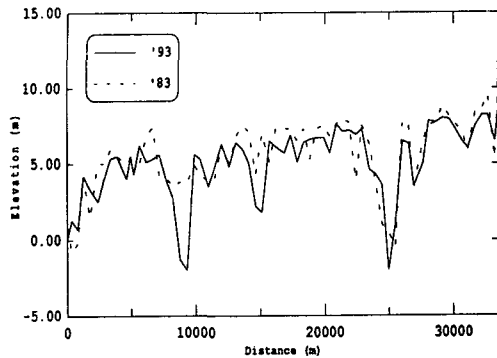


그림 2. 최심하상고의 변화

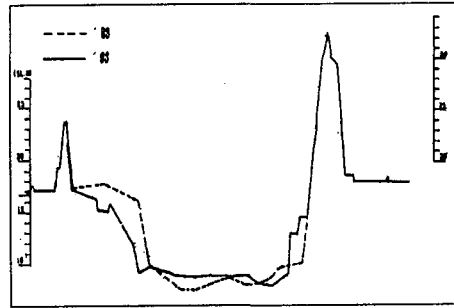


그림 3. 횡단면의 변화 (306번 단면)

③ Manning 조도계수의 불확실성

하도에 따른 공간적 변화와 현장관측이 어려운 특성 때문에 Manning의 조도계수 값을 정확하게 산정한다는 것은 어려운 일이다. 실제홍수가 발생한 후에 역산 조도계수 산정에 의해 Manning 조도계수 값을 구할 수 있다고 하더라도 이는 실제로 발생한 하나의 유량조건에 대한 부등류해석 결과를 기초로 한 것이기 때문에 제한적일 수밖에 없다. 즉 현장답사나 검증과 보정 등의 방법을 거쳐 산정된 조도계수라 할 지라도 완전히 신뢰할 수는 없다(Chow, 1959 ; Federal Highway Administration, 1984). 따라서 정확한 값을 얻기가 가장 어려운 조도계수의 오차조건을 세 가지 경우에 대해 변화시키며 그에 따른 불확실성을 계산하였다. 즉 Chow의 조도계수산정기준에 의해 최소값 0.0195, 최빈값 0.023, 최대값 0.027을 갖는 삼각형분포를 사용한 경우와 조도계수의 불확실성에 대한 여러 연구를 참고하여 계산된 변동계수 16.44%를 갖는 정규분포를 사용한 경우, 건설교통부(1993)의 낙동강 하천정비기본계획(보완Ⅲ)에서 제시된 0.020~0.033을 최소, 최대값으로 하는 균등분포를 사용한 경우를 각각 모의하였다.

3.2 적정 반복모의횟수의 결정

Monte Carlo 기법을 사용하면서 주의해야 할 점은 계산시간의 단축과 자료의 효율적인 정리를 위해 적절한 모의횟수를 결정하는 것이다. 이를 위해 각 단면에 대해서 모의횟수를 100회씩 증가시키면서 각 모의횟수에 대한 홍수위계산 결과의 평균치가 수렴하는 횟수를 조사하였다. 대부분의 단면이 약 500회 정도에서 수렴하므로 본 모형의 대상구간에 대한 모의횟수는 500회로 결정하였다.

3.3 분포형의 영향

각 임의변수의 난수를 발생하는 데 필요한 분포형을 결정할 수 있는 근거는 매우 부족하다. 본

연구에서는 조도계수를 위 세 가지 경우로 가정하여 모의하였고, 단면좌표는 지형도를 사용하여 자료를 얻는 경우에는 균등분포를 사용하는 것이 타당하나, 우리나라의 경우 측량에 의해 단면자료를 얻으므로 정규분포를 사용하였다. 설계유량과 초기수위에도 정규분포를 사용하였다.

4. 제방월류 위험도 산정

대상구간에 대해 부등류 해석 결과를 하천의 제방고와 비교함으로써 각 단면별 월류위험도를 산정하였다. 제방고는 건설교통부(1993)의 낙동강 하천정비기본계획을 참고로 하였다. 세 가지 경우로 각각 모의하여 계산된 부등류의 수면곡선을 제방고와 비교하여 그림 4~6에 나타내었다.

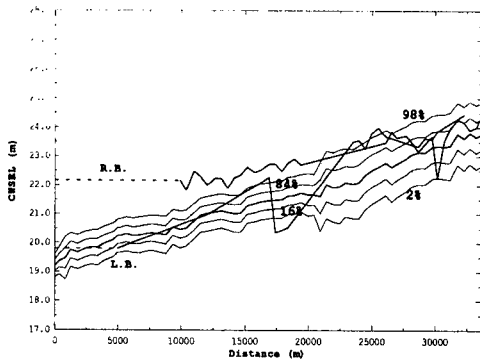


그림 4. 삼각형분포형인 경우

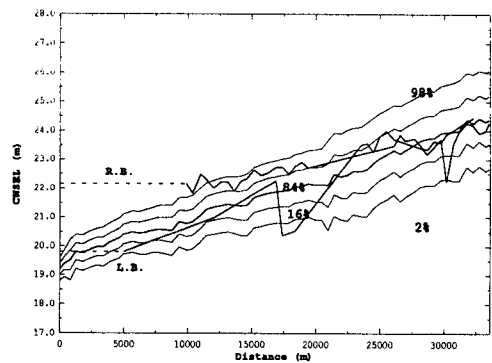


그림 5. 정규분포형인 경우

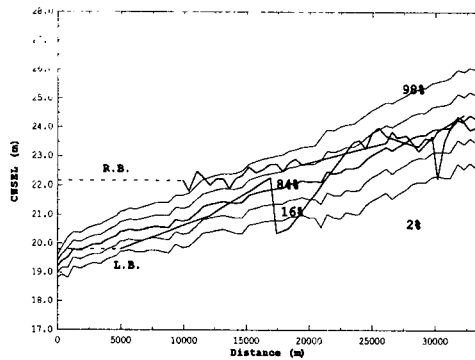


그림 6. 균등분포형인 경우

조도계수 오차의 범위가 비교적 작고 삼각형분포를 사용한 경우(그림 4)가 제방의 월류위험도와 수면곡선의 변화폭이 가장 작은 것으로 나타났다. 비교적 큰 값의 변동계수를 사용한 경우(그림 5)는 수면곡선의 변동폭은 가장 큰 것으로 나타났으나, 제방의 월류 위험도는 조도계수의 평균값이 높은 경우(그림 6)가 가장 큰 것으로 나타났다. 불확실도가 가장 큰 두 번째 경우, 최대월류수심은 가장 크게 계산되었으며, 조도계수의 평균값이 가장 큰 세 번째 경우는 월류수심은 두 번째보다 약간 작게 나타났으나 월류횟수는 가장 많았다.

5. 결 론

본 연구는 부등류의 수면곡선 계산 프로그램인 HEC-2 모형에 Monte Carlo 기법을 도입하여 홍수위 계산의 불확실도를 해석하고 계산된 수위를 실제 제방고와 비교하여 그 월류위험도를 산정한 것으로, 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 수면곡선계산에 사용되는 매개변수의 불확실도를 고려하기 위해 HEC-2 모형의 source code를 수정하여 프로그램 내부에서 Monte Carlo 모의를 수행하고, 적용되는 하천의 상황에 따라 반복모의횟수와 각 입력변수들의 변동성을 간단하게 변화시킬 수 있도록 구성하였다.
- (2) Monte Carlo 기법을 도입한 본 모형을 현풍~적포교 구간에 적용하였고 500회에 걸쳐 반복수행한 계산결과 추계학적 홍수위의 계산값이 기존 HEC-2 모형의 계산결과와 거의 일치함을 보임으로써 본 모형의 적용성을 입증하였다.
- (3) 본 모형을 현풍~적포교 구간에 적용한 결과를 실제 제방고와 비교한 결과 기존의 HEC-2 모형의 계산결과와는 안전한 것으로 판단되는 여러 단면지점의 제방에서 월류의 위험이 있으며 특히 305번, 309번, 313번 단면, 즉 적포교 수위표에서 상류방향으로 28,670m, 30,710m, 32,730m 지점은 그 위험도가 30~40% 이상으로 나타났다.

본 연구를 통해서 하천에서의 수면곡선의 신뢰도에 영향을 미치는 다양한 요인에 대해 분석하고 추계학적 홍수위 계산결과를 제시함으로써 하천제방 계획시 홍수피해와 투자액을 감안한 경제적인 하천 제방고의 결정을 위한 기본자료로 활용될 수 있다. 또한 국가 중요 시설물의 입지 선정시 하천홍수피해에 대한 판단자료로 이용될 수 있을 것이며, 홍수피해 경감대책의 수립에 크게 기여할 것으로 그 효과가 기대된다.

6. 참고문헌

- 건설교통부 (1992). 낙동강 하천정비기본계획 보고서.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997), "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 모형 및 이론", 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 679-690.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997), "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예", 한국수자원학회논문집, 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.
- Chow, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Hydrologic Engineering Center. (1990) *HEC-2 Water Surface Profiles, User's Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Mays, L.W. and Tung, Y.K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. McGraw - Hill.