

# 미국의 확률론적 제방고 산정 방법



**강 태 욱**  
부경대학교 토목공학과 박사수로  
ktw62@hanmail.net



**이 상 호**  
부경대학교 토목공학과 교수  
peterlee@pknu.ac.kr

## 1. 머리말

한국수자원학회(2009)는 하천 제방을 홍수 시 유수를 원활하게 소통시키고 제내지를 보호하기 위해 하천을 따라 축조한 시설로 정의하고 있다. 이러한 제방의 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 제방의 파괴에 대한 안전이 필수적이다. 본 고는 제방의 안전을 위협할 수 있는 다양한 요소 중 월류에 대한 안전에 대하여 기술하고 있다.

우리나라에서는 하천 제방의 월류에 대한 안전도 기준으로서 제방의 여유고를 제시하고 있다. 한국수자원학회(2009)는 제방의 여유고에 대하여 계획홍수량을 안전하게 소통시키기 위해 하천에서 발생할 수 있는 여러 가지 불확실한 요소들에 대한 안전값으로 주어지는 여분의 제방 높이로서 정의하고

있다. 이에 따라 한국수자원학회(2009)는 계획홍수량의 크기에 따른 하천 제방의 여유고를 제시하고 있는데, 이는 일본의 기준에서 도입된 것이다.

우리나라, 일본과 달리 미국에서는 불확실성을 고려한 확률론적 개념을 도입하여 제방고 산정에 활용하고 있다. 미국에서 제방고 산정에 사용되는 구체적인 확률 개념은 조건부 비 초과 확률(conditional nonexceedance probability; CNP)로서, 이는 특정한 빈도의 홍수가 발생할 때 목표 수위(target stage)를 초과하지 않을 확률이다.

본 고에서는 국내·외의 제방고 산정 기준에 대하여 간단히 소개하고, 국내의 제방고 산정 시 고려하지 않고 있는 확률론적 산정 방법에 대하여 주로 기술하였다.

## 2. 국내·외의 제방고 산정 기준

### 2.1 우리나라의 제방 여유고 산정 기준

우리나라의 제방 여유고 산정 기준은 계획홍수량의 크기에 따라 결정된다. 표 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.

표 1. 우리나라의 계획홍수량에 따른 여유고(한국수자원학회, 2009)

계획홍수량(m <sup>3</sup> /sec)	여유고(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

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, 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.

## 2.2 미국의 제방고 산정 기준

미국에서는 제방 인증(levee accreditation) 제도를 시행하고 있다. 제방 인증제는 국가 홍수 보험 프로그램(National Flood Insurance Program; NFIP)을 관리하는 연방 재난 관리국(Federal Emergency Management Agency; FEMA)에서 제내지를 보호하는 제방 시스템이 100년 빈도 홍수로부터 안전한 지를 검토하고 인증하는 국가 차원의 제도이다. 그리고 제방 인증의 한 가지 요소로서 하천 제방고에 대한 기준이 마련되어 있다.

미국의 제방고 산정에 대한 기준은 우리나라와 유사하게 고정된 여유고를 사용하는 방법과 확률론적인 조건부 비 초과 확률을 이용하는 방법으로 구분된다. 미국의 제방고 결정 기준

구분	적용 기준	설명
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

분된다. 고정된 여유고를 사용하는 방법은 연방 재난 관리국의 기준이고, 조건부 비 초과 확률을 이용하는 방법은 미 공병단(U.S. Army Corps of Engineers)의 기준이다. 두 가지 방법은 혼용되다가 1997년에 구체적인 적용 방안이 마련되었다.

U.S. Army Corps of Engineers(1997)에서 제시한 미국의 제방고 산정 기준은 표 2와 같다. 표 2에서 FL(FEMA Level)과 CL(Corps Level)은 각각 연방 재난 관리국과 미 공병단의 기준을 의미한다. 이러한 미국의 제방고 산정에 대한 기준은 과대 또는 과소 설계를 방지하기 위함이다.

## 3. 미국의 확률론적 제방고 산정 방법

### 3.1 조건부 비 초과 확률 계산 과정

미국의 확률론적 제방고 산정에는 조건부 비 초과 확률의 개념이 사용된다. 조건부 비 초과 확률이란 특정한 빈도의 홍수가 발생할 때 목표 수위를 초과하지 않을 확률을 나타낸다. 이를 제방 여유고 산정과 연관시켜 보면, 특정한 홍수는 계획홍수에 해당되고 목표 수위는 여유고를 포함한 제방고가 된다. 즉, 제방고 산정에 활용되는 조건부 비 초과 확률은 계획홍수가 발생했을 때 제방을 넘지 않을 확률이고, 미국에서는 90 % 또는 95 %를 기준으로 사용하고 있다.

조건부 비 초과 확률을 계산하기 위해서는 그림 1과 같이 불확실성을 포함한 유량(Q)-초과확률(p) 관계와 수위(H)-유량(Q)관계 곡선이 요구된다. 각 그림의 실선은 관측 또는 모의에 의해 결정된 유량-확률, 수위-유량의 관계이다. 그리고 파선은 이들 관계의 불확실성에 따라 결정된 신뢰 한계

(confidence limit)를 나타낸다. 여기서, 신뢰 한계 내의 불확실성은 그림 1과 같이 특정한 확률 분포로 정의될 수 있다.

조건부 비 초과 확률의 계산 과정을 그림 1에서 표시된 일점체신을 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  $N$ 회 반복 후, 목표수위를 초과한 횟수( $n$ ) 산정
- ⑥ 조건부 비 초과 확률 =  $\frac{N-n}{N}$

이때,  $N$ 회의 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 추정한 그림이다.

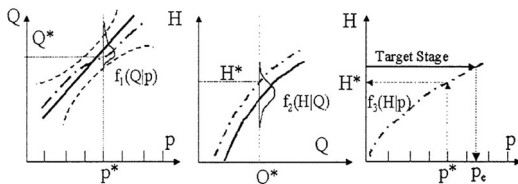


그림 1. 조건부 비 초과 확률의 산정 절차

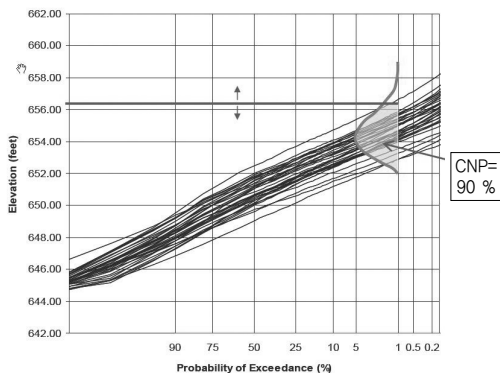


그림 2. 조건부 비 초과 확률의 산정 결과

### 3.2 유량-확률 함수의 불확실성

#### 3.2.1 유량-확률 함수의 결정 방법

유량-확률 함수를 정의하는 방법은 수집된 유량 자료의 특성에 따라 직접 해석법(direct analytical approach), 합성법(synthetic approach), 도해법(graphical approach)으로 구분된다. 직접 해석법과 합성법은 해석적 함수를 이용하는 방법으로서, 관측 또는 모의된 유량 자료에 의한 유량-확률 관계가 대수 피어슨 III형 분포(log Pearson type III distribution)에 적합(fit)될 경우에 사용된다. 반면에, 도해법은 유량-확률 관계가 대수 피어슨 III형 분포에 적합하지 않거나 관측된 유량 자료의 표본이 작고 불완전할 때 사용된다.

대수 피어슨 분포에 적합시켜 유량-확률 관계를 도출하는 직접 해석법과 합성법은 다음과 같은 차이가 있다. 직접 해석법은 관측된 유량 자료가 있어서 연 최대유량을 확보할 수 있는 경우에 사용된다. 즉, 관측 유량을 통해 유량-확률 관계를 도출한다. 반면에, 합성법은 미 계측 유역에서 적용되는 방법으로서, 표 3에 제시된 전이, 회귀식, 경험식, 강우-유출 모형 등을 통해 유량-확률을 도출하는 방법이다. 그리고 합성법에서는 0.5, 0.1, 0.01 초과 확률 사상에 대한 유량만을 이용하여 유량-확률 함수를 도출한다.

직접 해석법과 합성법이 유량-확률의 관계를 대수 피어슨 분포에 적합시켜 산정하는 것과 달리, 도해법은 해석적 함수를 이용하여 자료를 적합시키지 않고 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. U.S. Army Corps of Engineers(1996)과 U.S. Army Corps of Engineers(2008)에서는 도시위치를 정의하기 위해 Weibull 도시위치 공식을 적용한다.

표 3. 미 계측 하천에 대한 유량-확률 함수의 추정 방법

방 법	유량-확률 함수의 추정 절차
전이 (transfer)	인근의 하천에서 관측된 유량 자료로부터 유량-확률 함수를 도출한다. 대상지점에 대한 각각의 확률 대응값(특정 확률에 대한 유량)은 외삽 또는 내삽된다.
각 확률 대응값 또는 함수 매개변수의 지역적 추정	인근의 관측자료가 있는 지점으로부터 유량-확률 함수를 도출한다. 유량-확률 함수의 매개변수와 확률 대응값에 대하여 유역, 하도, 기후 특성 등과의 연관성을 회귀식을 통해 검토한다. 대상지점의 유량-확률 함수에 대한 매개변수와 확률 대응값을 회귀식을 이용하여 추정한다.
경험식	간단한 경험식을 이용해 강수량으로부터 확률 대응값(유량 또는 수위)을 계산한다. 일반적으로, 유량 및 강수량의 확률은 동일하다고 가정한다.
가상의 빈도사상	시·공간적으로 분포된 특정한 확률 호우사상을 강우-유출 모형을 이용하여 유량 수문곡선으로 계산한다. 계산된 첨두 홍수량의 확률이 호우 사상의 확률과 동일하도록 관측 지점의 자료나 유량-확률 관계를 이용하여 보정한다.
연속 유출 모의	강우-유출 모형을 이용하여 연속 유출 모의를 수행하여 연간 첨두 유량을 산정한다. 통계분석 절차를 통해 유량-확률 함수를 연간 첨두 홍수량 시계열에 적합시킨다.

3.2.2 유량-확률 함수의 불확실성 추정

직접 해석법과 합성법에 의한 유량-확률 함수의 불확실성은 평균, 표준편차, 왜곡도를 이용한 신뢰한계의 계산을 통해 추정된다. 신뢰한계의 일반적인 형태는 식 (1), (2)와 같다. X와 S는 대수 피어슨 분포에 의한 유량-확률 함수의 대수 평균과 표준편차이고, P는 X의 초과확률이다. C는  $L_{p,c} < X < U_{p,c}$  인 확률로서 신뢰한계를 나타내고,  $K_{p,c}^U$ 와  $K_{p,c}^L$ 는 상한 신뢰계수와 하한 신뢰계수를 의미하며 근사적으로 식 (3)과 (4)로 계산된다. 그리고 상·하한 신뢰계수의 산정에 사용되는  $K_{G_w,P}$ 는 왜곡도( $G_w$ )와 초과확률 P에 대한 대수 피어슨 분포의 빈도계수를 나타내고, 계수 a, b는 각각 식 (5)와 (6)으로 계산된다. 식(5)와 (6)에서  $Z_c$ 와 N은 각각 누가 확률이 C인 표준정규분포의 확률변수와 사용된 자료 기간을 나타낸다.

$$U_{p,c}(X) = \bar{X} + S \times (K_{p,c}^U)^a \quad (1)$$

$$L_{p,c}(X) = \bar{X} + S \times (K_{p,c}^L)^a \quad (2)$$

$$K_{p,c}^U = \frac{K_{G_w,P} + \sqrt{K_{G_w,P}^2 - ab}}{a} \quad (3)$$

$$K_{p,c}^L = \frac{K_{G_w,P} - \sqrt{K_{G_w,P}^2 - ab}}{a} \quad (4)$$

$$a = 1 - \frac{Z_c^2}{2(N-1)} \quad (5)$$

$$b = K_{G_w,P}^2 - \frac{Z_c^2}{N} \quad (6)$$

상기의 식 (5)와 (6)에 사용되는 자료 기간(N)은

유량-확률분포 추정에 사용된 자료 특성에 따라 등가 자료 기간(equivalent record length)을 산정하여 결정된다. 표 4는 U.S. Army Corps of Engineers(1996)에서 제시한 유량-확률 관계의 추정 방법에 따른 등가 자료 기간의 산정 지침이다. 표 4에 제시된 등가 자료 기간 산정 지침은 사용된 자료의 특성, 모형의 신뢰 정도, 유사 연구에 대한 이전 경험 등에 근거한 것이다.

도해법에 의한 유량-확률 함수의 불확실성은 정규분포를 따르는 것으로 가정된다. 그리고 해석적 표 4. 등가 자료 기간 산정 지침(U.S. Army Corps of Engineers, 1996)

유량-확률 관계의 추정 방법	등가 자료 기간
대상지점의 장기간 관측 자료에 적합한 해석적 분포	실제 자료 기간
대상지점은 아니나 동일한 하천 내의 장기간 관측자료에 적합한 해석적 분포로부터 추정하되, 관측지점과 대상지점의 상류 배수유역 면적의 차이가 20 % 이내인 경우	관측 자료 기간의 90 ~ 100 %
동일한 유역 내에 있는 장기간 관측 자료에 적합한 해석적 분포를 통해 추정	관측 자료 기간의 50 ~ 90 %
지역적인 유량-확률 함수의 매개변수를 이용하여 추정	지역의 유량-확률 관계에 사용된 평균 자료 기간
강우-유출 모형을 이용하여 추정하되, 다수의 호우 사상에 대하여 단기간 관측 자료로 모형을 보정한 경우	20 ~ 30년
지역적 매개변수를 이용하여 강우-유출 모형을 이용하여 추정한 경우 (강우-유출 모형에 대한 보정을 수행하지 않음)	10 ~ 30년
강우-유출 모형으로 추정하되, 교과서나 편람(handbook)에서 제시된 매개변수를 사용한 경우	10 ~ 15년

접근 방법과 동일하게 등가 자료 기간이 사용된다.

### 3.3 수위-유량 관계의 불확실성

#### 3.3.1 수위-유량 관계의 불확실성에 대한 개요

수위-유량 관계의 불확실성을 정의하기 위해서는 수위-유량 관계에 영향을 주는 요소를 인지해야 한다. 수위-유량의 관계에 영향을 주는 요소에는 하상형태(bed form), 수온, 토석(debris) 등의 장애물, 비정상류(unsteady flow)의 영향, 계절별 수리학적 조도의 변화, 토사 이동(sediment transport), 홍수로 인한 하도 형상의 변화 등이 있다. 또한, 수위와 유량의 실측 시 측정 장비의 오차, 물결 등의 기타 요인들에 인한 측정 오차 등이 불확실성에 포함될 수 있다.

U.S. Army Corps Engineers(1996)는 이러한 수위-유량 관계의 불확실성에 대하여 자연적 불확실성(natural uncertainty)과 모형에 의한 불확실성(model uncertainty)을 제시하였다. 그리고 수위-유량 관계의 총 불확실성을 자연적 불확실성과 모형에 의한 불확실성 등을 결합한 식 (7)과 같이 제시하였는데, 불확실성을 정의하기 위한 척도는 표준편차이다. 즉, 식 (7)에서  $S_t$ 는 총 불확실성의 표준편차이고,  $S_{natural}$ 과  $S_{model}$ 은 각각 자연적 불확실성과 모형에 의한 불확실성의 표준편차이다.

$$S_t = \sqrt{S_{natural}^2 + S_{model}^2 + \dots} \quad (7)$$

#### 3.3.2 자연적 불확실성

U.S. Army Corps Engineers(1996)은 수위-유량 관계의 자연적 불확실성 추정에 관하여 계측된 자료가 있는 하천과 계측된 자료가 없는 하천에 대한 수위-유량 관계의 불확실성을 구분하여 기술하였다.

계측된 자료가 있는 하천에서는 관측된 수위와 수위-유량 관계에 의한 수위의 차이인 잔차(residual)를 이용하여 수위-유량 관계의 불확실성

을 계산한다. 이 때, 잔차의 계산에는 관심 대상이 홍수이므로 계획홍수량 이상에 대한 수위만을 사용한다. 이러한 잔차는 수위-유량 관계에 대한 불확실성의 특징을 나타내고, 특정한 확률 분포를 갖는 것으로 표현될 수 있다.

잔차의 표준편차는 식 (8)과 같이 추정된다. 여기서  $X_i$ 는 관측 유량  $Q_i$ 에 상응하는 관측 수위이고,  $M$ 은 수위-유량 관계를 통해 추정된 유량  $Q_i$ 에 해당하는 수위이다.  $N$ 은 분석에 사용된 수위-유량 관측 자료의 개수이다.

$$S_{natural} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - M)^2}{N - 1}} \quad (8)$$

U.S. Army Corps Engineers(1996)는 미 계측 하천에 대한 수위의 불확실성에 대하여 측정 가능한 매개변수들 간의 상관관계를 규명하여 정립된 것으로 기술하였다. 미 계측 하천에 대한 불확실성은 식 (9)와 같고, 결정계수( $R^2$ )는 0.65이다. U.S. Army Corps Engineers(1996)는 식 (9)에 대하여 물리적인 근거에 기반하고 있는 수식은 아니지만, 미 계측 하천에 대하여 현장조사에 의한 지형자료와 예측된 100년 빈도 홍수량으로부터 합리적인 결과를 확보할 수 있는 것으로 제시하고 있다.

식 (9)에서  $I_{Bed}$ 는 표 5에 제시된 대상 하도의 하상 재료에 따른 식별수치를 나타내고,  $A_{Basin}$ 은 유역면적( $km^2$ ),  $H_{Range}$ 는 최대 예상 또는 관측 수위의 범위(m),  $Q_{100}$ 은 100년 빈도 홍수량( $m^3/s$ )을 나타낸다.

$$S_{natural} = [0.07208 + 0.04936 I_{Bed} - 2.2626 \times 10^{-7} A_{Basin} + 0.02164 H_{Range} + 1.4194 \times 10^{-5} Q_{100}]^2 \quad (9)$$

표 5. 하상재료 식별수치(U.S. Army Corps of Engineers, 1996)

재료	규격	식별수치
암석(Rock)/저항성이 큰 점토(Resistant Clay)	-	0
거력(Boulders)	256 mm 이상	1
왕자갈(Cobbles)	64~256 mm	2
자갈(Gravels)	2~64 mm	3
모래(Sands)	2 mm 이하	4

### 3.3.3 모형의 불확실성

3.3.2절에서는 수위-유량 관계의 불확실성에 대하여 기술하였다. 수위-유량 관계는 하천 구간 내의 특정한 지점에 해당하는 것으로, 하천과 관련된 공학적 검토를 위해서는 모든 하천 구간에 대한 정보가 필요하다. 따라서 모든 하천 구간에 대한 수면곡선(water surface profile)의 산정이 요구된다. 하천의 수위는 모형을 통해 계산되고, 자연 현상을 모형을 통해 구현할 때에는 정보의 불확실성이 포함되게 된다.

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(표 6). 표 6에서 조도계수의 신뢰도가 좋음은 계산에 사용된 모형이 다수의 관측 자료로 보정되었을 경우에 해당하고, 보통은 한정된 자료로 보정되었을 경우, 나쁨은 모형 보정이 되지 않았을 경우에 해당한다.

수위의 불확실성은 사용된 모형의 매개변수 변화에 따른 민감도 분석을 통해서도 추정될 수 있다. 이 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. 또한, 합리적인 수위의 불확실성 범위로서 95 %를 제시하였다.

매개변수 변화에 따른 수위의 상한과 하한을 이용한 표준편차 추정식은 식 (10)과 같다. 식 (10)에서  $E_{mean}$ 은 상한 수위와 하한 수위의 수위차를 나타

낸다.

$$S = \frac{E_{mean}}{4} \quad (10)$$

## 4. 맺음말

본 고에서는 제방의 월류에 대한 안전성 확보 기준인 제방고에 대하여 국내·외 기준을 검토하였다. 우리나라와 일본에서는 계획홍수량의 크기에 따라 확률론적 여유고를 사용하고 있고, 미국은 경제적인 제방 설계가 되도록 확률론적 방법과 확률론적 방법을 조건에 따라 구분하여 사용하고 있다. 본 고에서는 우리나라에서 사용하고 있지 않는 확률론적 제방고 산정 방법에 대하여 구체적으로 기술하였다.

미국의 확률론적 제방고 산정 방법에는 조건부 비 초과 확률의 개념이 사용된다. 조건부 비 초과 확률을 산정하기 위해서는 불확실성을 포함한 유량-확률 관계와 유량-수위 관계가 요구된다. 본 고에서는 이러한 유량-확률 관계와 유량-수위의 관계를 도출하는 방법과 도출된 관계의 불확실성 산정 방법을 제시하였다.

확률론적 여유고는 수문량과 지형학적 불확실성을 반영하지 못하기 때문에 보다 안전하게 제방을 설계하기 위한 경험적 수치이다. 확률론적으로 산정한 제방고는 이러한 불확실성을 반영하여 설계하는 개념으로서 확률론적 여유고 산정 방법보다 진보된 기술로 볼 수 있다. 하지만 미국에서 사용하고 있는 확률론적 제방고 산정 기술을 국내에서 도입하여 적용하기 위해서는 이론적 고찰과 다양한 조건에 대한 기술 검토가 필요할 것으로 판단된다.

표 6. 수위 오차의 최소 표준편차(U.S. Army Corps of Engineers, 1996)

조도계수의 신뢰도	표준편차(ft)	
	현장조사 또는 항공측량에 의한 단면도	2~5 ft의 등고선을 갖는 지형도에 근거한 단면도
좋음	0.3	0.6
보통	0.7	0.9
나쁨	1.3	1.5

## 학술/기술기사

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통

기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08 기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. ☺

### 참고문헌

1. 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준·해설.
2. U.S. Army Corps of Engineers (1996). Risk-based analysis for flood damage reduction studies. EM 1110-2-1619.
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.
5. 建設省 (2003) 河川砂防技術基準(案) 同解説.