

## 우리나라와 미국의 제방고 산정 기법에 대한 비교 분석

### A Comparison and Analysis of the Levee Height Determination Methods in Korea and the USA

강 태 옥\* / 이 상 호\*\* / 류 권 규\*\*\*

Kang, Taeuk / Lee, Sangho / Yu, Kwonkyu

#### Abstract

A levee height is determined by adding a deterministic freeboard to a flood water level in Korea. In the USA, a levee height is determined by choosing a value conditionally among the freeboard criteria and the levels resulted from a probabilistic method. The probabilistic method adopts a conditional non-exceedance probability (CNP) which is the probability that the target stage will not be exceeded given a specific flood event. The purpose of the study is to compare Korean criterion for levee height estimation with that of the USA. Levee heights were determined according to the above two criteria at twenty-five cross sections in five streams. The results show that Korean criterion on average yields levee heights 20 cm higher than those calculated by the criterion of the USA. The larger the flood discharges become, the higher the levee height differences are usually. It is caused by the freeboard estimation criterion of Korea that the larger design flood is, the higher freeboard is given. Korean criterion, however, resulted in lower levee heights for smaller streams than those by the criterion of the USA. To sum it up, the Korean levee height criteria can result in overestimation or underestimation depending on flood discharge amount, being compared with the criteria of the USA. The Korean freeboard especially needs to be increased for smaller flood discharges.

**Keywords** : levee height, freeboard, probabilistic method, conditional non-exceedance probability

#### 요 지

우리나라에서는 하천의 제방고를 계산된 계획홍수위에 확정론적인 여유고를 더하여 산정한다. 이에 반해 미국에서는 여유고와 불확실성을 고려한 확률론적인 방법을 조건에 따라 적용하여 경제적인 설계가 될 수 있도록 제방고를 결정한다. 미국에서 제방고 산정에 사용되는 구체적인 확률 개념은 조건부 비 초과 확률로서, 이는 특정한 빈도의 홍수가 발생할 때 목표 수위를 초과하지 않을 확률이다. 본 연구에서는 우리나라의 현행 제방고 산정 기준과 미국 기준을 비교하기 위해 5개 하천의 25개 지점에 대하여 제방고를 산정 후, 비교·검토하였다. 그 결과, 계획홍수량의 규모가 증가할수록 우리나라 기준에 의한 제방고가 미국의 기준에 의한 제방고보다 커지는 것으로 나타났다. 이는 계획홍수량이 증가함에 따라 상대적으로 여유고가 큰 폭으로 커지는 우리나라의 기준에 기인한 것이다. 반면에, 낮은 여유고가 고려되는 소규모 하천의 경우, 우리나라 기준에 의해 결정된 제방고가 미국 기준에 의한 제방고보다 다소 낮은 것으로 평가되었다. 즉, 우리나라의 제방고 산정 기준은 유량에 따라서 미국의 기준에 비해 다소 과소 또는 과대 설계가 될 가능성이 있는 것으로 분석

\* 부경대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (e-mail: ktw62@hanmail.net)

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

\*\* 교신저자, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

\*\*\* 동의대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dong-eui Univ., Busan 614-714, Korea

되었다. 특히, 소규모 하천의 경우는 여유고를 증가시키도록 설계 기준을 개정할 필요가 있다.

**핵심용어** : 제방고, 여유고, 확률론적 방법, 조건부 비 초과확률

## 1. 서 론

한국수자원학회 (2009)는 제방의 정의를 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물로 하고 있다. 이러한 제방의 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 제방이 파괴의 위험으로부터 안전해야 한다. 본 연구에서는 제방의 안전을 위협할 수 있는 다양한 요소 중 홍수로 인해 하천수가 제방을 넘어 발생하는 월류를 억제하기 위한 기술을 검토하였다.

우리나라에서 사용하고 있는 제방의 월류 억제를 위한 기준은 여유고이다. 즉, 하천의 계획홍수위에 여유고를 더한 높이를 제방고로 설정하고 있다. 한국수자원학회 (2009)는 제방 여유고의 정의를 계획홍수량을 안전하게 소통시키기 위해 하천에서 발생할 수 있는 여러 가지 불확실한 요소들에 대한 안전값으로 주어지는 여분의 제방 높이로 하고 있다. 이에 따라 한국수자원학회 (2009)는 계획홍수량의 크기에 따른 하천 제방의 여유고를 제시하고 있다. 우리나라와 달리 미국에서는 불확실성 (uncertainty)을 고려한 확률론적 개념을 도입하여 제방고 산정에 활용하고 있다. 미국에서 제방고 산정에 사용되는 구체적인 확률 개념은 조건부 비 초과 확률 (conditional non-exceedance probability; CNP)로서, 이는 특정한 빈도의 홍수가 발생할 때 목표 수위 (target stage)를 초과하지 않을 확률이다.

과거 미국에서도 우리나라와 유사하게 제방고 결정 시 여유고만을 사용하였다. 하지만 확정론적 제방 여유고는 대상 하천의 지형학적 특징과 수문학적 특성을 고려하지 않은 지표로서, 동일한 여유고일지라도 지역마다 해당 빈도 홍수에 대한 홍수 방어 수준이 다른 것을 인지하였다. 또한, 경우에 따라서는 확정론적 여유고를 이용하여 건설된 제방이 불필요하게 높게 건설되는 것으로 분석되어 경제적 비용 편익에 대한 의구심을 갖게 되었다. 이에 따라 미국에서는 1990년대 초반부터 위험도 분석 기반의 확률론적 제방고 산정 기술에 대한 관심을 가지기 시작했다 (Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction et al., 2005).

국내에서는 확률론적인 방법으로 제방고를 평가한 사례는 없다. 다만, 이홍래 등 (1998)은 불확실성을 고려한 DWOPER-LEV 모형을 개발하여 홍수범람에 따른 제방의 월류위험도와 가능 범람수위를 예측하였고, 윤용남 등

(2000)은 HEC-FDA를 이용하여 섬강을 대상으로 불확실성을 고려한 홍수피해 저감 계획 수립의 필요성을 제시하였다. 그리고 김종해 등 (2003)은 확률론적 홍수위 계산을 통해 제방 월류에 대한 제내지 범람특성을 해석할 수 있는 모형을 개발한 바 있다.

기 수행된 연구들은 확률론적 방법을 이용하여 제방 월류 현상 모의와 피해규모 예측 등에 초점이 맞추어져 있다. 본 연구에서는 보다 근본적인 주제로서, 확률론적 방법이 포함된 미국의 제방고 산정 기술과 우리나라의 기준을 실제 국내 하천에 적용하여 현행 우리나라의 제방고 산정 기준의 적절성을 검토하였다. 본 연구에서는 Interagency Advisory Committee on Water Data (1982)와 U.S. Army Corps of Engineers (1996)에서 제시하고 있는 확률론적 제방고 산정 기술을 이용하여 연구를 수행하였다. 그리고 확률론적 방법의 조건부 비 초과 확률의 계산에는 미 공병단에서 개발한 HEC-FDA (Flood Damage Reduction Analysis)를 이용하였다.

## 2. 제방고 산정 방법

### 2.1 국내·외의 제방고 산정 기준

#### 2.1.1 우리나라의 여유고 산정 기준

우리나라의 제방 여유고 산정 기준은 계획홍수량의 크기에 따라 결정된다. Table 1은 한국수자원학회 (2009)에서 제시하고 있는 우리나라의 제방 여유고 산정 기준이다. 이러한 국내의 제방 여유고 산정 기준은 일본의 建設省 (2003)에서 제시하는 기준과 동일하다.

한국수자원학회 (2009)는 Table 1에 제시된 제방의 여

**Table 1. Freeboard Depending on Flood Discharge Amount in Korea**

Design Flood Discharge (m <sup>3</sup> /sec)	Freeboard (m)
Under 200	0.6 or more
200 ~ 500	0.8 or more
500 ~ 2,000	1.0 or more
2,000 ~ 5,000	1.2 or more
5,000 ~ 10,000	1.5 or more
Over 10,000	2.0 or more

유고에 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, 하도 소통능력의 불확실성을 고려한 안전율의 개념이고, 두 번째는 하도 내의 토사퇴적, 지반 침하 등의 하천 지반의 변화이다. 즉, 우리나라에서는 월류에 대한 안전율과 하천 지반의 불확실성을 고려하기 위해 경험적인 여유고를 사용하고 있다.

### 2.1.2 미국의 제방고 산정 기준

미국의 제방고 결정 기준은 우리나라와 유사하게 고정된 여유고를 고려하는 방법과 확률론적인 조건부 비 초과 확률을 이용하는 방법으로 구분된다. 고정된 여유고를 사용하는 방법은 연방 재난 관리국(Federal Emergency Management Agency; FEMA)의 기준이고, 조건부 비 초과 확률을 이용하는 방법은 미 공병단의 기준이다. 두 가지 방법은 혼용되다가 1997년에 통합 적용 방안이 마련되었다.

U.S. Army Corps of Engineers (1997a)에서 제시한 미국의 제방고 산정 기준은 Table 2와 같다. Table 2에서 FL(FEMA Level)과 CL(Corps Level)은 각각 연방 재난 관리국과 미 공병단의 기준을 의미한다. Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction et al. (2005)은 이러한 미국의 제방고 산정 기준의 개정 이유를 과대 또는 과소 설계를 방지하기 위한 것으로 기술하였다.

## 2.2 확률론적 제방고 산정 방법

### 2.2.1 조건부 비 초과 확률의 산정 절차

조건부 비 초과 확률을 계산하기 위해서는 Fig. 1과 같이 불확실성을 포함한 유량(Q)-초과확률(p)의 함수와 수위(H)-유량(Q)의 관계가 요구된다. 각 그림의 실선은 관측 또는 모의에 의해 결정된 유량-확률, 수위-유량의 관계이고, 파선은 이들 관계의 불확실성에 따라 결정된 신뢰 한계(confidence limit)를 나타낸다. 여기서, 신뢰 한계 내의 불확실성은 특정한 확률 분포로 정의될 수 있다. 그리고 일점쇄선은 Monte Carlo 모의기법 등의 난수 발생 기법에 의해 추정된 실제 발생 가능한 하나의 곡선이다. 조건부 비 초과 확률의 계산 과정을 Fig. 1에 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 =  $\frac{N-n}{N}$

상기에서 언급된 Monte Carlo 모의기법은 특정한 확률 분포를 갖는 임의의 변수를 발생시키고, 반복 수행 과정을 포함한다(Ang and Tang, 1975; 김종해 등, 2003). 그리고 이러한 반복계산 방식은 선형 변환된 정수의 나머지를 계산하는 것에 바탕을 두고 있다(건설교통부, 2002). 본 연구에서는 조건부 비 초과 확률 계산에 Monte Carlo 모의기법을 이용하는 HEC-FDA를 사용하였다. HEC-FDA

Table 2. Criteria for Levee Height Determination in the USA

Condition	Determination	Description
FL < CL90	CL90	- FL: 100-year flood water level plus 3 feet of freeboard - CL90: Level with a 90% conditional non-exceedance probability for 100-year flood
CL90 < FL < CL95	FL	- CL95: Level with a 95% conditional non-exceedance probability for 100-year flood
FL > CL95	CL95	

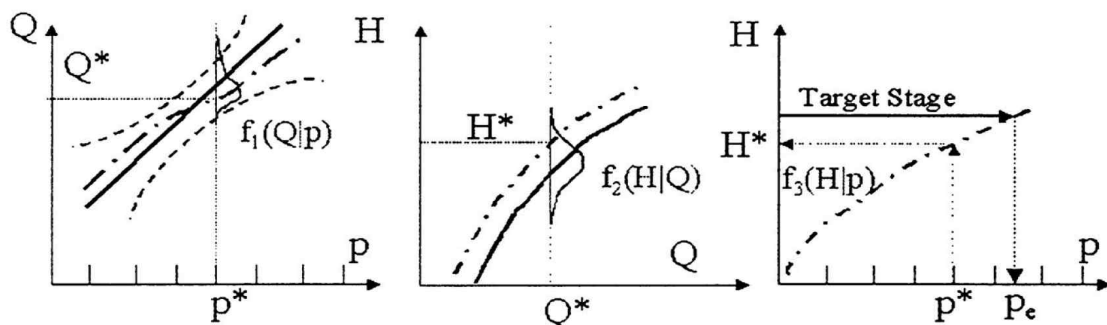


Fig. 1. A Estimation Procedure for the Conditional Non-exceedance Probability

에서는 선형 합동 방법 (linear congruential method)을 이용하여 난수를 발생시킨다 (Eq. (1)).  $X_n$ 은 이전단계에서 선택된 난수이고,  $X_{n+1}$ 은 현재 발생된 난수,  $a$ 와  $b$ 는 상수,  $m$ 은 나누는 수,  $\text{mod}$ 는 나머지 함수 (remainder function)이다 (U.S. Army Corps of Engineers, 2008).

$$X_{n+1} = \frac{(aX_n + b) \pmod{m}}{m} \quad (1)$$

### 2.2.2 유량-확률 함수의 불확실성 산정 방법

유량-확률 함수는 수집된 유량자료의 특성에 따라 직접 해석법 (direct analytical approach), 합성법 (synthetic approach), 도해법 (graphical approach)으로 구분된다.

직접 해석법은 관측된 연 최대유량 자료로 해석하는 방

법이다. 합성법은 미 계측 유역에 적용되는 방법으로서, 전이, 회귀식, 강우-유출 모형 등을 통해 산정된 유량으로 해석하는 방법이다. 두 방법은 모두 관측 또는 모의된 유량자료에 의한 유량-확률 관계가 대수 피어슨 III형 (log Pearson type III) 분포에 적합 (fit)될 경우에 사용된다. 반면에, 도해법은 유량-확률 관계가 대수 피어슨 분포에 적합하지 않을 때 사용하는 방법으로서, 주어진 자료에 확률을 부여하는 도시위치 (plotting position) 방법을 사용한다. 도시위치에 의한 유량-확률 관계는 순서통계 (order statistics)로 정의되는데, 자료를 가장 큰 것부터 나열하고 각 자료에 초과확률을 부여하여 결정된다.

대수 피어슨 III형 분포에 적합되는 조건인 직접 해석법과 합성법에 의한 유량-확률 함수의 불확실성은 평균, 표준편차, 왜곡도를 이용한 신뢰한계의 계산을 통해 추정

**Table 3. Estimation Methods for Uncertainty of Discharge-Probability Functions Calculated by Analytical Methods**

Equation	Description of Variables
Confidence limits $U_{p,c}(X) = \bar{X} + S \times (K_{p,c}^U)$ $L_{p,c}(X) = \bar{X} + S \times (K_{p,c}^L)$	$X$ : Logarithmic mean of the estimated log Pearson Type III discharge-probability function $S$ : Logarithmic standard deviation of the estimated log Pearson Type III discharge-probability function $C$ : Probability in $L_{p,c} < X < U_{p,c}$
Confidence coefficients $K_{p,c}^U = \frac{K_{G_{w,p}} + \sqrt{K_{G_{w,p}}^2 - ab}}{a}$ , $K_{p,c}^L = \frac{K_{G_{w,p}} - \sqrt{K_{G_{w,p}}^2 - ab}}{a}$ $a = 1 - \frac{Z_C^2}{2(N-1)}$ , $b = K_{G_{w,p}}^2 - \frac{Z_C^2}{N}$	$K_{p,c}^U, K_{p,c}^L$ : Upper and lower confidence coefficients $K_{G_{w,p}}$ : Pearson deviate for $P$ probability event with skewness, $G_w$ $Z_C$ : Standard normal deviate with cumulative probability, $C$ $N$ : Equivalent record length

**Table 4. Equivalent Record Length Guidelines (U.S. Army Corps of Engineers, 1996)**

Method of Frequency Function Estimation	Equivalent Record Length
Analytical distribution fitted with long-period gauged record available at site	Systematic record length
Estimated from analytical distribution fitted for long-period gauge on the same stream, with upstream drainage area within 20% of that of point of interest	90% to 100% of record length of gauged location
Estimated from analytical distribution fitted for long-period gauge within same watershed	50% to 90% of record length
Estimated with regional discharge-probability function parameters	Average length of record used in regional study
Estimated with rainfall-runoff-routing model calibrated to several events recorded at short-interval event gauge in watershed	20 to 30 years
Estimated with rainfall-runoff-routing model with regional model parameters (no rainfall-runoff-routing model calibration)	10 to 30 years
Estimated with rainfall-runoff-routing model with handbook or textbook model parameters	10 to 15 years

된다 (Table 3). 신뢰한계의 산정에 사용되는 자료 기간 (N)은 유량-확률분포 추정에 사용된 자료 특성에 따라 등가 자료 기간 (equivalent record length)을 통해 결정된다 (Table 4).

U.S. Army Corps of Engineers (1997b)는 도해법을 이용한 유량-확률의 관계와 불확실성 산정에 관하여 베타 함수 (beta function)를 이용하는 방법을 제시하였다. Eq. (2)는 오름차순으로 정리된 유량인  $Y_j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, n$ ,  $n$ 은 자료의 연수)를 베타함수를 이용하여 확률을 부여하는 방법이다. 여기서  $p = F(Y_p)$ 는 비 초과 확률이고,  $B(j, n-j+1)$ 는 베타함수,  $IB_p(j, n-j+1)$ 는 불완전 베타함수 (incomplete beta function)이다. 부여된 확률에 대한 유량의 불확실성은 정규분포로 가정되고, 정규분포의 표준편차는 Eq. (3)과 같이 산정된다. Eq. (3)에서 S는 빈도곡선의 표준편차, M은 빈도곡선의 평균, X는 초과확률 q에 상응하는 유량,  $Z_q$ 는 표준화 변수를 나타낸다. Eq. (3)에서 사용되는 빈도곡선의 평균과 표준편차는 사다리꼴 적분 공식을 이용하여 Eqs. (4) and (5)로 각각 산정된다.

$$P[Y_p \geq Y_j] = \frac{1}{B(j, n-j+1)} \int_0^p z^{j-1} (1-z)^{n-j} dz \quad (2)$$

$$= IB_p(j, n-j+1)$$

$$S_x^2 = \frac{S^2}{n} + Z_q^2 \frac{S^2}{2n}, \quad Z_q = \frac{X-M}{S} \quad (3)$$

$$M = \sum_{i=2}^n 0.5(Y_{i-1} + Y_i) \quad (4)$$

$$\frac{IB_q(i, n-i+1) - IB_q(i-1, n-i)}{IB_q(n, 1) - IB_q(1, n)}$$

$$S^2 = \sum_{i=2}^n 0.5(Y_{i-1} - M)^2 + (Y_i - M)^2 \quad (5)$$

$$\frac{IB_q(i, n-i+1) - IB_q(i-1, n-i)}{IB_q(n, 1) - IB_q(1, n)}$$

### 2.2.3 수위-유량 관계의 불확실성 산정 방법

U.S. Army Corps of Engineers (1996)는 수위-유량 관계의 불확실성에 대하여 자연적 불확실성 (natural uncertainty)과 모형에 의한 불확실성 (model uncertainty)을 제시하였다. 그리고 수위-유량 관계의 총 불확실성 ( $S_t$ )을 자연적 불확실성 ( $S_{natural}$ )과 모형에 의한 불확실성 ( $S_{model}$ ) 등을 결합한 Eq. (6)과 같이 제시하였다. 그리고 이러한 불확실성은 표준편차로 정의된다.

$$S_t = \sqrt{S_{natural}^2 + S_{model}^2 + \dots} \quad (6)$$

U.S. Army Corps of Engineers (1996)는 수위-유량 관계의 자연적 불확실성 추정 방법을 계측된 자료의 유무에 따라 구분하였다. Table 5는 수위-유량 관계의 자연적 불확실성을 추정하는 수식을 정리한 표이다. 계측 하천의 불확실성은 관측된 수위와 수위-유량 관계에 의한 수위의 차이인 잔차 (residual)를 이용하여 산정되고, 미 계측 하천에서는 경험식으로 산정된다. U.S. Army Corps of Engineers (1996)는 미 계측 하천에 대한 불확실성 산정식에 대하여 물리적인 근거에 기반하고 있는 수식은 아니지만, 미 계측 하천에 대하여 현장조사에 의한 지형자료와 예측된 100년 빈도 홍수량으로부터 합리적인 결과를 확보할 수 있는 것으로 기술하고 있다. Table 6은 미 계측 하천의 수위-유량 관계의 표준편차 산정에 필요한 하상 재료에 따른 식별 수치를 나타낸다.

Table 5. Estimation Methods for Uncertainty of Stage-Discharge Relationships

Classification	Equation	Parameters	
Guaged stream (a)	$S_{natural} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}{N-1}}$	$X_i$	Stage for observation i which corresponds with discharge $Q_i$
		M	Best-fit curve estimation of stage corresponding with $Q_i$
		N	Number of stage-discharge observations in the range being analyzed
Unguaged stream (b)	$S_{natural} = [0.07208 + 0.04936 I_{Bed} - 2.2626 \times 10^{-7} A_{Basin} + 0.02164 H_{Range} + 1.4194 \times 10^{-5} Q_{100}]^2$ $R^2 = 0.65$	$I_{Bed}$	Stream bed identifier (Table 6)
		$A_{Basin}$	Basin area (km <sup>2</sup> )
		$H_{Range}$	The maximum expected or observed stage range (m)
		$Q_{100}$	100-year estimated discharge (m <sup>3</sup> /s)

**Table 6. Stream Bed Identifier (U.S. Army Corps of Engineers, 1996)**

Material	Size	Identifier	Material	Size	Identifier
Rock/Resistant Clay	-	0	Cobbles	64 to 256 mm	2
			Gravels	2 to 64 mm	3
Boulders	Over 256 mm	1	Sands	Under 2 mm	4

**Table 7. Minimum Standard Deviation of Error in Stage (U.S. Army Corps of Engineers, 1996)**

Manning's n Value Reliability	Standard Deviation (m)	
	Cross Section Based on Field Survey or Aerial Spot Elevation	Cross Section Based on Topographic Map with 0.607~1.524 m Contours
Good	0.09	0.18
Fair	0.21	0.27
Poor	0.4	0.46

하천 수위를 계산하는 수리학적 모형의 불확실성에는 지형 정보, 계산 단면의 간격, 조도계수의 정확도 등과 같은 불확실성이 포함된다. U.S. Army Corps of Engineers (1996)는 이 가운데 지형학적 정보와 조도계수의 추정값에 대한 신뢰도에 따라 수위 오차에 대한 최소의 표준편차를 제시하였다 (Table 7). Table 7에서 좋음은 계산에 사용된 모형이 다수의 관측 자료로 보정되었을 경우에 해당하고 보통은 한정된 자료로 보정되었을 경우, 나쁨은 모형 보정이 되지 않았을 경우에 각각 해당한다.

그리고 수위의 불확실성은 사용된 모형의 매개변수 변화에 따른 민감도 분석을 통해서도 추정될 수 있음을 제시하였다. 민감도 분석을 통해 수위의 불확실성을 산정할 경우, 해당 유량에 대한 상한 수위와 하한 수위를 결정해야 하는데, U.S. Army Corps of Engineers (1996)는 상·하한 수위의 결정 시 전문가적 판단을 통한 합리적인 범위의 선정이 요구됨을 기술하였다.

### 3. 대상 하천에 대한 제방고 산정

#### 3.1 대상 하천과 모형

##### 3.1.1 대상 하천

본 연구는 우리나라의 제방고 산정 기준의 적절성을 검토하는데 목적이 있다. 이를 위해 우리나라와 미국의 제방고 산정 기준을 적용할 적절한 대상 하천의 선정이 요구된다. 본 연구에서는 하천기본계획의 수립 연도가 오래되지 않고, 하천기본계획 수립 시 활용된 강우빈도 해석과 홍수량 및 홍수위 산정의 원시 자료가 확보 가능한 하천을 중심으로 대상 하천을 구성하였다. 해당 하천에 대

한 원시 자료의 수집은 후술되는 내용으로서 유량-확률 관계의 생성에 필요한 자료의 확보와 수위-유량 관계의 불확실성을 정의하기 위한 조도계수의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하기 위함이다.

연구에 사용된 하천은 모두 5개 하천이고, 해당 하천은 모두 경상남도 일대에 위치한 지방하천이다. 대상 하천에 대한 제방고 검토 지점은 상·중·하류를 고려한 하천 내 위치와 유량을 고려하여 5개 지점씩 선정되었다. Table 8은 본 연구에서 선정한 대상하천에 관한 정보를 요약한 표이다.

우리나라의 경우 하천기본계획 수립 시 하천의 중요도를 고려하여 계획빈도를 선정한다. 본 연구에서 대상으로 하는 하천들은 모두 지방하천으로서 영천강의 일부 구간만 제외하고는 모두 80년 빈도로 수립되었다. 반면에 미국의 제방고 산정 기준은 100년 빈도 홍수로 고정되어 있다. 본 연구에서는 두 가지 관점에서 우리나라와 미국의 기준에 의한 제방고를 비교하였다. 첫 번째는 미국의 기준에 맞추어 모든 대상지점의 설계 빈도를 100년으로 설정하여 제방고를 비교하는 것이고, 두 번째는 미국의 100년 빈도 홍수에 대한 제방고와 우리나라의 하천기본계획에서 설정한 설계 빈도에 해당하는 제방고를 비교하는 것이다. 전자는 우리나라와 미국의 제방고 설정에 관한 개념적 차이를 검토하기 위함이고, 후자는 실질적 차이를 검토하기 위함이다.

##### 3.1.2 조건부 비 초과 확률의 산정 모형

본 연구에서는 조건부 비 초과 확률의 산정에 미 공병단에서 개발한 HEC-FDA를 이용하였다. U.S. Army Corps of Engineers (2008)에 의하면, HEC-FDA는 홍수피해 저

**Table 8. Information for the Investigated Streams**

Name	Class	Location	Basin Area (km <sup>2</sup> )	Main Stream Length (km)	Basin Width (km)	Shape Factor	Design Frequency (year)	Established Year for Master Plan
Yeongcheongang	Regional stream	Jinju-si, Gyeongsangnam-do	205.90	35.56	5.79	0.16	80, 100	2007
Danjangcheon	Regional stream	Yangsang-si, Gyeongsangnam-do	63.09	15.97	3.95	0.25	80	2006
Jomangang	Regional stream	Kimhae-si, Gyeongsangnam-do	18.75	7.00	2.68	0.38	80	2005
Hwanggang	Regional stream	Geochang-gun, Gyeongsangnam-do	63.80	14.60	4.37	0.30	80	2003
Cheongokcheon	Regional stream	Uiryong-gun, Gyeongsangnam-do	12.85	7.17	1.79	0.25	80	2009

감 대책을 세우고 평가할 수 있는 수문 및 경제성 분석 프로그램이다. 즉, HEC-FDA는 연 기대 피해액 (Expected Annual Damage; EAD)을 산정하기 위한 프로그램이나, 본 연구에서는 피해와 관련된 경제성 분석의 내용은 제외하고 조건부 비 초과 확률을 계산하는 부분만을 이용하였다. 실제로 Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction et al. (2005)은 HEC-FDA를 이용하여 조건부 비 초과 확률을 산정할 수 있음을 제시하였다.

### 3.2 조건부 비 초과 확률의 산정

#### 3.2.1 유량-확률의 관계

대상 하천은 모두 미 계측하천으로서 측정된 유량 자료가 없다. 따라서 유량-확률의 관계는 2.2.2절에서 제시한 합성법 또는 도해법을 통해 산정되어야 한다.

합성법의 경우 모의된 유량-확률의 관계가 대수 피어슨 III형을 따를 경우에 적용되는 방법이다. 우리나라에서는 일반적으로 하천기본계획 수립 시 대상 하천의 강우에 대한 빈도 분석을 수행하여 적정 확률분포형과 확률강우량을 결정하고, 이를 강우-유출 모형의 입력자료로 활용하여 빈도별 홍수량을 산정한다. U.S. Army Corps of Engineers (1997b)는 이러한 가상의 강우 사상들에 대한 유량-확률의 관계는 도해법이 적절한 것으로 제시하고 있다. 또한, 건설교통부 (2000)에 의하면, 우리나라 전역의 강우에 대한 지베 분포형은 Gumbel과 GEV 분포형이고, 이로부터 모의된 유량이 미국에서 유량-확률 관계에 일반적으로 사용되는 대수 피어슨 III형을 명확히 따른다고 보기 어렵다. 이를 감안하여 본 연구에서는 대상 하천의 유량-확률 관계를 도해법으로 산정하였다.

HEC-FDA는 유량-확률의 관계를 정의하기 위해 8개

확률에 대한 유량을 요구한다. 본 연구에서는 이를 위해 2, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200년 등의 재현기간에 대한 유량을 산정하였다. 그리고 HEC-FDA는 U.S. Army Corps of Engineers (1997b)에서 제시한 Eqs. (2)~(5)를 통해 특정한 빈도 유량에 대한 표준편차를 산정하고, 정규분포로 가정하여 불확실성을 정의한다. 이러한 불확실성을 정의하기 위해서는 유량-확률 자료를 도출하기 위해 사용된 자료년 수가 요구된다. 본 연구에서는 Table 4의 등가 자료 기간의 산정 지표 중 강우-유출 모형을 통해 유량을 산정한 기준에 따라 자료 기간을 10년으로 설정하였다.

Fig. 2는 대상 하천의 유량-확률 관계를 산정한 예이다. Fig. 2에서는 표시되지 않았지만, 특정 확률 빈도에 대한 유량의 분포는 정규분포이다.

#### 3.2.2 수위-유량의 관계

HEC-FDA에서 수위-유량의 관계의 불확실성은 수위-유량의 관계와 해당 수위-유량 관계의 표준편차로 정의된다. 본 연구에서 수위-유량의 관계는 각 하천별로 하천기본계획에서 제시된 빈도별 유량에 따른 수위가 사용되었다.

수위-유량 관계의 표준편차는 자연적 불확실성과 모형에 의한 불확실성에 의해 산정된다. 본 연구의 모든 대상 하천은 미 계측 하천이므로 U.S. Army Corps of Engineers (1997a)에서 제시한 Table 5의 (b)에 제시된 수식으로 표준편차를 산정하였다. Table 5의 (b)에 제시된 수식에서 하상재료 식별 수치 ( $I_{Bed}$ )는 각각의 하천기본계획 보고서에 제시된 하상토의 입도분석 결과를 이용하여 평균 입경을 산정한 후 추정되었다. 우효섭 (2002)에 의하면, 평균 입경은 체가름 시험에 사용된 체의 크기와 이를 통과한 하상토의 비율을 가중 평균하여 산정된다. 이를 적용

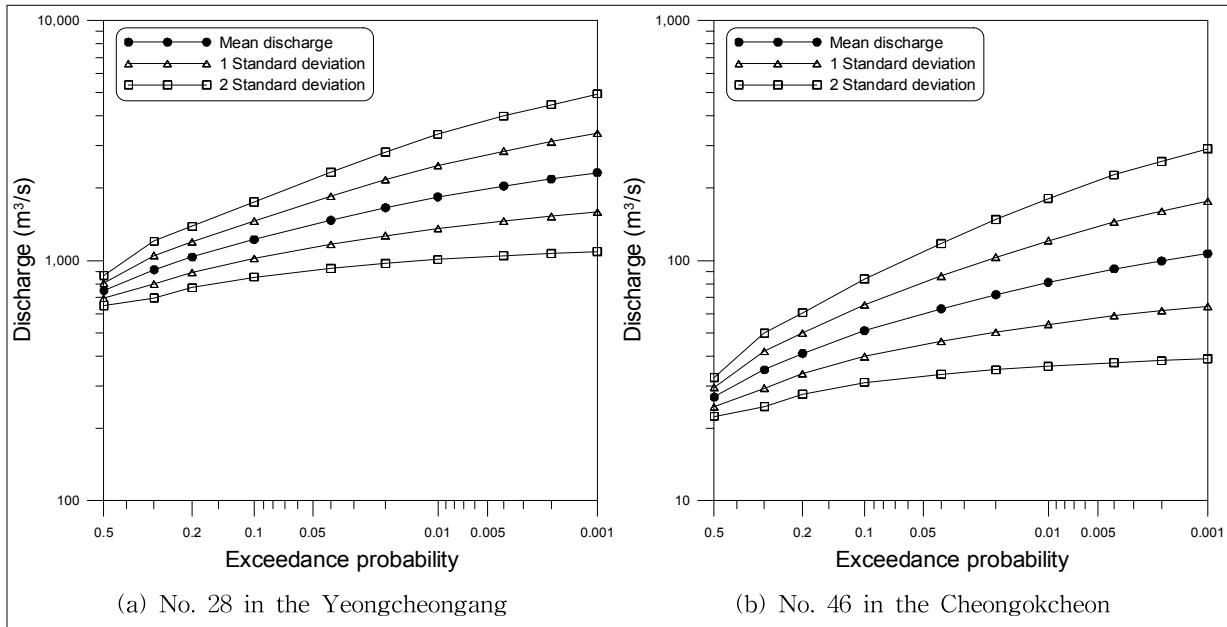


Fig. 2. Discharge-Probability Functions with Uncertainty for the Investigated Streams

Table 9. Mean Sizes of Bed Soil in the Investigated Streams

Stream	Measurement Location	Mean Size (mm)	Stream	Measurement Location	Mean Size (mm)
Yeongcheongang	No. 15	8.6	Hwanggang	No. -1-28	17.7
	No. 42	12.0		No. 08	13.4
	No. 89	13.4		No. 18	20.8
Danjangcheon	No. 10+73	8.5		No. 28	17.1
	No. 33	10.4		No. 45	26.7
	No. 66+10	5.4		No. 55+37	29.4
Jomangang	No. 06	3.1	Cheongokcheon	No. 29	20.0
	No. 17	2.6		No. 89	19.5
	No. 30	4.9		No. 129	20.0

하여 산정된 평균 입경은 Table 9와 같은데, 하천기본계획에서는 모든 측점에 대하여 하상토의 입도분석을 수행하지 않으므로 본 연구에서 검토된 지점과 하상토 입도분석을 수행한 지점이 일치하지는 않다. 하지만, 산정된 모든 지점의 평균 입경은 Table 6의 자갈 (2~64mm)에 해당되어 모든 대상 하천의 지점에 대하여 하상재료 식별 수치를 3으로 적용하였다. 그리고 수위의 최대 범위 ( $H_{Range}$ )는 100년 빈도 홍수위와 하상고와의 차로 가정하였다. 그리고 해당 지점의 상류부 유역면적 ( $A_{Basin}$ )과 100년 빈도 홍수량 ( $Q_{100}$ )은 하천기본계획에서 산정된 자료를 활용하였다.

수위-유량 관계의 모형에 의한 불확실성은 조도계수의 선정에 따른 민감도 분석을 통해 산정되었다. 본 연구에

서는 하천기본계획에서 사용한 조도계수를 중앙값으로 하고, 해당 조도계수의 상·하한의 범위를 30%로 가정하였다. 이는 한국수자원학회 (2009)에서 제시하고 있는 자연하천의 조도계수의 범위가 보통 0.035를 중심으로 0.025~0.045의 범위를 갖는 것을 감안한 것이다. 그리고 본 연구에서는 조도계수의 변화에 따른 수위의 표준편차 산정을 위해 조도계수를 0.001 단위로 세분화하여 민감도 분석을 수행하였다.

미 공병단은 Table 7과 같이 조도계수를 통한 보정의 정도와 하천 단면 결정 방법에 따라 수위의 최소 표준편차를 제시하였다. 우리나라에서는 하천기본계획 수립 시 측량을 통해 하천 단면을 결정하고, 대부분의 하천이 미계측 하천이기는 하지만 흔적 수위 조사를 통해 조도계수를 일



Table 10. Calculations of Uncertainty in Stage-Discharge Relationships

Stream	Measurement Location	Natural Uncertainty (a)					Model Uncertainty (b)			Total Uncertainty ( $\sqrt{(a)^2+(b)^2}$ ) (m)
		I <sub>Bed</sub>	A <sub>Basin</sub> (km <sup>2</sup> )	H <sub>Range</sub> (m)	Q <sub>100</sub> (m <sup>3</sup> /s)	S <sub>natural</sub> (m)	Minimum Standard Deviation (m)	Standard Deviation by Sensitive Analysis (m)	Standard Deviation Adopted S <sub>model</sub> (m)	
Yeongcheon-gang	No. 07	3	205.90	6.63	1,909	0.15	0.25	0.10	0.25	0.29
	No. 28	3	198.42	6.68	1,839	0.15		0.33	0.33	0.36
	No. 45	3	177.91	6.30	1,633	0.14		0.43	0.43	0.45
	No. 65	3	177.91	6.06	1,633	0.14		0.43	0.43	0.45
	No. 83	3	154.91	4.90	1,395	0.12		0.31	0.31	0.33
Danjang-cheon	No. 10	3	63.09	4.55	877	0.11		0.25	0.25	0.27
	No. 20	3	53.90	4.22	753	0.10		0.31	0.31	0.33
	No. 37	3	45.61	5.84	643	0.13		0.28	0.28	0.31
	No. 46	3	43.91	4.01	628	0.10		0.31	0.31	0.33
	No. 63	3	43.91	4.92	628	0.11		0.33	0.33	0.35
Jomangang	No. 09	3	18.75	4.08	371	0.10		0.17	0.25	0.27
	No. 15	3	15.54	4.44	341	0.10		0.31	0.31	0.33
	No. 20	3	15.54	4.60	341	0.11		0.30	0.30	0.32
	No. 24	3	13.98	4.19	337	0.10		0.37	0.37	0.38
	No. 28	3	13.98	3.58	337	0.09		0.40	0.40	0.41
Hwanggang	No. 02	3	10.16	3.33	134	0.09		0.21	0.25	0.26
	No. 19	3	7.33	2.84	127	0.08		0.20	0.25	0.26
	No. 38	3	5.14	2.24	106	0.07		0.26	0.26	0.27
	No. 82	3	3.69	2.16	93	0.07		0.26	0.26	0.27
	No. 98	3	2.80	2.42	81	0.07		0.11	0.25	0.26
Cheongok-cheon	No. 09	3	63.80	2.11	383	0.07	0.22	0.25	0.26	
	No. 22	3	59.15	2.19	363	0.07	0.27	0.27	0.28	
	No. 27	3	29.55	2.39	191	0.08	0.28	0.28	0.29	
	No. 38	3	24.32	2.43	161	0.08	0.25	0.25	0.26	
	No. 46	3	10.01	1.31	75	0.06	0.18	0.25	0.26	

부 보정한다. 이를 감안하여 본 연구에서는 모형에 의한 불확실성의 최소 표준편차를 25cm로 설정하였다. 즉, 민감도 분석에 의해 도출된 표준편차가 25cm를 초과하지 않는 경우에는 모형에 의한 불확실성을 25cm로 적용하였다.

Table 10은 수위-유량 관계의 불확실성을 산정한 표를 나타낸다. 그리고 Fig. 3은 대상 하천의 수위-유량 관계를 산정한 예를 나타낸 그림이다. HEC-FDA에서는 수위-유량 관계의 불확실성을 정규분포, 대수 정규분포, 삼각형분

포 중 택일하여 선정할 수 있는데, 본 연구에서는 정규분포로 가정하였다.

### 3.3 우리나라 제방고 산정 기준의 검토

#### 3.3.1 한국과 미국 기준에 따른 대상 하천의 제방고 결정 결과

미국의 제방고는 Table 2에서 제시한 바와 같이 90%

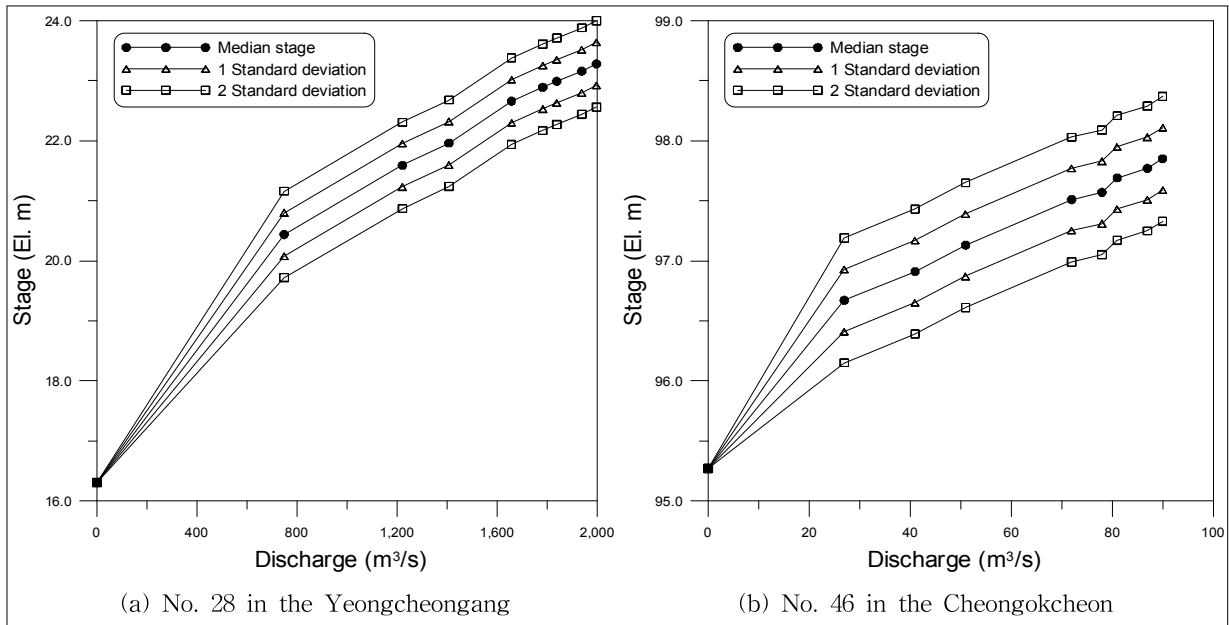


Fig. 3. Stage-Discharge Relationships with Uncertainty for the Investigated Streams

Table 11. Levee Heights Adopted by Criteria of the USA for the Investigated Streams

Stream	Measurement location	CL90 (El. m)	CL95 (El. m)	FL (El. m)	Stream	Measurement location	CL90 (El. m)	CL95 (El. m)	FL (El. m)
Yeongcheon-gang	No. 07	21.76	21.88	22.12	Hwanggang	No. 02	288.72	288.83	289.24
	No. 28	23.57	23.72	23.90		No. 19	308.25	308.35	308.74
	No. 45	24.83	25.02	25.06		No. 38	332.43	332.54	332.95
	No. 65	26.84	27.03	27.10		No. 82	406.40	406.51	406.93
	No. 83	29.12	29.25	29.51		No. 98	438.60	438.71	439.12
Danjang-cheon	No. 10	228.54	228.66	228.92	Cheongok-cheon	No. 09	70.95	71.06	71.33
	No. 20	234.97	235.12	235.33		No. 22	77.24	77.36	77.73
	No. 37	248.47	248.61	248.82		No. 27	80.29	80.42	80.67
	No. 46	257.41	257.55	257.78		No. 38	88.72	88.83	89.29
	No. 63	284.19	284.34	284.50		No. 46	98.07	98.18	98.60
Jomangang	No. 09	4.98	5.10	5.40	※ Shaded area: Levee height adopted by the criteria of the USA				
	No. 15	5.86	6.01	6.25					
	No. 20	6.78	6.92	7.16					
	No. 24	7.23	7.39	7.56					
	No. 28	8.12	8.29	8.44					

및 95%의 조건부 비 초과 확률에 대한 높이와 고정된 여유고 (3ft)를 고려한 높이의 상대적인 크기에 따라 달리 결정된다. Table 11은 Table 2에 제시된 미국의 제방고 결정 기준을 적용하여 도출된 지점별 제방고를 나타낸다. 본 연구에서 계산된 모든 지점의 제방고 결정 기준은 조건부 비 초과 확률이 95%에 해당하는 높이인 것으로 나타났다. 이는 모든 지점에서 3ft의 여유고를 고려한 높이가 95% 조건부 비 초과 확률에 의한 높이보다 큰 것에 기인한다.

Table 12는 우리나라 기준에 의한 제방고와 미국 기준에 의한 제방고를 비교한 표이다. 우리나라와 미국 기준에 의한 제방고의 비교는 우리나라의 제방고 산정 방법에 따라 두 가지로 구분되었다. 우선, 미국과 동일하게 모든 대상지점의 설계 빈도를 100년으로 설정하여 산정한 제방고와 미국 기준에 의해 산정된 제방고를 비교하였다. 두 번째는 하천기본계획 수립 시 정의된 대상 하천의 지점별 설계 빈도 홍수에 대한 제방고와 미국 기준에 의한 제방고를 비교하였다.

Table 12. Comparison of Levee Heights Determined by the Criteria of Korea and the USA

Stream	Measurement Location	Design Frequency (year)	Levee Height by the USA Criteria (El. m) (a)	Comparison Condition									
				Korea: 100-Year Levee Height USA: 100-Year Levee Height					Korea: Levee Height for the Design Frequency USA: 100-Year Levee Height				
				Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Flood Water Level (El. m)	Free-board (m)	Levee Height (El. m) (b)	Difference (b)-(a) (m)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Flood Water Level (El. m)	Free-board (m)	Levee Height (El. m) (c)	Difference (c)-(a) (m)
Yeongcheon-gang	No. 07	100	21.88	1,909	21.21	1.0	22.21	0.33	1,909	21.21	1.0	22.21	0.33
	No. 28	100	23.72	1,839	22.99	1.0	23.99	0.27	1,839	22.99	1.0	23.99	0.27
	No. 45	100	25.02	1,633	24.15	1.0	25.15	0.13	1,633	24.15	1.0	25.15	0.13
	No. 65	100	27.03	1,633	26.19	1.0	27.19	0.16	1,633	26.19	1.0	27.19	0.16
	No. 83	80	29.25	1,395	28.60	1.0	29.60	0.35	1,352	28.51	1.0	29.51	0.26
Danjang-cheon	No. 10	80	228.66	877	228.01	1.0	229.01	0.35	844	227.90	1.0	228.9	0.24
	No. 20	80	235.12	753	234.42	1.0	235.42	0.30	725	234.32	1.0	235.32	0.20
	No. 37	80	248.61	643	247.91	1.0	248.91	0.30	620	247.81	1.0	248.81	0.20
	No. 46	80	257.55	628	256.87	1.0	257.87	0.32	605	256.80	1.0	257.8	0.25
	No. 63	80	284.34	628	283.59	1.0	284.59	0.25	605	283.48	1.0	284.48	0.14
Jomang-gang	No. 09	80	5.10	371	4.49	0.8	5.29	0.19	357	4.41	0.8	5.21	0.11
	No. 15	80	6.01	341	5.34	0.8	6.14	0.13	329	5.26	0.8	6.06	0.05
	No. 20	80	6.92	341	6.25	0.8	7.05	0.13	329	6.16	0.8	6.96	0.04
	No. 24	80	7.39	337	6.65	0.8	7.45	0.06	324	6.56	0.8	7.36	-0.03
	No. 28	80	8.29	337	7.53	0.8	8.33	0.04	324	7.46	0.8	8.26	-0.03
Hwang-gang	No. 02	80	288.83	383	288.33	0.8	289.13	0.30	367	288.29	0.8	289.09	0.26
	No. 19	80	308.35	363	307.83	0.8	308.63	0.28	348	307.76	0.8	308.56	0.21
	No. 38	80	332.54	191	332.04	0.6	332.64	0.10	183	331.98	0.6	332.58	0.04
	No. 82	80	406.51	161	406.02	0.6	406.62	0.11	155	405.96	0.6	406.56	0.05
	No. 98	80	438.71	75	438.21	0.6	438.81	0.10	72	438.15	0.6	438.75	0.04
Cheongok-cheon	No. 09	80	71.06	134	70.42	0.6	71.02	-0.04	129	70.32	0.6	70.92	-0.14
	No. 22	80	77.36	127	76.82	0.6	77.42	0.06	123	76.75	0.6	77.35	-0.01
	No. 27	80	80.42	106	79.76	0.6	80.36	-0.06	102	79.69	0.6	80.29	-0.13
	No. 38	80	88.83	93	88.38	0.6	88.98	0.15	90	88.31	0.6	88.91	0.08
	No. 46	80	98.18	81	97.69	0.6	98.29	0.11	78	97.57	0.6	98.17	-0.01

100년 빈도 홍수에 대하여 산정한 제방고의 경우, 천곡천의 No. 09 지점과 No. 27 지점을 제외한 모든 지점에서 우리나라 기준의 제방고가 미국의 제방고보다 높은 것으로 분석되었다. 구체적으로 우리나라의 기준에 의해 결정된 제방고는 미국 기준에 의한 제방고보다 6~35cm 높은

것으로 나타났고, 평균 높이차는 19.7cm인 것으로 분석되었다. 특히, 홍수량이 클수록 우리나라와 미국 기준에 의한 제방고의 차이는 더 큰 것으로 분석되었는데, 이는 우리나라의 경우 제방고 설정 시 계획홍수량의 규모에 따라 여유고를 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 이를

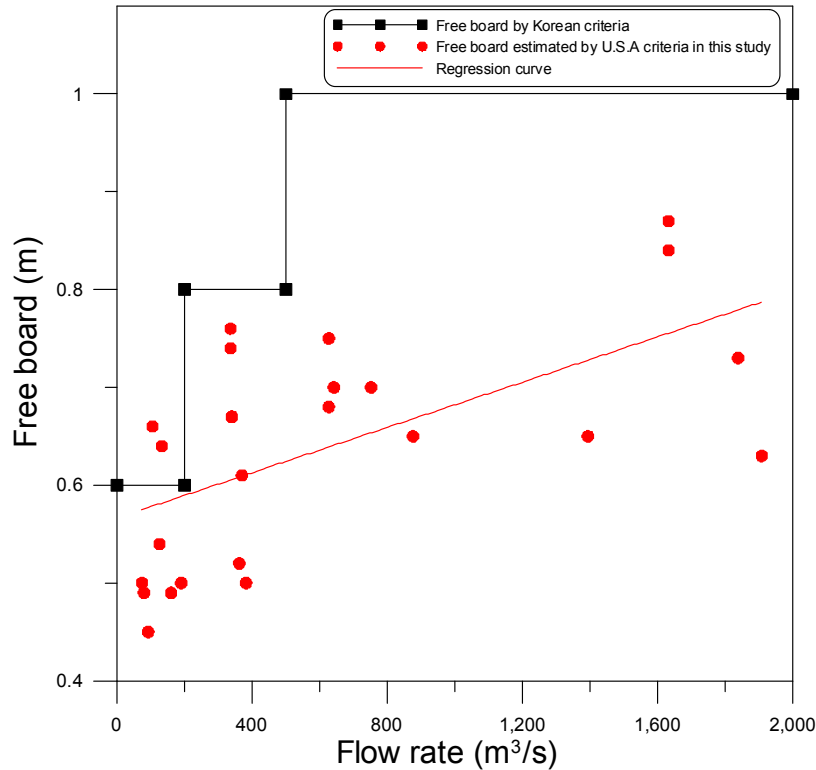


Fig. 4. Freeboard Criteria of Korea and Freeboard Determined by the Criteria of the USA

보다 쉽게 검토하기 위해 우리나라의 홍수량 규모별 여유고 기준과 본 연구에서 미국 기준에 의해 산정된 여유고를 그림으로 비교하였다 (Fig. 4). Fig. 4에서 미국의 기준에 의해 결정된 제방의 여유고가 홍수량 규모가 커짐에 따라 증가되고 있는 것을 볼 수 있으나, 우리나라의 여유고 증가 폭에 비하면 상대적으로 증가율이 작은 것을 볼 수 있다. 즉, 이러한 우리나라와 미국 기준의 차이로 인해 홍수량이 커짐에 따라 결정된 제방고의 차이가 커진 것을 알 수 있다.

하천기본계획 수립 시 설정된 대상 하천의 지점별 계획 빈도 홍수에 대한 제방고와 미국 기준에 의한 제방고를 비교한 결과를 보면, 우리나라의 제방고가 미국의 제방고보다 낮은 지점이 6곳인 것으로 분석되었다. 미국 기준에 의한 제방고보다 낮게 산정된 지점은 여유고가 0.8 m 이하로 계획되는 소규모 하천에서만 발생하였다. 특히, 작은 계획홍수량으로 인해 하천 전 구간에 대하여 여유고가 0.6 m로 설정되는 천곡천의 제방고는 미국 기준에 의한 제방고보다 최대 14cm가 낮은 것으로 분석되었다. 그리고 하천기본계획 수립 시 정의된 대상 하천의 계획 빈도 홍수에 대한 제방고와 미국 기준에 의해 결정된 제방고의 차이는 상대적으로 100년 빈도 홍수에 대한 우리나라와 미국의 기준에 의해 결정된 제방고의 차이에 비해 감소한 것을 볼 수 있다.

### 3.3.2 결과에 대한 고찰

Table 12에 제시된 바와 같이 우리나라의 유량에 따라 고정된 여유고로 결정된 제방고는 확률론적 제방고 산정 방법이 포함된 미국의 기준에 비해 대체로 높게 평가되었다. 그리고 우리나라와 미국의 기준에 의해 결정된 제방고의 차이는 홍수량의 규모가 증가할수록 커지는 것으로 분석되었다. 또한, 하천기본계획 수립 시 설정된 대상 하천의 지점별 계획 빈도 홍수에 대한 제방고와 미국 기준에 의한 제방고를 비교한 결과를 통해 우리나라의 소규모 하천에 대한 제방고가 미국 기준에 의한 제방고보다 다소 낮은 것을 확인할 수 있었다.

우리나라와 미국의 제방고 산정 방법의 적용을 통해 본 연구에서는 2가지 결과를 얻을 수 있었다. 첫 번째는 제방 설계 시 낮은 여유고를 고려하는 소규모 하천의 경우, 우리나라의 제방고가 미국의 제방고에 비해 다소 낮게 책정되어 있어 월류의 위험이 있다는 것이다. 실제로 건설교통부 (2004)는 1987~2003년에 대한 제방의 붕괴 유형을 조사하였는데, 국가하천 제방이 월류로 인해 붕괴된 사례가 10건인데 반해, 지방1급 하천의 경우 37건, 지방2급 하천의 경우 253건인 것으로 제시하였다. 물론, 지방하천의 경우 제방 붕괴 사례 중 개수 공사가 수행되지 않은 제방도 포함되어 있다. 이러한 제방을 제외하더라도 국가하천 구간에 비하면 지방하천의 제방 월류 사례가 훨씬 많은

것이 사실이다. 두 번째는 국가하천 등 설계홍수량의 규모가 큰 하천에 대한 우리나라의 제방고는 미국의 기준에 의한 제방고보다 다소 과대 책정되어 있는 것이다. 본 연구에서는 제방의 여유고를 1.2m 이상 설치하도록 규정된 2,000m<sup>3</sup>/s 이상의 홍수량을 갖는 제방에 대해서는 분석하지 못하였다. 하지만 Fig. 4에서 홍수량 규모에 따른 우리나라의 여유고와 미국 기준에 의해 결정된 여유고의 회귀곡선을 통해, 하천의 홍수량이 커짐에 따라 우리나라의 기준에 의한 제방고와 미국 기준에 의한 제방고의 차이는 커질 것으로 예측할 수 있다. 우리나라의 하천보다 규모가 큰 미국에서는 과거 제방의 월류에 대한 방어를 위해 고정된 여유고(0.91 m)를 사용하였지만, 고정된 여유고를 적용하여 설계된 일부의 제방이 과대 설계되는 것으로 판단하여 조건부 비 초과확률을 이용한 제방고 산정 방법을 고려하도록 수정되었다. 반면에 우리나라의 경우 제방의 여유고를 최대 2.0m 이상 두는 기준이 포함되어 있다(Table 1).

본 연구에서는 미국에서 사용하고 있는 제방고 산정 방법과 우리나라의 기준을 비교하여 우리나라 기준의 문제점을 지적하였다. 미국의 경우, 하천과 유역의 특성을 여유고 산정에 적용하여 보다 객관적으로 제방고를 결정하고 있다. 그리고 우리나라의 제방고 산정 방법은 미국 기준에 비해 홍수량 규모에 따라 다소 과소 또는 과대 설계할 가능성이 있는 것으로 검토되었다.

연구에서 수행된 미국의 제방고 산정 기준 중 조건부 비 초과확률의 계산은 미국의 계산 방법과 경험식 등을 이용하였다. 따라서 미국 기준에 의해 산정된 제방고가 우리나라의 실정과 완전히 부합된 결과로 보기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 이러한 연구를 수행한 이유는 불명확한 현상을 단순히 여유고로서 평가하기보다 이를 규명하기 위한 기술 요소를 제시하여 합리적인 제방고 산정 기술의 필요성을 나타내고자 하는 것이다. 따라서 추후 우리나라 실정에 맞는 조건부 비 초과확률의 산정 방법에 관한 연구가 요구된다.

#### 4. 결론

하천의 제방은 홍수로부터 제내지를 보호하기 위해 만든 시설로서 매우 중요한 하천시설물이다. 홍수로부터 제방의 월류를 방지하기 위해서 우리나라는 확정론적 여유고를 고려하여 제방고를 산정하고, 미국에서는 여유고와 조건부 비 초과 확률을 고려한 확률론적 방법을 이용하여 제방고를 결정한다. 본 연구는 우리나라의 확정론적 여유고를 통한 제방고 산정 방법의 적절성을 검토하기 위해 수행되었다. 이를 위해 우리나라 5개 하천의 25개 지점에

대하여 우리나라와 미국의 제방고 산정 기준을 적용하여 비교·검토하였다.

중·소규모 하천의 25개 단면 지점에서, 미국의 제방 설계 빈도인 100년 빈도 홍수에 대하여 우리나라와 미국의 기준을 적용한 결과, 우리나라의 기준에 의해 결정된 제방고는 미국의 기준에 의해 결정된 제방고에 비해 평균 20 cm 크게 나타났다. 그리고 홍수량 규모가 증가할수록 우리나라와 미국의 기준에 의해 결정된 제방고의 차이는 커지는 것으로 분석되었다. 반면에 소규모 하천의 6개 지점의 경우, 하천기본계획에서 계획된 설계 빈도에 대한 제방고는 미국 기준의 제방고보다 1~14 cm 낮았다. 실제로 우리나라의 제방 월류에 의한 붕괴 피해는 지방하천 이하의 규모에서 많이 발생한 점을 감안하면 본 연구 결과가 적절함을 알 수 있다. 이에 따른 결론으로서, 홍수량이 작은 소규모 하천의 인접 지역에 주거지나 시설이 많은 경우에 여유고를 상향시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 설계홍수량 규모가 2,000m<sup>3</sup>/s 이상인 하천에 대한 분석은 수행하지 못하였다. 하지만 연구 결과를 통하여, 우리나라에서는 홍수량의 규모가 커질수록 미국 기준에 비하여 과대 설계될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 하지만 본 연구의 단편적 성과만으로 우리나라의 제방고 산정 기준을 낮추도록 제시할 수는 없다. 실제로, 건설교통부(2004)는 국가하천과 지방 1급 하천에서도 제방의 월류로 인한 붕괴 이력을 제시한 바 있다.

우리나라의 제방고 기준은 월류에 대한 안전율과 불확실성을 고려하기 위해 경험적으로 추정된 일본의 기준을 이용하여 설정되었다. 하천 제방은 홍수로부터 제내지를 보호하기 위해 설치되어 국민의 재산과 인명을 보호하는 주요 시설물이므로, 보다 합리적인 방법과 우리나라의 실정을 잘 반영할 수 있는 기준 설정이 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

건설교통부(2000). 1999년도 수자원 관리기법 개발 연구조사보고서, 제1권 한국 확률강우량도 작성. 11-1500000-000545-01.  
 건설교통부(2002). 하천시설물 설계시 신뢰도 분석 개념 도입에 관한 연구. 11-1500000-000793-01.

- 건설교통부 (2004). **하천제방 관련 선진기술 개발 최종 보고서**. 한국건설교통기술평가원.
- 김중해, 한건연, 서규우 (2003). “하천 홍수범람모의를 위한 불확실도 해석기법의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 661-671.
- 우호섭 (2002). 하천수리학. 청문각, pp. 378-381.
- 윤용남, 김형수, 박무중, 김상단 (2000). “불확실성 분석을 고려한 홍수피해 저감계획.” **2000년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제S1호, pp. 382-387.
- 이홍래, 한건연, 김상호 (1998). “하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발 (II): 불확실도 해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제4호, pp. 429-437.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준·해설.
- Ang, H.H.S., and Tang, W.H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol. I-II, John Wiley and Sons, Inc.
- Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction, Water Science and Technology Board, and National Research Council (2000). *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies*. National Academy press, Washington, D.C.
- Interagency Advisory Committee on Water Data (1982). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin #17B of the Hydrology Subcommittee, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Office of Water Data Coordination, Reston, VA.
- U.S. Army Corps of Engineers (1996). *Risk-based analysis for flood damage reduction studies*. CECW-EH-Y, EM 1110-2-1619, Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers (1997a). *Guidance on Levee Certification for the National Flood Insurance Program*. CECW-P/CECW-E, Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers (1997b). *Uncertainty estimates for nonanalytic frequency curves*. CECW-EH, ETL 1110-2-537, Washington, D.C.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008). *HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis User's Manual*.
- 建設省 (2003). 河川砂防技術基準 (案) 同解説.