

하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(II): 불확실도 해석 Numerical Model for Flood Inundation Analysis in a River(II): Uncertainty Analysis

이 홍 래* / 한 건 연** / 김 상 호***
Lee, Hong Rae / Han, Kun Yeun / Kim, Sang Ho

Abstract

The numerical model named "DWOPER-LEV" for the uncertainty analysis of flood inundation is developed. DWOPER model is expanded to compute overtopping risks of levee and to predict the range of the possible flood extent. Monte-Carlo simulation is applied to examine the uncertainties in cross section geometry and Manning's roughness coefficient. The model is applied to an actual levee break of the South Han River. The risks of overtopping are computed and the possible range of inundated area and inundated depth are estimated.

Keywords : Monte-Carlo method, Flood Inundation, DWOPER model

요 지

기존의 DWOPER 모형에 대해서 불확실도 기법을 이용한 홍수범람 해석을 위해 DWOPER-LEV 모형을 개발하였고, 하천의 홍수범람에 따른 제방의 월류위험도와 가능 범람범위를 예측할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 홍수추적에 있어서의 하도단면의 기하형상과 수리저항계수에 기인한 불확실도의 영향을 검토하기 위해 Monte-Carlo 기법을 적용하였다. 개발된 모형은 남한강 유역의 실제 제방붕괴로 인한 홍수범람에 적용하여 제방의 월류위험도와 제내지에서의 가능 범람범위와 범람수심을 산정하였다.

핵심용어 : Monte-Carlo 해석, 홍수범람, DWOPER 모형

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원 (연세대학교 토목공학과 박사과정)

** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

1. 서 론

홍수재해로부터 많은 인명과 각종 산업시설을 보호하고 있는 하천제방과 같은 홍수방지 시설물들은 그 설계와 관리에 만전을 기하고 있음에도 불구하고 토지 이용상황, 유출조건 등의 수문학적 변화, 집중호우, 이상홍수, 지진 등의 기상변화와 상류측 수문조작의 오류 등에 의해서 제방 월류와 붕괴 등으로 인한 洪水流 및 土石流의 범람피해가 발생되고 있다.

홍수범람 재해시 범람구역으로 유입되는 홍수량을 적절히 예측하는 것은 매우 중요하다. 범람 수리현상은 유입유량의 증대로 인한 유역자체에서의 범람과 제방 마루에서의 월류 및 붕괴에 의한 범람으로 대별될 수 있다. 홍수범람에 의한 재해는 제내지에서 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐 아니라, 사회적 문제를 야기할 수 있다.

최근에 국내에서 제방붕괴로 인한 홍수피해의 예는 1980년 7월 보청천 유역에서 소류지 및 하천제방이 붕괴, 유실되어 큰 피해가 있었고, 1984년 9월 한강유역에 내린 집중호우로 인하여 서울 망원동 지역에서의 수문붕괴에 의한 침수피해를 야기한 바 있으며, 1987년 7월 금강유역의 부여, 논산, 강경지역에서는 제방월류 및 붕괴로 인한 대범람의 피해를 입은 바 있다. 1990년 9월에는 일산제 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해, 1991년 8월에는 태풍 Gladys에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수로 인한 큰 피해가 있었다. 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해와 1995년 8월 태풍 Janis와 집중호우로 인해서 금강, 남한강, 북한강, 삼교천, 내성천 등 전국에 걸친 하천유역에서 범람침수 피해, 1996년 7월 한탄강 유역에서 발생한 연천댐의 붕괴와 이에 따른 제방월류에 의한 범람피해 등은 이 분야에 대한 종합적인 연구의 필요성을 크게 증대시켰다.

그러나, 홍수범람 모의에 있어서 많은 불확실한 요소가 존재하게 되는데, 이들 중 중요한 것은 하도와 관련된 수리학적 매개변수들이다. 이것은 지형도로부터 하도의 기하학적 형상을 추출하는데 포함된 오차와 과거 홍수로부터의 조도계수를 산정하는데 있어서의 오차가 포함된다. 하천에서의 매개변수 불확실도로부터 야기되는 유량, 수심, 도달시간 등에 대한 변동성의 범위는 제방월류 및 붕괴에 따른 홍수모의에 반드시 고려되어야 할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 DWOPER 모형에 대

해서 Monte-Carlo 기법을 적용한 DWOPER-LEV 모형을 개발하였고, 홍수범람에 따른 해석에 있어 그 영향이 검토되었다. 본 연구에서 개발된 모형은 '95년 8월에 발생한 남한강 유역의 여주지역 홍수범람에 적용하여 그 활용성을 제시하였다.

국내에서 제내지에서의 홍수범람에 대한 연구로서는 이종태와 한건연(1989)은 하천제방의 파괴 양상을 월류, 붕괴, 배수문의 파손 등으로 구분하여 해석하였고 이를 '84년도 망원동 배수문 파괴의 경우에 적용하고 제내지에서의 침수해석을 실시한 바 있다. 이종태 등(1995), 한건연과 박재홍(1995)은 일산제 제방붕괴에 대한 홍수와 전달에 대해서 수치모의를 실시한 바 있다. 한건연 등(1997a, b)은 댐 및 하천제방의 안전도 평가를 위한 위험도 해석모형을 개발하였고, 이를 실제 유역에 적용하였다.

그러나, 아직까지 국내·외에서 제방월류 및 붕괴에 따른 범람홍수와 해석에 불확실도 해석기법을 연계한 연구는 매우 드문 실정이며, 제내지에서의 지형조건을 고려하여 제방의 월류 위험도를 계산하고, 제방월류 또는 붕괴에 따라 홍수류가 제내지로 범람되는 양상을 해석한 연구는 부족한 상황이다. 본 연구의 모의 결과는 홍수 재해시 제내지의 침수지역의 예측, 단계적 대피, 주요 시설의 보호 및 이동 등을 포함한 재해예방 및 구체적인 피해 경감대책에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 범람홍수에 대한 불확실도 해석

범람홍수 산정에 있어서 내포되어 있는 불확실도는 불규칙한 자연하도 단면에서의 유효통수단면적 산정과 관련된 오차와 복합적인 양상을 나타내는 조도계수 산정에 있어서의 오차가 가장 큰 원인이 된다. 이와 같은 오차는 결국 그림 1에서의 수위-피해도 산정을 고려한 해석의 필요성이 크게 대두되고 있는데, 여기서 Q는 홍수량, S는 홍수위, W는 피해액, P는 위험도를 각각 나타내고 있다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 수위-피해도의 관계가 확정론적인 값보다는 적정 분포형을 갖는 확률론적인 관계에 의해서 그 의미의 부여가 수반되어야 할 것이다 (Davis, 1991).

범람홍수 해석에서의 불확실도 중에서 하도 단면과 관련된 사항은 실제 측량에 있어서는 중형단 측량지점의 선정에서의 오차, 선형 변화를 가정한 오차 및 관측 오차, 지형도 상에서는 등고선 간격간의 선형성을 고려한 오차, 등고선 간격간의 거리가 측정될 때 수작업에

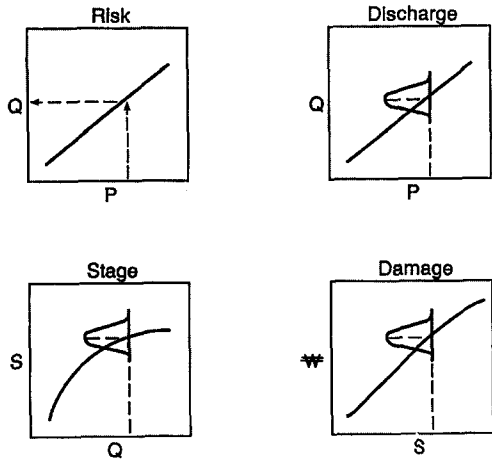


그림 1. 범람홍수해석시의 불확실도

의한 오차, 지형도 측척에 의한 오차 등이 포함될 수 있다. Manning의 조도계수에 있어서의 오차는 실제 관측에 의한 정확한 평가가 어렵고 제방의 월류 및 붕괴 등의 이상홍수에 의한 경우 그와 관련한 검증이 어렵다는 특성이 있다(Kung과 Yang, 1993). 연구자료에 의하면 홍수위 산정에 있어 Manning의 조도계수는 가장 큰 불확실도의 원인이 되어 수심에 있어서는 7~26 % 사이의 평균 형상오차를 가지며 수심의 14~72 %까지의 최대 오차를 일으키는 것으로 연구된 바 있다 (HEC, 1986; Thomas, 1991).

하천제방에 대한 위험도 산정에 있어서 가장 중요한 것은 상류부에서 홍수량이 하천으로 유입되었을 경우, 이 유량이 하도를 유하함으로써 각 하도지점에서 나타나는 수위변동 양상이라 할 수 있겠다. 수리학적 불확실도는 주로 수학적 모형이나 경험적 공식들이 실제 자연현상이나 과정을 완벽하게 반영하지 못하고 있음에 기인한다. Manning 식에서의 독립변수들은 하도의 기하학적인 형태, 마찰경사, 조도계수 등이다. 만약 독립변수들의 평균 특성치가 일정하다면, 수리학적 불확실도는 각 매개변수들에 의한 불확실도들의 결합으로 표시될 수 있다(한건영 등, 1997a, b)

본 연구에서는 홍수추적에 있어서의 하도단면의 기하형상과 수리저항계수에 기인한 불확실도의 영향을 검토하기 위해 Monte-Carlo 기법을 적용하였다. Monte-Carlo 해석은 모형 불확실도를 정량화하는데 그 이론과 적용에 대한 수학적 이해가 용이하기 때문에 가장 보편적인 방법으로 급격히 발전하고 있다. 많

은 연구자들에 의해서 Monte-Carlo 기법에 대한 연구결과는 기대되는 시스템의 반응이 동일한 시스템에 대한 확정론적인 해와 상이할 수 있다는 것을 제시한 바 있고 그들은 Monte-Carlo 해석에 의하여 예측되는 변동성이 관측치의 변동성과 매우 유사하다는 것을 보여주었다. 또한 Monte-Carlo 해석결과가 확정론적 결과에 비하여 더욱 안정해를 제시하는 것으로 나타났다. 이는 모형입력의 작은 변화가 확정론적 해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, Monte-Carlo 결과에는 그 영향이 작게 나타났다. 많은 모형 매개변수가 직접적으로 측정할 수 없다 하더라도 독자적으로 확률분포에 의하여 비교적 정확하게 기술될 수 있다.

3. DWOPER-LEV 모형의 개발

본 연구모형의 범용화를 위해서 DWOPER 모형 (Fread, 1985)에 대해서 Monte-Carlo 해석과 제방월류 및 붕괴에 따른 홍수해석, 제내지에서의 범람 해석을 처리할 수 있도록 프로그램을 개선, 보강하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 기존의 DWOPER 모형에 대해서 8개의 부프로그램을 새로이 추가하였고, 12개의 부프로그램을 수정, 보완하여 DWOPER-LEV 모형을 개발하였다.

본 연구에서 개발된 모형은 크게 하천 제방의 월류 및 붕괴에 따른 월류량의 산정, 이에 대한 제내지에서의 범람모의 부분, 이러한 모의에 대한 Monte-Carlo 기법의 적용 부분, 그리고 사용자 편의를 위한 후처리 부분 등으로 구분할 수 있다. 먼저, 제내지에서의 월류량 산정과 범람의 모의를 실시하였고 홍수추적에 대한 불확실도를 고려하였는데, 제방월류 및 붕괴를 위해 불확실도 해석과 연계되어 새로이 추가된 부분과 이에 대한 부프로그램은 다음과 같다.

(1) 기존의 입력자료에서 수면폭 자료와 이에 대응하는 수위 자료, 그리고 Manning의 n 값에 대한 불확실도를 적용하여 Monte-Carlo 분석을 수행하도록 하였다. 이를 위한 반복횟수와 변동성을 줄 변수에 대한 변동치는 INP-VAR.DAT에서 다루게 된다. 그림 3은 Monte-Carlo 기법을 수행하기 위한 INP-VAR.DAT의 형식을 나타내고 있다(COCRD2, MCSIM, DWOMN).

(2) 본류에서 제방을 월류 또는 붕괴지점을 10개 지점까지 선택할 수 있도록 하였으며, Monte-Carlo 기법을 적용하는 과정에서 수백 회의 반복수행이 가능하나 PC의 용량으로 인해 100회까지의 수행이 가능하도

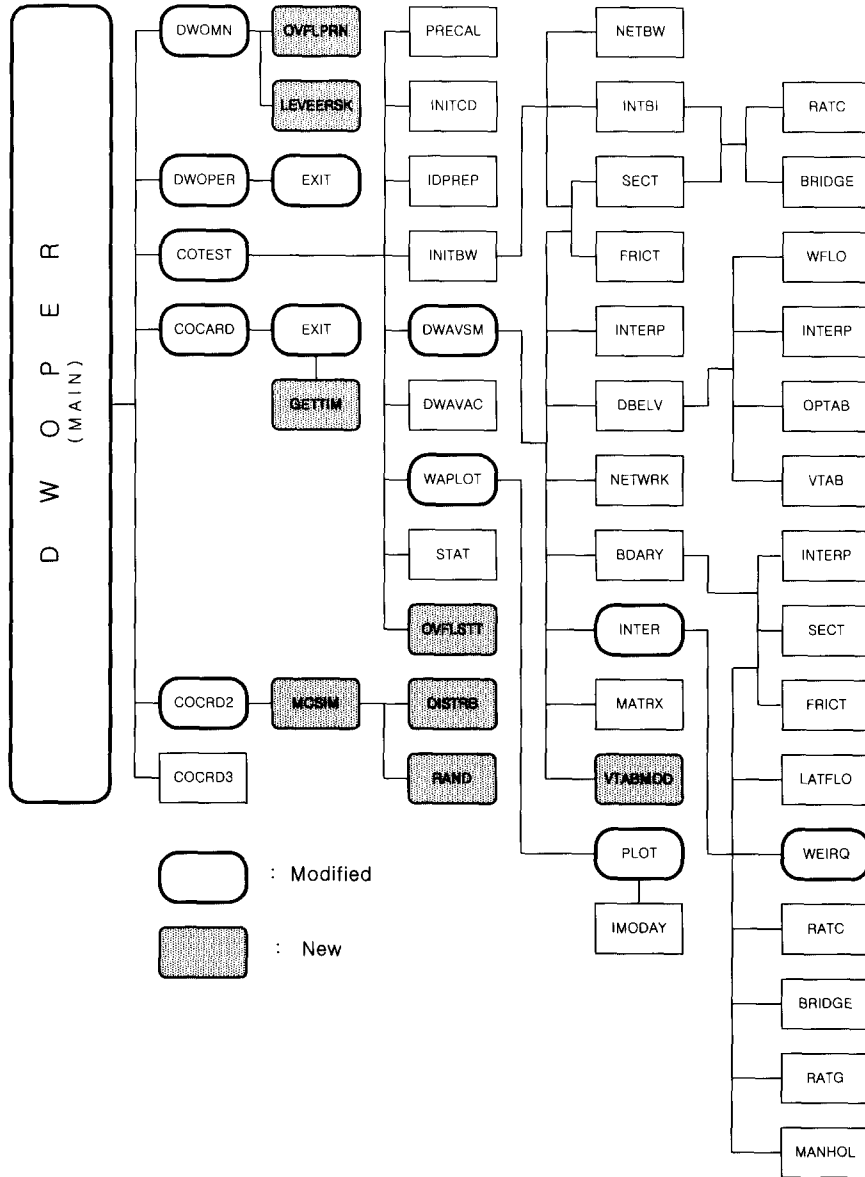


그림 2. DWOPER-LEV 모형의 구조도

록 하였다(MAIN, COCARD, DWOMN).

(3) 주어진 변동조건에 따른 각 반복 모의수행에서의 결과를 얻기 위하여 전 구간의 모든 지점에서 전체 수행시간동안의 최대 수위와 최대 유량을 찾아 기록한다(DWAVSM).

(4) 각 반복수행 동안 계산된 최대 수위에 대해 주어진 제방의 높이를 초과하는 확률을 구하고, 가장 높은 최대 수위와 가장 낮은 최저 수위를 구하며, 유량에

대해서도 최대 및 최소 유량을 구한다(LEVEERSK).

(5) 제방의 월류 및 붕괴로 인한 범람량에 대해 전체 수행시간동안의 최대량을 구한 후, 반복수행동안의 최대범람량을 구해 이에 대한 결과를 지정한 각 지점 별로 출력하도록 하였다(COTEST, VTABMOD, OVFLPRN, OVFLSTT, WEIRQ).

(6) 지정한 출력지점에서의 계산 결과 중 Monte-Carlo 분석을 통한 지정된 반복 횟수에 대한

INPUT VARIANCE DATA FOR LEVEE RISK ANALYSIS - MC			
TOTAL ITERATION NUMBER		:	100-----
*** INPUT VARIANCE NAME		COV(%)	PDF ***
CRSCBS : cross section (BS)		1.	UNIFOR
CRSCHS : cross section (HS)		1.	UNIFOR
CHMANN : Manning's n-value		5.	UNIFOR

그림 3. Monte-Carlo 기법의 수행을 위한 입력자료

각 계산 결과를 지점별로 하나의 파일로 생성되도록 하였다. 또한 계산된 시작시간과 종료시간을 나타내고, 계산 수행시간도 함께 계산하여 나타낸다(WAPLOT, EXIT).

4. 남한강 유역에 대한 적용

4.1 확정론적 홍수해석

'95년 8월에 발생한 여주 홍수의 홍수범람 양상을 규명하기 위해서 DWOPER 모형에 의한 홍수와 해석을 실시하였다. 그림 4는 본 연구구간에 대한 유역도를 나타내고 있다. 대상구간은 상류단 여주 수위표 지점에서 하류단 양평수위표 지점까지의 27.66 km 구간에 대해 해석하였다. 그림 5는 여주수위표 지점과 양평수위표 지점에서의 수위수문곡선을 도시한 것이다.

확정론적 해석에 의해서 계산된 최고수위와 우측제방고를 비교한 결과 지점번호 82, 79, 78, 75 지점(여

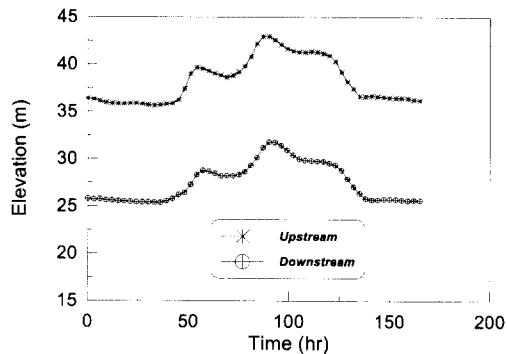


그림 5. 상하류단의 수위수문곡선

주 수위표 지점을 기준으로 하여 각각 하류부 14.26 km, 15.46 km, 15.86 km, 16.90 km에 위치함) 에서 계산된 최고수위는 우측제방고에 비해서 각각 0.937 m, 0.458 m, 2.040 m, 0.578 m 만큼 높게 나타나 그 당시에 하천제방을 월류가 크게 나타났었음을 확인할 수 있었다.

4.2 통계학적 홍수해석

본 연구에서는 홍수추적에 있어서의 하도단면의 기하형상과 수리지항계수에 기인한 불확실도의 영향이 검토되었다. 하천의 기하형상과 조도계수에 있어서의 오차는 공간적으로 비상관적이며 임의적으로 분포되어 있는 것으로 고려하였다. 본 적용에 있어서 수위-수면폭 관계의 오차는 1%, 조도계수의 오차는 5%인 균등 분포로 가정하여 모의수행을 실시하였다.

모의 수행 오차를 감소시키고, 통계학적으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서 각 하도단면형상과 조도계수에 대해서 100회 반복수행이 이루어졌다. 모의수행에 사용된 매개변수군은 단면형상과 조도계수에 대한 난수 발생값의 임의 조합에 의해 형성되었다. 주어진 매개변

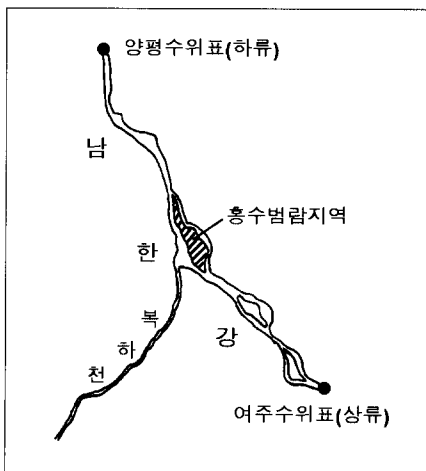


그림 4. 대상유역의 지형도

수준에 대해서, 모의과정은 확정론적인 것이었고 따라서 100개의 확정론적 해석 결과를 얻을 수 있었다.

그림 6은 추계학적 해석결과에 의한 최고 홍수위 해석결과를 도시한 것이며, 그림 7은 침투홍수량 해석결과를 도시한 것이다. 그림 8~그림 9는 여주하류부의 3

개의 위치인 113, 82, 58번 지점 (여주수위표 지점을 기준으로 하여 각각 하류부 1.18 km, 14.26 km, 24.32 km에 위치함)에서의 수위수문곡선과 유량수문곡선의 변동양상을 도시한 것이다. 이들 3개 지점에서의 최고수위의 변화는 ± 0.485 m, ± 0.340 m 및 ± 0.205 m 로 각각 나타났다. 이 유역에서 하류부로 진행될수록 수위에 대한 불확실도의 변동폭이 작게 나타난 것은 하류부 양평에서의 수위관측치는 실제 정확한 물리적인 관측자료이므로 이를 고정시킨 상태에서

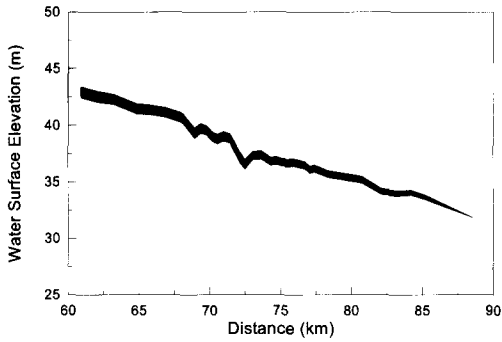


그림 6. 최고홍수위 변동의 종단형상

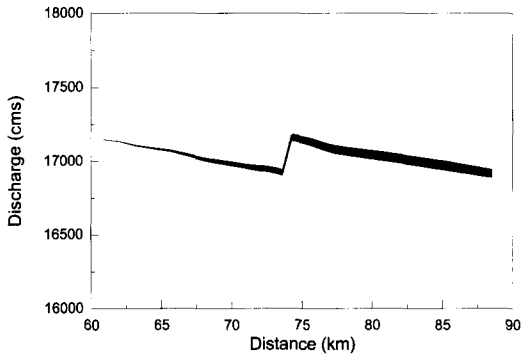


그림 7. 침투홍수량 변동의 종단형상

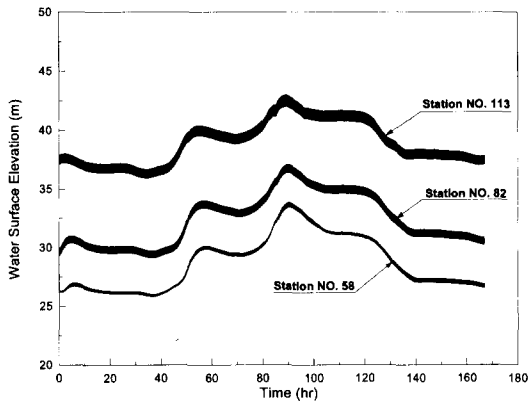


그림 8. 지점별 수위수문곡선의 변동성

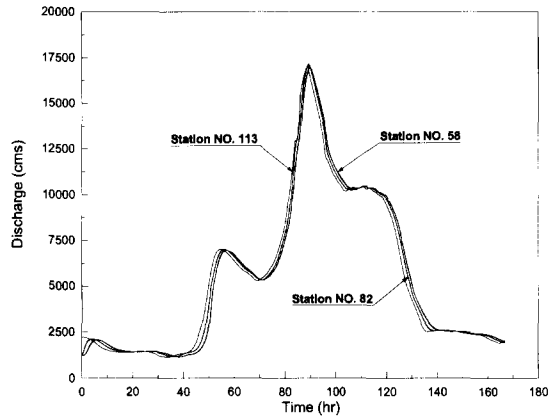


그림 9. 지점별 유량수문곡선의 변동성

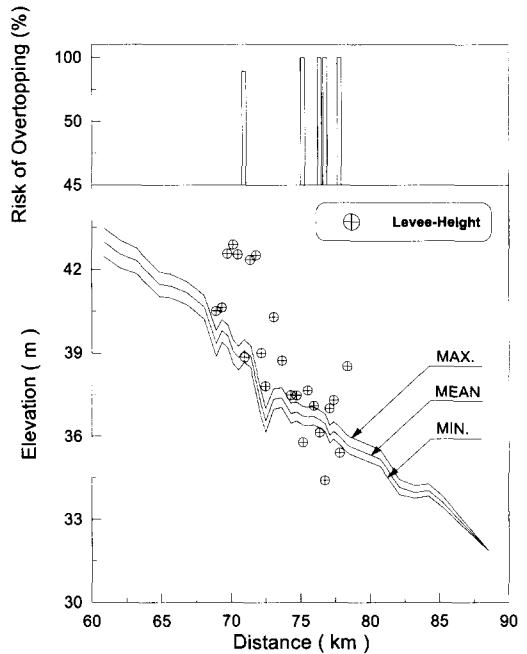


그림 10. 주요지점별 제방월류의 위험도

계산을 수행하였기 때문이었다.

4.3 제방월류의 위험도 산정

추계학적 홍수위 해석결과를 이용하여 주요 월류위험 지점에서 제방고와 홍수위를 비교함으로써 월류 위험도를 산정하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 No. 82, 79, 78, 75 지점에서는 평균적으로 홍수위가 2.040~0.458 m 범위로 상회하는 월류가 발생함으로써 당시의 하천유량이 제방을 통해 크게 월류하였음을 확인할 수 있었다. 하도단면 및 조도계수의 불확실도를 고려한 경우에 대해서 이 구간에서의 최고 및 최저수

위에 대한 제방의 월류위험도는 84~100 %의 범위로 나타났다.

4.4 제내지에서의 범람 홍수해석

불확실도를 고려한 하천의 수위변동에 대한 주어진 제방을 월류할 확률을 토대로 주요 월류지점 No. 82, 79, 78, 75 지점에서의 제방고에 대한 월류양상을 그림 11~그림 14와 같이 도시하였다. 그림에서와 같이 제방고가 가장 낮은 No. 78 지점에서 가장 많은 월류량과 역류량의 발생을 예상할 수 있으며, 이와 같이 각 지점별로 주어진 제방고를 월류하게 될 하도부 수위의

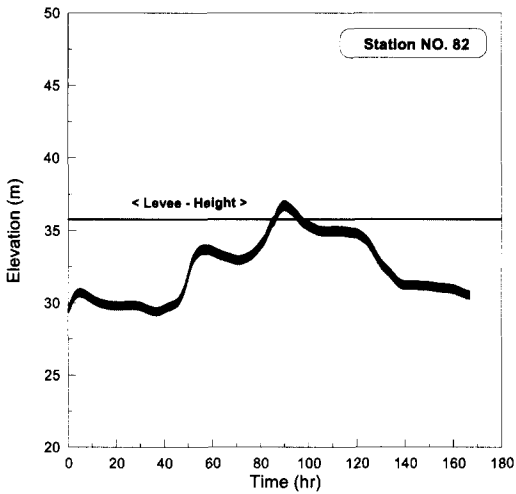


그림 11. 제방고와 수위의 변동성(No. 82)

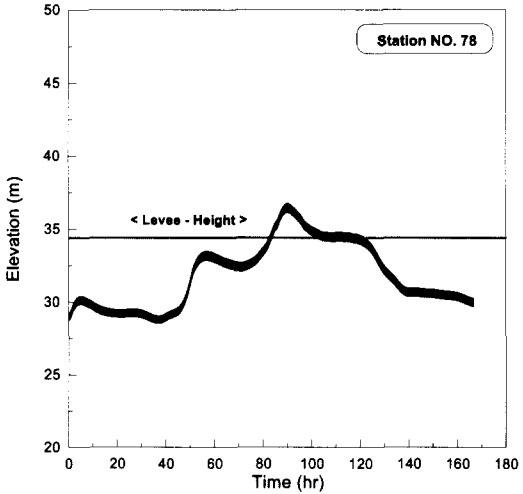


그림 13. 제방고와 수위의 변동성(No. 78)

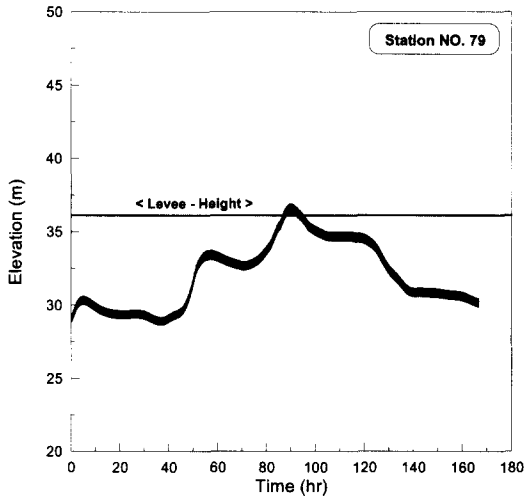


그림 12. 제방고와 수위의 변동성(No. 79)

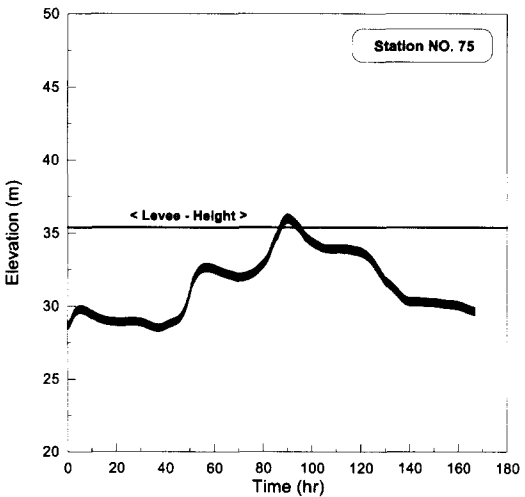


그림 14. 제방고와 수위의 변동성(No. 75)

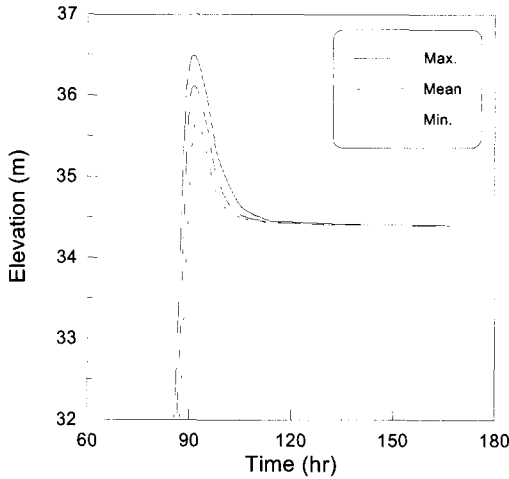


그림 15. 불확실도 해석을 통한 제내지의 범람수위

변동량을 가시적으로 확인할 수 있었다.

모형에 대한 불확실도 기법을 이용한 해석결과, 제방을 통해 월류되는 최대 월류량과 최소 월류량으로 인한 제내지에서 침수되는 범람수위와 함께 이 때의 범람면적을 검토하였다. 제내지에서의 범람수위는 불확실도의 요소에 따라 최고 36.49 m, 최저 35.68 m로서 ± 40.5 cm의 변동범위를 가지고 있었으며 수심에 대해서는 ± 4.99 %의 변동범위를 나타내고 있었다. 범람면적에 대해서는 최대 641.2 ha, 최소 535.4 ha로서 ± 52.9 ha 정도의 변동범위를 가지는 것으로 나타났다. 그림 15는 주요 월류지점 No. 82, 79, 78, 75 지점에서의 동시다발적 홍수범람으로 인한 제내지에서의 범람수위를 불확실도 기법에 따른 최대 및 최소 변화양상을 시간에 대해 도시한 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 DWOPER 모형에 대해서 Monte-Carlo 기법을 적용한 DWOPER-LEV 모형을 개발하였고, 하천의 홍수범람에 따른 홍수추적에서 그 영향이 검토되었다. 본 연구에서 개발된 모형은 남한강 유역의 여주지역 홍수범람에 적용하여 그 활용성을 제시하였다.

여주지역에 대한 추계학적 홍수위 해석결과를 이용하여 주요 월류위험 지점에서 제방고와 홍수위를 비교한 결과 평균적인 홍수위가 하천제방을 2.04~0.458 m 범위로 상회하는 월류가 발생하였고, 하도단면 및 조도

계수의 불확실도를 고려한 경우에 대해서 이 구간에서의 최고 및 최저 수위를 산정하였으며, 이에 대한 월류위험도는 84~100 %의 범위로 나타났다. Monte-Carlo 모의에 의한 해석결과 여주지역에서 범람모의에 있어 제내지의 범람수심은 최대 36.49 m, 최소 35.68 m로 나타나 ± 40.5 cm의 변동범위를 가지고 있었으며 수심에 대해서는 ± 4.99 %의 변동범위를 가지는 것으로 나타났다. 본 연구모형은 국내 하천유역의 홍수범람 예측에 합리적인 해석결과를 제시함으로써 불확실도 기법을 도입한 범람홍수의 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- 이종태, 한건연 (1989). "하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수예측 모형." 한국수문학회지, 제22권, 제2호, pp. 223-231.
- 이종태, 한건연, 윤세의, 박재홍 (1995). "제내지에서의 범람 홍수와 해석을 위한 수치모형의 개발." 한국수자원학회지, 제28권, 제5호, pp. 163-174.
- 한건연, 박재홍 (1995). "도시하천에서의 홍수범람도 작성을 위한 2차원 모형의 개발." 한국수자원학회지, 제28권, 제6호, pp. 119-131.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997a). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 이론 및 모형." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 675-686.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997b). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 687-694.
- 이홍래, 한건연, 조원철 (1998). "댐붕괴 홍수모의에 대한 불확실도 해석." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제3호, pp. 337-345.
- Davis, D.W. (1991). *A risk and uncertainty based concept for sizing levee projects*. Special Report SP-24, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, pp. 231-249.
- Fread, D.L. (1985). *National Weather Service Operational Dynamic Wave Model*. Hydrologic Research Laboratory, NWS.
- Hydrologic Engineering Center. (1986). *Accuracy of computed water surface profiles executive*

- summary*. Technical Paper No. 114, US Army Corps of Engineers, pp. 1-24.
- Kung, C.S., and Yang, X.L. (1993). *Dam-break flood simulation and river parameter uncertainty*. Technical Report No. 65, Hydraulic Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Thomas, W.A. (1991). *Hydraulic uncertainty in water surface calculations*. Special Report SP-24, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, pp. 195-210.

(논문번호:98-013/접수:98.03.05/심사완료:98.06.01)