

조건부 비 초과 확률을 이용한 제방의 위험도 분석

A Risk Analysis of Levee by the Conditional Nonexceedance Probability

이상호*, 강태욱**, 최재훈***

Sang Ho Lee, Tae Uk Kang, Jae Hoon Choi

요 지

하천의 제방은 홍수 시, 유수를 원활하게 소통시키고, 제내지를 보호하기 위해 하천을 따라 축조한 시설이다. 이러한 제방의 설계에는 제방의 재료에 대한 기준뿐만 아니라 수리/수문학적 요소, 지반공학적 요소, 구조적 요소들이 요구된다. 본 연구에서는 제방의 설계 요소 가운데 수리/수문학적 요소의 하나인 월류에 대한 기준을 검토하였다. 우리나라는 제방의 설계 시, 월류에 대한 안전성 확보를 위해 여유고를 설정하고 있는데, 여유고의 기준은 계획홍수량의 규모에 따라 결정되어 있다. 반면에 미국은 제방 월류에 대한 안전성 평가 지표로서 여유고와 위험도 개념의 조건부 비 초과 확률(conditional nonexceedance probability; CNP)을 사용하고 있다. 조건부 비 초과 확률이란, 주어진 홍수의 정도 아래에서 목표 수위(target stage)가 초과되지 않을 확률이다. 본 연구에서는 국내에서 기 수립된 실제 하천의 제방고와 조건부 비 초과 확률, 여유고가 고려된 미국의 기준을 적용하여 도출된 제방 소요 높이에 근거하여 국내 기준의 적절성을 검토하였다.

핵심용어 : 제방, 여유고, 조건부 비 초과 확률

1. 서 론

우리나라에서는 하천 제방의 월류에 대한 기준으로서 제방의 여유고를 제시하고 있다. 한국수자원학회(2009)가 정의하는 제방의 여유고는 계획홍수량을 안전하게 소통시키기 위해서 하천에서 발생할 수 있는 여러 가지 불확실한 요소들에 대한 안전값으로 주어지는 여분의 제방 높이이다.

한국수자원학회(2009)는 계획홍수량의 크기에 따른 하천 제방의 여유고를 표 1과 같이 제시하고 있다. 한국수자원학회(2009)는 표 1에 제시된 제방의 여유고에 대하여 정확한 계산에 의해 결정된 것이 아니라 경험에 의해 정해진 값을 제시하면서, 다음의 두 가지 사항을 고려하여 여유고가 확보될 수 있도록 계획해야 함을 언급하고 있다. 첫 번째는 제방의 유지, 수문량의 불확실성, 하도소통능력의 불확실성을 고려한 안전율의 개념이고, 두 번째는 하도 내의 토사퇴적, 지반 침하 등의 하천 지반의 변화이다. 즉, 우리나라에서는 월류에 대한 안전율과 장래 하천 지반의 변화에 따른 불확실성을 고려하기 위해 경험적인 여유고를 사용하고 있다.

미국의 경우, 하천 제방의 월류에 대한 안전성을 평가하는 기관이 연방 재난 관리국(Federal Emergency Management Agency; FEMA)과 미 공병단(U. S. Army Corps of Engineers)으로 구분된다. 연방 재난 관리국에서는 우리나라의 제방 설계 기준과 동일하게 여유고를 사용하고 있고,

* 정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수 · E-mail : peterlee@pknu.ac.kr

** 정회원 · 부경대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : ktw62@hanmail.net

*** 부경대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : neva79@nate.com

미 공병단은 조건부 비 초과 확률(conditional nonexceedance probability; CNP)으로써 제방의 안전성을 검토하고 있다. 여기서, 조건부 비 초과 확률이란, 특정한 재현기간의 홍수가 발생할 때 목표 수위(target stage)를 초과하지 않을 확률이다.

U. S. Army Corps of Engineers(1997)에 의하면, 미국의 하천 제방 월류에 대한 안전성 평가 기준은 표 2와 같다. 표 2에서 FL(FEMA Level)과 CL(Corps Level)은 각각 연방 재난 관리국과 미 공병단의 기준을 의미한다. 이러한 미국의 제방 월류에 대한 기준은 과대 또는 과소 설계를 방지하기 위함이다.

본 연구에서는 국내에서 기 수립된 하천기본계획의 자료에 대하여 미국에서 사용하고 있는 하천 제방의 월류에 대한 안전성 평가기준을 적용하여 그 결과를 검토하였다.

표 1. 우리나라의 계획홍수량에 따른 제방의 여유고

계 획 홍 수 량 (m ³ /sec)	여 유 고(m)
200 미만	0.6 이상
200 이상 ~ 500 미만	0.8 이상
500 이상 ~ 2,000 미만	1.0 이상
2,000 이상 ~ 5,000 미만	1.2 이상
5,000 이상 ~ 10,000 미만	1.5 이상
10,000 이상	2.0 이상

표 2. 미국의 하천 제방 월류에 대한 안전성 평가 기준

구 분	적용 기준	설 명
FL < CL90	CL90	- FL: 100년 빈도 홍수위에 여유고 3 feet를 더한 높이
CL90 < FL < CL95	FL	- CL90: 100년 빈도 홍수에 대한 조건부 비 초과확률이 90 %인 높이
FL > CL95	CL95	- CL95: 100년 빈도 홍수에 대한 조건부 비 초과확률이 95 %인 높이

2. 조건부 비 초과 확률의 계산 절차와 모형

2.1 조건부 비 초과 확률의 계산 절차

조건부 비 초과 확률을 계산하기 위해서는 그림 1과 같이 불확실성을 포함한 초과확률(p)-유량(Q)관계와 수위(H)-유량(Q)관계 곡선이 요구된다. 각 그림의 실선은 관측 또는 모의에 의해 결정된 초과확률-유량, 수위-유량의 관계이다. 그리고 파선은 이들의 관계의 불확실성에 따라 결정된 신뢰 한계(confidence limit)를 나타낸다. 여기서, 신뢰 한계 내의 불확실성은 그림 1에서와 같이 특정한 확률 분포로 정의될 수 있다.

조건부 비 초과 확률의 계산 과정을 그림 1에서 표시된 일점쇄선을 기준으로 설명하면 다음과 같다.

- ① 특정한 초과확률(p^*)과 목표수위의 결정
- ② 초과확률(p^*)에 대한 Q^* 의 산정
- ③ Q^* 에 대한 H^* 의 산정

- ④ H^* 의 목표수위 초과여부 판별
- ⑤ ②~④를 N회 반복 후, 목표수위를 초과한 횟수(n) 산정
- ⑥ 조건부 비 초과 확률 = $\frac{N-n}{N}$

이때, N회의 반복계산은 Monte Carlo 모의기법 등이 사용된다. 그림 2는 이러한 과정을 통해 조건부 비 초과확률의 결정 결과를 예로서 나타낸 것이다. 다만, 그림 2에서는 상기의 절차와 달리 100년 빈도 홍수(1 % 초과확률)에 대하여 조건부 비 초과 확률이 90 %가 되는 수위를 역으로 추정하는 그림이다.

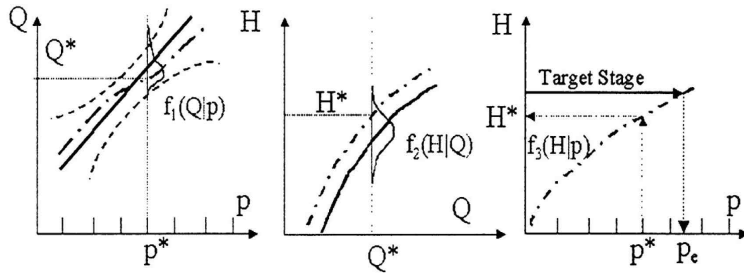


그림 1. 조건부 비초과 확률의 계산 과정

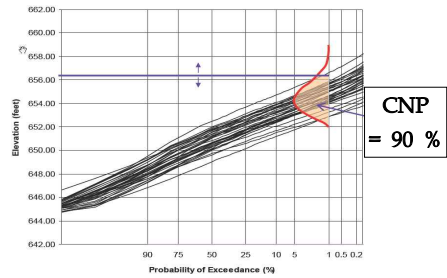


그림 2. 조건부 비 초과 확률의 산정

2.2 조건부 비 초과 확률의 계산 모형

본 연구에서는 조건부 비 초과 확률의 계산을 위해 미 공병단에서 개발한 HEC-FDA(Flood Damage Reduction Analysis)를 이용하였다. U. S. Army Corps of Engineers(2008)에 의하면, HEC-FDA는 홍수피해 저감 대책을 세우고 평가할 수 있는 수문 및 경제성 분석 프로그램이다. 즉, HEC-FDA는 연 기대 피해액(Expected Annual Damage; EAD)을 구하기 위한 프로그램이나, 본 연구에서는 피해와 관련된 경제성 분석의 내용은 제외하고 조건부 비 초과 확률을 계산하는 부분만을 이용하였다.

3. 조건부 비 초과 확률의 산정

3.1 대상 지점

본 연구에서는 실제 하천기본계획이 수립된 영천강의 특정 지점들에 대하여 우리나라와 미국의 기준에 의한 제방고를 검토하였다. 경상남도(2007)에 의하면, 지방2급 하천인 영천강은 국가하천인 남강의 지류로서 유역면적은 205.90 km^2 이고, 유로연장은 35.56 km이다. 본 연구에서 선정한 영천강의 대상지점은 총 3곳으로 계획홍수량(100년 빈도)이 상이한 지점으로 선정하였다(표 3).

표 3. 대상 지점의 계획홍수위와 국내 기준에 의해 수립된 제방고

측점 번호	하류로부터 거리(m)	계획 홍수량(m^3/s)	계획 홍수위(EI. m)	계획 제방고(EI. m)
No. 6	600	1,909	21.50	22.70
No. 33	3,300	1,839	23.39	24.39
No. 51	5,100	1,632	24.61	25.61

3.2 조건부 비 초과 확률의 산정

본 연구에서는 영천강 내의 대상 지점 3곳에 대하여 100년 빈도 홍수에 대한 90 %와 95 %의 조건부 비 초과 확률을 산정하였다. 조건부 비 초과 확률의 산정에는 유량-빈도 곡선과 수위-유량 관계 곡선이 사용되고, 각각은 불확실성을 내포하여 입력된다.

유량-빈도의 불확실성은 HEC-FDA 내의 도해법(graphical exceedance probability method)을 이용하였다. 수위-유량 관계 곡선의 불확실성은 HEC-RAS를 통해 조도계수를 달리 적용하여 발생하는 수위의 오차를 이용하였고, 수위의 오차는 정규분포를 따르는 것으로 가정하였다. 이 때, 조도계수는 0.027~0.037의 범위 내에서 정규 분포를 따르는 것으로 가정하여 30개의 자료를 난수 발생시켜 사용하였다. 그림 3과 4는 각각 대상 지점 중 No.33 지점의 초과확률-유량, 수위-유량의 불확실성을 나타낸다.

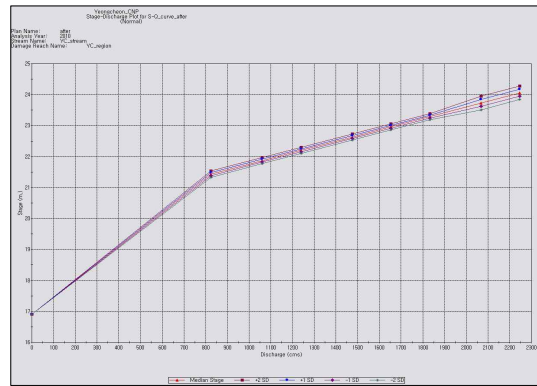
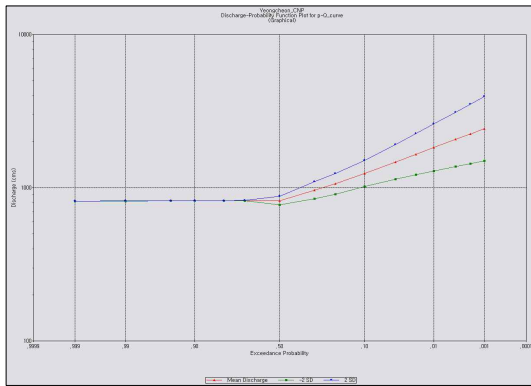


그림 3. 초과확률-유량의 불확실성(No.33) 그림 4. 수위-유량의 불확실성(No.33)

표 4는 100년 빈도 홍수에 대하여 각 대상지점의 90 %와 95 %의 조건부 비 초과 확률을 계산한 결과이다. HEC-FDA의 경우, 특정한 목표 수위를 지정하여 조건부 비 초과 확률을 계산하므로 본 연구에서는 그림 2에서와 같이 조건부 비 초과 확률이 90 %와 95 % 이상을 만족하는 수위를 반복 수행하여 결정하였다. 대상지점들의 조건부 비 초과 확률이 90 %와 95 %에 해당하는 수위의 차이는 4~10 cm인 것으로 분석되었다.

표 4. 100년 빈도 홍수에 대한 비 초과 확률 계산 결과

대상 지점	100년 빈도 홍수에 대한 조건부 비 초과 확률				수위차 (cm)
	CNP 90 % 이상	수위(EI. m)	CNP 95 % 이상	수위(EI. m)	
No. 6	90.56	21.86	95.71	21.90	4
No. 33	90.11	24.02	95.23	24.11	9
No. 51	90.05	25.28	95.10	25.38	10

4. 결과

대상지점에 대하여 국내에서 기 수립된 계획 제방고와 미국의 기준을 적용 시 소요되는 제방고를 비교, 검토하였다(표 5). 표 2에서 제시한 바와 같이 미국의 경우, FL, CL90, CL95의 크기에 따라 적용 기준이 달라진다. 본 연구에서 검토된 모든 지점에서는 FL > CL95 이므로 CL95의 기준에 따라 제방고가 계획된다. 즉, 조건부 비 초과 확률 95 %에 해당하는 수위가 제방고가 된다.

본 연구에서 검토된 대상 지점에 대하여 국내 기준에 따라 수립된 계획 제방고는 미국의 기준에 비해 0.23~0.80 m 큰 것으로 검토되었다. 대상 지점 중 No. 6은 영천강 하류부로서, 하류에 위치한 남강에 의한 배수 효과를 고려하여 국내에서는 추가적인 여유고(0.2 m)를 고려한 것으로 생각되는데, 이에 따라 상대적으로 더 큰 차이를 나타낸 것으로 판단된다. 그리고 중상류에 해당하는 No. 33과 51에서의 차이는 약 30 cm인 것으로 검토되었다.

표 5. 대상지점에 대한 우리나라와 미국의 제방고 비교

대상 지점	계획 홍수위 (El. m)	우리나라 기준		미국의 기준			우리나라 제방고 - 미국 제방고 (m)
		계획 제방고 (El. m)	여유고 (m)	CNP 90%	CNP 95 % (채택)	3 feet(0.91 m) 여유고	
No. 6	21.50	22.70	1.20	21.86	21.90	22.41	0.80
No. 33	23.39	24.39	1.00	24.02	24.11	24.30	0.28
No. 51	24.61	25.61	1.00	25.28	25.38	25.52	0.23

5. 결론

본 연구에서는 국내에서 제방의 월류에 대한 안전성을 고려하기 위해 사용되고 있는 제방의 여유고와 미국에서 사용되고 있는 여유고 및 조건부 비 초과 확률을 통한 월류의 안전성을 실제 하천에 적용하여 비교·검토하였다. 그 결과, 우리나라의 기준에 의해 수립된 제방고가 미국의 기준에 의해 검토된 제방의 소요 높이보다 약 0.3~0.8 m 큰 것을 확인할 수 있었다. 즉, 우리나라에서 사용하고 있는 여유고는 수문량의 불확실성 등을 고려하여 다소 과다 설계되고 있는 것으로 검토되었다. 따라서 보다 합리적인 방법에 의한 제방의 여유고 설정이 요구된다.

본 연구에서는 제방고 설정에 대한 국내 기준과 미국의 기준을 검토함에 있어서 대상 지점을 하나의 하천과 하천의 전체 구간 중 일부 지점만을 한정하여 결과를 검토하였다. 따라서 보다 다양한 하천과 많은 지점에 대한 검토를 통해, 국내에서 사용하고 있는 제방의 여유고에 대한 적절성 평가와 선진 기술 도입의 타당성 검토가 요구된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 경상남도 (2007). 영천강 하천정비기본계획 보고서, 한국종합기술.
2. 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준·해설.
3. U. S. Army Corps of Engineers (1997). *Guidance on Levee Certification for the National Flood Insurance Program*. CECW-P/CECW-E.
4. U. S. Army Corps of Engineers (2008). *HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis User's Manual*.