하천 홍수범람모의를 위한 불확실도 해석기법의 적용

Application of Uncertainty Method for Analyzing Flood Inundation in a River

김 종 해* / 한 건 연** / 서 규 우***
Kim, Jong Hae / Han, Kun Yeun / Seo, Kyu Woo

Abstract

The reliability model is developed for analyzing parameter uncertainty and estimating of flood inundation characteristics in a protected lowland. The approach is based on the concept of levee safety factor and the statistical analysis of model parameters affecting the variability of flood levels. Monte Carlo simulation is incorporated into the varied flow and unsteady flow analysis to quantify the impact of parameter uncertainty on the variability of flood levels. The model is applied to a main stem of the Nakdong River from Hyunpoong to Juckpogyo station. Simulation results show that the characteristics of channel overflow and return flow are well simulated and the mass conservation was satisfied. The inundation depth and area are estimated by taking into consideration of the uncertainty of width and duration time of levee failure.

Keyword : river, levee, Monte Carlo simulation, flood inundation

요 지

본 연구는 홍수위 계산에 있어서 도입되는 불확실성의 원인을 분석하고 정량화하여 확률론적 홍수위 계산을 실시함으로써 제방월류에 대한 제내지의 범람특성을 해석할 수 있는 모형을 개발하였다. 이를 위해서 홍수위에 영향을 미치는 각종 영향인자를 통계학적으로 분석하였고, 이들 인자를 부등류와 부정류 해석과정에 Monte Carlo 모의를 도입함으로써 홍수위에 미치는 영향을 정량화하였다. 개발된 모형의 검증을 위해 낙동강 유역의 현풍~적포교 구간에 적용하였다. 제내지로의 범람양상과 역류양상을 합리적으로 모의하였고 질량보존도 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다. 또한 제내지 침수양상 모의시 붕괴폭, 붕괴시간 등의 불확실도를 고려하여 침수수심 및 침수면적을 산정하였다.

핵심용어 : 하천, 제방, Monte Carlo 모의, 범람홍수

-
- * 한국수자원공사 댐건설처 부장
Sec. Chief, Dam Construction Dept., KOWACO, Daejeon 306-711, Korea
(E-mail : jonghae@kowaco.or.kr)
 - ** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
Prof., of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(E-mail : kshanj@knu.ac.kr)
 - *** 동의대학교 토목도시공학부 토목공학전공 조교수
Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Donggeui Univ., Busan 614-714, Korea
(E-mail : kwseo@donggeui.ac.kr)

1. 서 론

최근에 들어 지구 온난화에 따른 이상기후 및 집중호우의 발생, 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화, 인명·재산 등의 홍수피해규모의 증대에 따라 설계빈도의 상향조정에 따른 확률론적인 방법보다는 확률론적 방법을 도입한 수문량 확충, 매개변수의 변동성을 고려한 불확실성 해석이 필요하게 되었다. 즉, 하천시설물의 설계와 평가과정에는 불확실성이 포함되기 때문에 이를 정량화한 위험도의 산정이 고려되어야 하며, 이를 기초로 하천제방 등에 대해서 신뢰도 분석개념을 도입한 치수대책의 수립이 필요하게 되었다(건설교통부, 2002).

범람홍수에 의한 재해는 개발지역의 하류부에서 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐 아니라, 사회적 문제를 야기할 수도 있으므로 범람홍수구역을 정확하게 추정하여 홍수범람지도도를 작성하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 신뢰도기법을 도입하여 제방월류에 대한 위험도를 산정하고, 제내지에서의 범람면적, 침수위 및 범람홍수량을 추정할 수 있는 수치해석 모형을 개발하여 이를 하도에서의 수리학적 모형과 연계하여 해석하였다.

수공학 분야에서의 불확실도 해석기법의 적용을 위해서 미국 육군 공병단(1991, 1992, 1996, 1997)에서는 홍수피해경감 과제를 수행함에 있어 불확실성을 고려한 위험도를 평가하였고, Chow(1978)는 수자원분야에서의 위험도 및 신뢰도해석기법의 적용을 검토하였고, Davis(1991)는 제방의 적정규모 결정을 위해서 신뢰도기법을 적용하였다. Melching(1987), Edwards(1988)는 강우-유출과정의 홍수량 산정에 도입될 수 있는 수문학적 불확실성을 정량화하였고, Moser(1998)는 수자원 계획 및 관리를 위한 불확실도기법의 적용성을 체계적으로 정리하였다.

본 연구에서는 계산홍수위의 신뢰도에 영향을 미치는 다양한 요인에 대해 분석하여 확률론적 홍수위 계산결과를 제시함으로써 하천단면에서의 월류위험도를 정량화하였다. 제방월류에 따른 제내지에서의 홍수범람해석과 홍수량이 제방을 월류하여 제내지로 범람하거나 하천으로 역류되는 현상을 해석할 수 있도록 구성하였고, 계산과정에 포함된 불확실성을 해석할 수 있도록 Monte Carlo 모의기법이 보강된 수리학적 홍수범람해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 낙동강 유역의 현풍~적포교 구간에 적용하여 제방의 수리학적 안정성

을 검토하였고 범람홍수해석을 실시하여 향후 이 유역에서의 치수관리를 위한 기초자료를 제시하였다.

2. 하천 흐름 해석에서의 불확실성

2.1 불확실성의 원인

확정론적 방법에 의한 흐름해석은 실제 현상에 대한 근사적인 표현으로서 많은 불확실한 요소를 내포하고 있기 때문에 모형에 의한 계산결과와 실제 관측치간에 일치율을 얻는 것은 매우 어렵다. 모형의 매개변수에 존재하는 불확실성은 모형의 구조적 오차뿐만 아니라 실제 시스템의 환경조건 등의 자연적인 변동성에 의한 것일 수도 있다. 각 변수의 실제값은 주로 일정한 범위 안에서 변화하게 된다. 이들 계수들의 불확실성은 모형의 계산에 따라 전파되고 전체 모형의 불확실성에도 기여한다. 그러므로 확정론적 방법에서와 같이 모든 계수들에 대하여 하나의 확정론적 값을 사용하는 것 대신에 이들 계수의 변동성이나 불확실성을 고려해주는 과정이 반드시 필요하게 된다.

수리학적 홍수범람해석 모형에 내재되어 있는 불확실성의 가장 주요한 요소는 불규칙한 하도단면에서의 유효 흐름단면적의 산정과 관련된 오차와 흐름에 대한 저항특성을 나타내는 조도계수에 포함된 불확실성이 주요 원인으로 분석된 바 있다(Davis, 1991).

2.1.1 Manning 조도계수

하도에 따른 공간적 변화와 현장관측이 어려운 특성 때문에 Manning의 조도계수를 정확하게 산정한다는 것은 어려운 일이다. 현장답사나 검증과 보정 등의 방법을 거쳐 산정된 조도계수라 할지라도 완전히 신뢰할 수는 없다. Manning 조도계수는 직접 측정된 값이 아니라, 주어진 유량과 하도의 지형조건, 마찰경사로부터 계산된 값이다.

Chow(1959)는 다양한 실험자료와 관측자료로부터 하도의 재료, 식생상태 등을 고려하여 개략적인 조도계수를 추정할 수 있도록 직접 제시한 조도계수를 선정하도록 하였고 각 하천구간에 대하여 최대, 최소, 중간값을 도표로서 제시한 바 있는데 본 연구에서도 이 값을 이용하였다.

2.1.2 하도단면자료

흐름단면적과 윤변의 변동성은 종방향 좌표 y 와 횡방향 좌표 z 의 변동성 향으로서 나타낼 수 있다. 이들 자료의 불확실성은 측정이 얼마나 정밀하게 되었는가에

표 1. 종단측량의 정확도

구 분	1급 수준측량	2급 수준측량	3급 수준측량	4급 수준측량
왕 복 차	$2.5\text{mm}\sqrt{S}$	$5\text{mm}\sqrt{S}$	$10\text{mm}\sqrt{S}$	$20\text{mm}\sqrt{S}$
폐 합 차	$2.0\text{mm}\sqrt{S}$	$5\text{mm}\sqrt{S}$	$10\text{mm}\sqrt{S}$	$20\text{mm}\sqrt{S}$
검 측	$6.0\text{mm}\sqrt{S}$	$8\text{mm}\sqrt{S}$	$20\text{mm}\sqrt{S}$	$30\text{mm}\sqrt{S}$

표 2. 횡단측량의 정확도

평 지		산 지	
거 리	높 이	거 리	높 이
1/500	$2\text{cm} + 5\text{cm}\sqrt{S}$	1/300	$5\text{cm} + 30\sqrt{S}$

따라 결정된다. 단면측점의 정확도는 그 점들을 직접 측정하였는가, 또는 지형도로부터 추출하였는가에 따라 다르다. 국내하천에서 종단측량과 횡단측량의 허용오차가 표 1, 2에 제시되어 있다.

2.2 Monte Carlo 모의

Monte Carlo 기법은 임의의 변수에 대해 상응하는 확률분포에 따라 발생하는 일련의 기본변수의 무작위값을 사용하여 반복되는 모의수행 처리과정을 포함하고 있다(Ang과 Tang, 1975). 이러한 처리과정을 반복함으로써 각 변수에 상응하는 값들에 대한 해의 변동성을 얻게 된다. 이러한 결과는 실제 관측치의 변동성과도 유사하기 때문에, Monte Carlo 모의수행의 결과는 통계학적으로 처리될 수 있고, 통계적 예측과 추론은 적절하다고 할 수 있다. Monte Carlo 기법에서 가장 중요한 것은 각 임의변수에 대해 적절한 분포형의 선정과 기대값이 수렴하기 위해 필요한 반복수행의 횟수를 결정하는 것이다.

본 연구에서는 부등류해석, 부정류해석, 범람홍수해석 결과에 대한 신뢰도를 정량적으로 평가할 수 있도록 각 수치모형과 Monte Carlo 기법을 연계한 프로그램을 구성하였다.

3. 하천제방의 안정성 및 범람홍수 해석

3.1 홍수해석의 기본방정식

본 연구에서는 하천홍수해석을 위해서 부등류 해석과 부정류 해석기법을 각각 적용하였다. 하천에서의 부등류 해석시 각 단면에서의 미지의 수위를 계산하기 위하여 다음의 방정식을 표준측차법에 의해서 반복적으로 계산하게 된다.

$$Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

$$h_f = L S_f \quad (2)$$

$$H_o = C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3)$$

여기서, Z_1, Z_2 는 구간 양단에서의 수위, V_1, V_2 는 구간 양단에서의 평균유속, a_1, a_2 는 구간 양단에서 흐름의 에너지 보정계수, g 는 중력가속도, h_f 는 구간의 마찰손실수두, L 은 구간거리, S_f 는 구간의 마찰경사이고 C 는 단면변화 손실계수이다.

하천에서의 부정류 해석에 대한 기본 방정식은 다음과 같이 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다. 이식에 대한 해석 해가 존재하지 않기 때문에 유한차분 기법인 Preissmann의 4점 음쇄법을 이용하여 각 지점에서 수위 및 유량값을 구한다(Fread, 1985).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_o \right) + L = 0 \quad (5)$$

여기서, Q 는 유량, A 는 흐름단면적, A_o 는 저류 단면적, q 는 제방유통 및 파괴에 따른 유출량, x 는 거리, t 는 시간, h 는 수위, S_f 는 마찰경사, S_o 는 단면 확대·축소에 의한 손실경사, n 은 조도계수, L 은 제방유통 및 파괴에 따른 운동량의 변화이다.

3.2 하천제방의 안정성 분석

제방은 홍수를 소통시키고 제내지를 보호하는 시설물로서, 홍수소통능력을 상회하는 홍수량이 상류로부터 전달되어 유하하는 경우에는 제방의 정상부를 월류하게 된다. 홍수시의 월류에 의한 붕괴확률 P_F 는 식 (6)과 같다.

$$P_F = P[h_F > H_D - H_0] \quad (6)$$

여기서, h_F , H_D , H_0 는 각각 홍수의 유입에 의한 상승수위, 제방제체의 높이, 초기수위를 나타내고 있다. 식 (6)을 실행함수 g_F 에 의하여 표시하면 식 (7)과 같다.

$$g_F = H_D - H_0 - h_F \quad (7)$$

여기서, H_D 의 값은 제방지점에서 직접 측정하거나 설계도면으로부터 알 수 있다. H_0 는 저유량시의 하천 수위이다. h_F 는 홍수에 의한 최대 상승수위로서 그 값은 상류로 유입되는 홍수의 유입수문곡선, 초기수위, 하천의 수위-저류량 관계 등에 따라 변동성을 가지게 된다. 하천제방에 대한 위험도 해석을 위해서 Monte Carlo 기법에 의해 실시하였다.

제방의 월류위험도 산정을 위한 Monte Carlo 기법의 계산 방법은 다음과 같이 요약된다.

- ① 각 매개변수에 대한 분포형(정규분포, 삼각형분포, 균등분포)을 결정하고 평균과 표준편차(또는 변동계수)를 산정한다.
- ② 각 분포형에 맞게 난수를 발생시킨다.
- ③ 정해진 실행함수의 각 매개변수 값들을 계산한다.
- ④ 반복계산후 발생빈도 및 반복계산수에 의하여 식 (8)을 이용하여 위험도를 구한다.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (8)$$

여기서, N_f 는 발생빈도수, N 은 반복계산수이다.

본 연구에서는 흐름해석의 입력자료인 Manning의 조도계수, 단면좌표의 오차가 수문곡선의 계산에 미치는 영향을 평가하기 위해서 Monte Carlo 모의를 실시

하였다. 또한 부등류 해석에서 사용된 HEC-2 단면을 사용함으로써 단면형상의 불확실성에 대한 자료를 일관성있게 부정류 해석에 사용할 수 있도록 구성하였다.

3.3 제방월류 및 범람홍수 해석

범람 홍수량에 대한 수문곡선을 유도하기 위해서는 하도에서의 홍수위, 붕괴부의 형상 및 제내지의 침수위를 고려하여, 제방월류로 인한 파괴의 경우에는 광정웨어 공식이 사용되고 파이핑에 의한 범람의 경우에는 오리피스 공식이 기본적으로 사용된다. 즉, 임의시간 t 에서 총범람유출량 $Q_b(t)$ 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$Q_b(t) = C_1(h - h_b)^{1.5} + C_2(h - h_b)^{2.5} + C_3a(h - h_0)^{0.5} \quad (9)$$

여기서, C_1 , C_2 , C_3 는 각각 넓은마루를 가진 직사각형웨어, 삼각형웨어 및 오리피스의 유량계수이고, h , h_b 는 각각 임의의 시간에서 하천수위 및 파괴부의 높이, h_0 는 파이핑 발생높이, a 는 파이핑 발생 단면적이다. 유량계수 C_1 과 C_2 는 엄밀한 의미에서 넓은마루를 가진 측방웨어에서의 값을 선정해야 하며, 이는 경험식 또는 이론식에 의한 값을 활용한다.

제방월류 가능지점이 선정되고 파제유량이 계산되면, 제방월류에 의해 제내지의 침수위가 높아짐에 따라 제내지에서 하도로 역류가 발생하는 경우를 해석하기 위해 다음 하류단면이나 다음 시간에 대해 월류량을 계산할 경우 하도내 홍수위와 제내지의 수위를 비교하여 제방월류량이 계속 발생할 것인지 역류현상이 발생할 것인지를 판단하여 제내지 침수특성 분석과 다음 단계 하도에서의 홍수위 추적을 수행하게 된다.

붕괴부에서의 유입수문곡선과 제내지의 침수저류량에 영향을 미치는 인자들로서는 붕괴부의 폭, 붕괴시간, 유량계수, 제내지의 가옥 점유율, 제내지 수위와 하천 수위 등을 들 수 있다.

일본 건설성의 하천사방시설기준에 의하면 하천 제방의 붕괴폭은 하천 합류점의 경우에는 $B_b = 2.0 (\log_{10} B)^{3.8} + 77$, 하천 합류점 이외의 경우에는 $B_b = 1.6 (\log_{10} B)^{3.8} + 62$ 를 이용하여 계산하였다. 여기서, B_b 는 제방의 붕괴폭(m)이고 B 는 하천폭(m)이다. 이러한 붕괴폭의 시간적 변화는 다음과 같다(日本河川協會, 1999).

$$B_b = B_b/2 : t=0$$

$$B_b' = \frac{B_b}{2} \left(1 + \frac{t}{60} \right) : 0 < t \leq 60$$

$$B_b' = B_b : t > 60$$

여기서, t 는 붕괴후 경과시간(분), B_b' 는 임의 시간에서의 붕괴폭이고 B_b 는 최종 붕괴폭이다.

4. 실제유역에 대한 적용

4.1 하도구간의 선정

낙동강 중류지역인 대구광역시 달성군 구지면 일대는 낙동강에 인접한 상습침수지역으로 해마다 낙동강의 범람으로 수해를 입었다. 대구 달성지역 낙동강 제방은 여러 지역에서 홍수위보다 낮게 축조되거나 무제방부로서 집중 호우시에는 범람의 우려가 높다. 그러므로 본 모형을 낙동강 중류지역의 홍수로에 대해 적용하였고, 계산구간은 현풍~적포교의 33.5 km 구간으로서 전체 단면의 개수는 67개이며 평균적인 계산거리간격은 0.5 km 이다. 그림 1은 적용구간 대상유역을 나타내고 있다.

4.2 수치모형의 적용

확률론적 모형을 적용하기 위해 Manning 조도계수의 평균값은 건설교통부(1993)의 낙동강 하천정비기본계획 보고서에 따라 0.023을 사용하였고, 조도계수의 범위는 Chow(1959)가 제시한 조도계수 산정기준을 근거로 대상구간의 조도계수 0.023과 중간값이 유사한 경우, 즉 굴착 혹은 준설된 하천에서 하상재료가 토양인 직선 단일 수로의 네 가지 경우를 바탕으로 최소값 0.0195, 중간값 0.023, 최대값 0.027을 사용하였다. 조도계수의 분포형은 삼각형분포로 가정하였고 최소값, 중간값, 최대값을 사용하여 변동계수를 계산하면 6.6%로 나타났다.

단면좌표의 적절한 변동성을 결정하기 위하여 건설교통부(1993)의 낙동강 하천정비기본계획 보고서에 제시된 1993년에 측정된 최심하상고와 1983년에 측정된 것을 비교하였다. 적용대상구간의 최심하상고의 차이를 계산한 결과 평균 0.9 m, 최대 4.9 m의 변화가 있었다. 또한 앞에서 제시한 표 1과 2의 측량허용오차에 대하여, 종단측량의 정확도는 1급과 2급 수준측량의 평균을 고려하였고 횡단측량의 정확도는 평지를 기준으로 측정하였다. 종·횡단측량의 허용오차를 계산한 결과

그림 1. 적용구간 대상유역도

그림 2. 최심하상고의 변화

그림 3. 모형 적용의 순서도

(a) 좌측제방

(b) 우측제방

그림 4. 부등류 해석에 의한 홍수위와 제방고의 비교

(a) 10 km 지점

(b) 20 km 지점

(c) 30 km 지점

그림 5. 구간별 홍수위 계산결과와 분포형

표 3. 정규분포의 적합성 검정

	10 km		20 km		30 km	
평균	22.357		21.345		19.594	
표준편차	0.1473		0.1298		0.1034	
변동계수	0.0066		0.0061		0.0053	
검정법	χ^2 검정	K-S 검정	χ^2 검정	K-S 검정	χ^2 검정	K-S 검정
계산치 기준치 비교	0.4<5.58	0.11<0.49	3.6<5.58	0.2<0.49	3.6<5.58	0.16<0.49
정규분포	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K	O.K

0.026 m의 값을 얻었으며, 최심하상고와 더한 값 0.926 m를 대상구간의 하도단면의 평균높이 30.87 m로 나눈 결과, 3%의 변동계수를 사용하는 것이 타당하다고 판단되었다. 단면좌표는 지형도를 사용하여 자료를 얻는 경우에는 균등분포를 사용하는 것이 타당하나 우리나라의 경우 측량에 의해 단면자료를 얻으므로 정규분포를 사용하였다.

그림 3은 본 연구에서 개발한 모형을 대상구간에 적용하기 위한 일반적인 순서도를 보여주고 있다.

4.3 비교검토

대상구간에 대한 흐름해석의 불확실성을 해석한 결과를 실제하천의 제방고와 비교함으로써 각 단면별 월류위험도를 산정하였다. 그림 4에서 결과값이 폭으로 표시되는 것은 각 단면에서 계산 홍수위의 변동성을 나타내는데, 이는 하도단면 및 조도계수 등의 매개변수에 내재되어 있는 불확실성에 기인한다. 즉, 임의 하천단면에서 폭의 크기는 불확실성에 대한 크기를 의미한다.

그림 5는 구간별 홍수위 계산결과와 분포형을 보여주고 있고, 그림에 나타난 정규분포의 적합성을 검정하기 위한 계산결과가 표 3에 제시되어 있다. 유의수준 1%로 Chi-Square 검정과 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시한 결과, Monte Carlo 모의에 대한 세 지점의 홍수위 계산결과와 분포는 모두 정규분포가 적합한 것으로 나타났다.

그림 4에서 보는 바와 같이 부등류와 부정류 해석 모두 하천정비기본계획상의 285번과 283번 단면에서 100%의 제방 월류위험도를 나타내고 있어 이 지점에서 많은 양의 제방월류가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

하천제방의 안정성 분석을 위한 부등류와 부정류 해석을 실시한 결과 285와 283 단면의 좌측제방에서 100%의 월류위험도를 나타내고 있었다. 그러므로 이 지점들을 제방월류 가능단면으로 선정하고 이에 대한 하도의 홍수위와 제내지의 범람수위를 연계하여 제내지에서의 홍수범람 특성에 대한 분석을 실시하였다. 제내지의 형상은 TIN을 이용하여 표고와 이에 해당하는 수 표면적으로 지형자료를 구성하였다.

그림 6은 하천단면 285번과 283번 지점별로 하도에서의 홍수위와 제방월류에 의한 제내지에서의 수위변동 양상을 나타낸 것이다. 하도의 각 단면에서 수위변화를 살펴보면 285번 단면의 경우 29시간에서 침두수위 21.02 m가 발생하였고, 283번 단면에서는 29시간에 침두수위는 20.91 m로 나타났다. 제내지의 침수위가 하도의 홍수위와 제방의 최종 붕괴높이보다 높은 경우 침수위가 감소하고 있는데, 이는 제내지에서 하도로 역류하는 현상을 잘 나타내고 있다.

285번과 283번 단면에서 제방을 통하여 월류된 범람홍수량은 285번 단면에서는 30시간에서 제내지의 침두유량 $976 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 발생하였다가 49시간에서 제내지에서 하도방향으로 역류되기 시작하였다. 283번 단면에서

그림 6. 하도의 홍수위와 제내지의 침수위

그림 7. 제내지의 침수위 변동성

그림 8. 제내지의 침수위와 범람면적

(a) 범람시작 8시간 후

(b) 범람시작 13시간 후

(c) 범람시작 18시간 후

그림 9. 제내지의 침수위에 대한 침수면적

는 30시간에서 제내지의 침투유량 $913 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 발생하였다가 48시간에서 제내지에서 하도방향으로 역류되기 시작하였다.

제방월류량, 역류량 및 제내지 저류량을 비교해 보면 하도-제내지간의 유량 교환은 질량보존의 면에서 질량 오차는 1%이내로 나타나 정확하게 모의되고 있는 것으로 나타났다. 이는 본 연구모형이 하도-제내지간의 범람현상과 월류량의 교환을 합리적으로 계산하고 있음을 의미하는 것으로 판단되었다.

그림 7은 제내지에서 홍수범람 특성해석에 포함된 불확실성을 고려한 Monte Carlo 모의를 실시하여 제방월류에 의한 제내지에서의 침수위를 최대값과 최소값의 범위로 나타낸 것이다. 최대 침수위의 경우에는 제내지에서 하도방향으로 역류량이 발생했지만 최소 침수위의 경우에는 역류가 발생하지 않았다. 그림 8은 제내지에서 평균 범람홍수위에 대한 범람 침수면적을 나타낸 것이다. 결과에 의하면 범람발생은 홍수위추적을 시작한 시간으로부터 22시간에 발생하였고, 침투침수위가 발생한 47시간에는 7.82 km^2 의 면적이 홍수범람에 의해서 침수되었으며, 침수위는 18.41 m 로 나타났다. 그림 9는 285번과 283번 단면에서 제방이 붕괴되었을 때, 시간에 따른 제내지의 침수위에 대한 침수면적을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 하천단면 지점에서 제방월류에 대한 위험도를 산정하고, 제내지에서의 범람면적, 침수위 및 범람홍수량을 추정할 수 있는 수치해석 모형을 개발하여 이를 하도에서의 수리학적 홍수해석 모형에 연계하여 구축하고자 하였다. 또한 과거 홍수범람이 발생한 지역을 대상으로 하천주변의 침수가능지역의 홍수범람 해석을 실시하여 그 결과를 기초로 하여 제내지 범람지역의 치수관리에 활용하고자 하였다.

- (1) 본 모형을 낙동강 중류부인 현풍~적포교 구간에 적용하여 하도단면과 조도계수의 불확실성을 정량화하였으며, Monte Carlo 모의에 의한 홍수와 해석을 실시함으로써 도출된 홍수위의 변동양상을 파악할 수 있었다.
- (2) 홍수위의 변동성과 실제 제방고에 의한 실행합수를 구성하여 각 지점별 제방월류의 위험도를 산정하였는데 100%의 월류위험도가 나타난 지점을 제방월류 기능단면으로 선정하고 하도의

홍수위와 제내지의 범람수위를 연계하여 제내지에서의 홍수범람 특성을 분석한 결과, 하천홍수위 상승시 제내지로의 범람양상과 홍수위 하강시 역류양상을 합리적으로 모의하고 있었고 질량보존도 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다.

- (3) 하도범람수의 제내지 침수양상 모의시 붕괴폭, 붕괴시간 등의 불확실성을 고려하여 침수수심 및 침수면적을 확률적으로 계산하였으며, 이와 같은 계산기법은 다양한 치수계획 수립에 활용될 수 있도록 구성하였다.
- (5) 본 연구모형은 하천제방의 월류위험도 및 제내지의 가상범람원 등을 확률론적으로 산정할 수 있도록 프로그램을 확립하였으므로, 제방의 단면 결정 및 제내지의 토지이용계획 등의 분야에 적용하여 활용할 수 있다.

향후, 대상구간에 대한 수위-피해 함수가 조사된다면, 빈도-유량 함수, 수위-유량 관계곡선과 수위-피해 함수의 불확실성을 고려한 확률론적 연피해 기대치를 산정함으로써 하천제방 및 제내지의 치수경제성 분석에 크게 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1993). 낙동강 하천정비기본계획 보고서.
- 건설교통부 (2002). 하천시설물 설계시 신뢰도 분석개념 도입에 관한 연구.
- 김종해 (2002). 하천제방의 안정성 분석 및 치수관리시스템 구축. 경북대학교 공학박사학위논문
- 日本河川協會 (1999). 하천방재 기술기준(안) 및 동 해설. I - II, 建設省, 山海堂.
- 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.
- Chow, V.T. (1978). "Risk and Reliability Analysis Applied to Water Resources in Practice." *Int. Symp. on Risk and Reliability in Water Resources*, Univ. of Waterloo, Waterloo, Canada, June 26-28.
- Davis, D.W. (1991). "A risk and uncertainty based concept for sizing levee projects." *Proc. of a Hydrology and Hydraulics Workshop on Riverine Levee Freeboard*. U.S. Army Corps of

- Engineering Center, pp. 231-249
- Edwards, D.R. (1988). *Incorporating Parametric Uncertainty into Floo Estimation Methodologies for Ungauged Watersheds and for Watershed with Short Records*. Ph. D. Thesis, Agricultural Engineering Department, Oklahoma State University.
- Fread, D.L. (1985) "Channel Routing," in Anderson, M.G., and Burt, T.P.(eds), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, New York, pp. 437-503.
- Melching, C.S. (1987). *A Reliability Analysis on Flood Event Forecasting with Uncertainties*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Illinois, at Urban-Champaign.
- Moser, D.A. (1998). *Risk Analysis for Water Resources Planning and Management, PRO-SPECT Training Course Notes*. Control No. 349, U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S Army Corps of Engineers (1991). *Proceedings of a Hydrology and Hydraulics Workshop on Riverine Levee Freeboard*. Davis, Calif.
- U.S Army Corps of Engineers (1992a). *Guidelines for Risk and Uncertainty Analysis in Water Resources Planning*. Vol. I : Principles with Technical Appendices. Report 92-R-1. Virginia.
- U.S Army Corps of Engineers (1992b). *Guidelines and Procedures for Risk and Uncertainty Analysis in Corps Civil Works Planning*. Vol. II : Example Cases, Guidelines for Risk and Uncertainty Analysis in Water Resources Planning. Report 92-R-2. Virginia.
- U.S Army Corps of Engineers (1996). *Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies*. Washington, D.C.
- U.S Army Corps of Engineers (1997). *Hydrology and Hydraulics Workshop on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies*. Publication SP-28. Davis, Calif.

(논문번호:03-36/접수:2003.04.03/심사완료:2003.07.03)