

## 하천제방의 안전성(수공학적 측면)



윤광석 >>

한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원  
ksyoon@kict.re.kr



김규호 >>

한국건설기술연구원 수자원연구부 부장  
khkim1@kict.re.kr



이성준 >>

한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원  
silee@kict.re.kr

### 1. 서론

제방(levee)은 '유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 흙으로 축조한 공작물'로 정의된다(「하천설계기준(한국수자원학회, 2005)」). 즉, 유수가 하도 밖으로 흘러 넘치는 것을 방지하기 위해 설치한 인공 구조물이다. 제방은 공간적으로 하천구역을 나타내는 제내지와 제외지의 경계를 지으며, 치수 목적으로 보면 제내지로의 범람을 방어해 주는 가장 중요한 홍수방어시설이다.

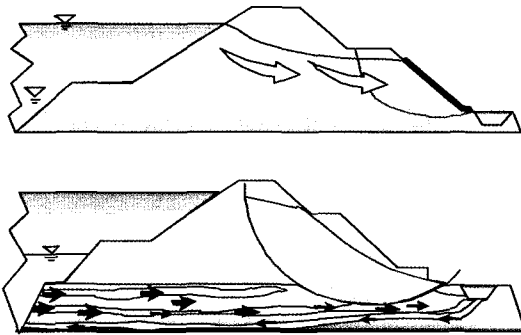
2002년 8월 낙동강 유역 장기홍수, 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미에 의한 홍수로 강원도와 영남 지역의 피해는 홍수 방어시설로서 제방의 중요성이 부각되는 계기가 되었다. 해외 사례를 보더라도

2005년 허리케인 카트리나(Katrina)로 인한 미국 뉴올리언즈 지역의 제방붕괴로 수많은 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 이에 하천제방이 가져야 할 안전성을 수공학 측면에서 검토하고 이에 대한 대책을 수립해 나가는 과정으로서 하천 제방 붕괴 원인 및 제방 안전성에 대해서 검토하고자 한다.

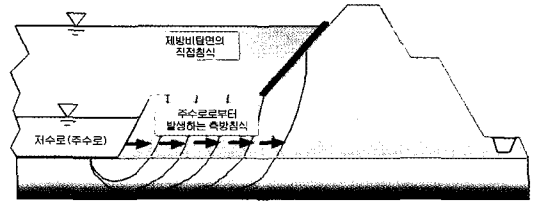
### 2. 제방붕괴 원인 및 유형

그림 1에 나타난 바와 같이 일반적으로 홍수시 제방 붕괴 원인은 크게 월류, 침식, 제체(堤體) 불안정 및 하천구조물에 의한 붕괴 등 4가지로 구분할 수 있다. 월류는 하도의 통수능을 초과하는 홍수 유출이나 토사나 유목 등에 의해 통수능이 저하될 때 발생하며, 침식은 하천의 급경사, 급격한 만곡 부분에서 과대한 유속과 소류력이 작용하여 제방 비탈면이나 하단부가 세굴됨으로써 발생한다. 제체 불안정은 성토재료의 불량과 제체 및 지반 누수에 의한 파이핑(piping) 등에 의한 것을 말하며, 하천 구조물에 의한 붕괴는 하천횡단구조물이 붕괴되면서 제방이 붕괴되는 경우나 제방과 이질 재료로 건설된 구조물 접촉면의 붕괴 등을 들 수 있다.

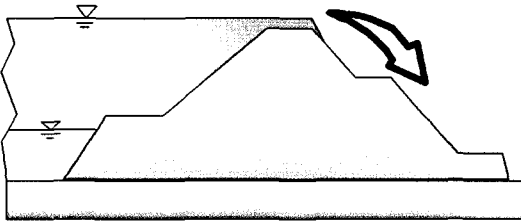
윤광석 등(2004)은 1987년~2003년까지의 제방 붕괴 원인을 분석한 바 있는데, 조사기간 동안의 전체 제방붕괴 사례 758건중 월류가 300건(39.6%)으로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 침식 295건(38.9%), 제체 불안정에 의한 붕괴 87건(11.5%), 그리고 구조물에 의한 붕괴 76건(10.0%)으로 나타났다. 구조물에 의한 붕괴중에는 하천횡단구조물 주위의 제방침식으로 인한 붕괴도 포함되어 있다.



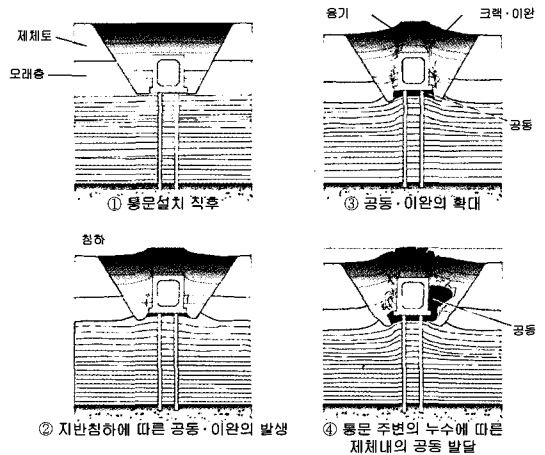
(a) 침투에 의한 제방 붕괴



(b) 침식에 의한 제방붕괴



(c) 월류에 의한 제방붕괴



(d) 배수구조물에 의한 제방붕괴

그림 1. 하천제방의 주요 붕괴 원인

### 3. 하천제방 안전성 평가

수공학적 측면에서 하천제방의 대표적 안전성 검토항목으로는 제체의 비정상침투해석을 위한 외력조건으로서의 홍수파형을 결정하는 것과 하안 및 제방 침식을 방지하기 위한 호안 설계 등을 들 수 있다. 제체 자체의 침투해석은 주로 토질공학적인 측면에서 검토되고 있으나, 비정상침투해석을 위한 설계홍수파형의 결정은 수문특성을 반영한 것이라야 적절한 해석이 이뤄질 수 있다. 침식에 대한 해석은 침식을 방지하는 호안공법에 대한 정량적인 해석이 필수적이므로 흐름에 의해 발생하는 외력과 호안재료가 가지고 있는 내력을 명확히 산정한 후 안전성을 검토해야 할

것이다. 하천횡단구조물 주위의 제방에 대한 안전성도 구조물로 인해 변화되는 흐름특성을 반영한 외력산정이 우선하여야 하며, 이러한 절차를 통해서 산정된 호안의 내력을 설계치로 사용하는 것이 제방의 안전성을 향상시키는 방안이 되리라 사료된다.

#### 3.1 비정상 침투해석을 위한 홍수파형 결정

비정상 침투류 해석을 위한 외력조건으로서 홍수파형이 주어지는데 그림 2는 일본 하천제방설계지침(2000)에서 제시하고 있는 침투류 해석을 위한 홍수파형 결정 순서를 나타낸 것이다. 그림 5(a)의 여러 개의 하천 수위 파형 각각에 대해서 기준이 되는 수

위(원칙적으로 평수위)마다의 지속시간을 구하고 그림 5(b)를 작성한다. 그림 5(b)의 지속시간에 대한 포락선을 그린 후, 그 포락선으로 둘러싸인 면적을 구한다. 그림 5(a)의 수위파형중에서 홍수 말기의 감수

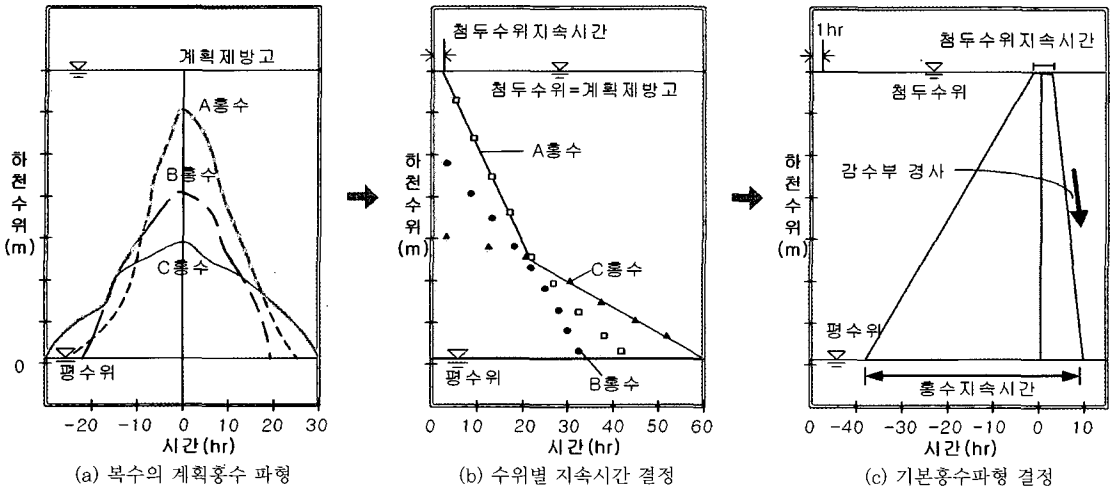


그림 2. 침투해석을 위한 홍수파형 결정 방법

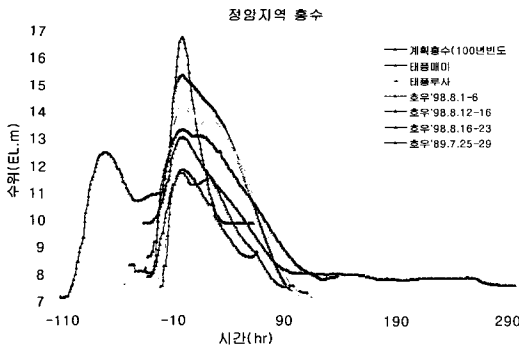


그림 3. 계획홍수와 홍수사상

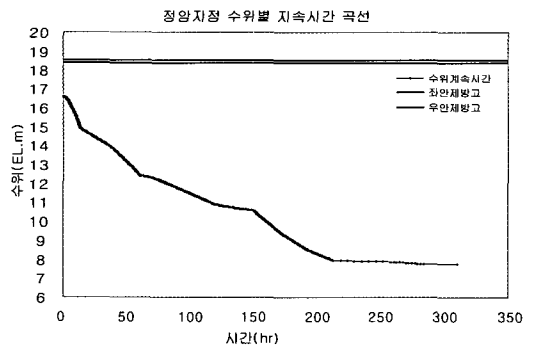


그림 4. 수위별 지속시간 합성

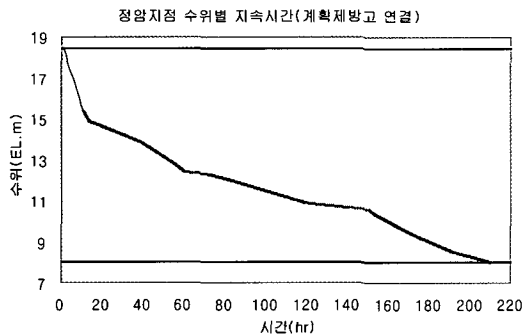


그림 5. 보정된 수위별 지속시간

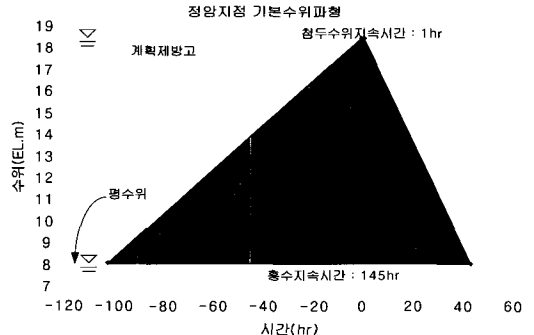


그림 6. 합성홍수파형

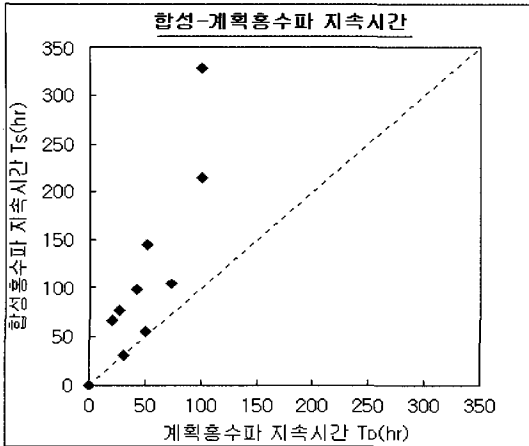


그림 7. 합성-계획홍수파 지속시간

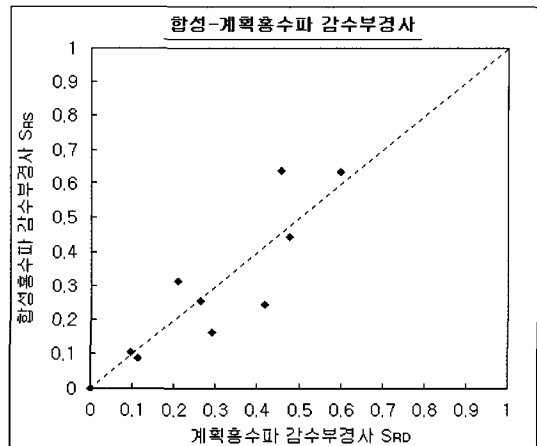


그림 8. 합성-계획홍수파 감수부 경사

부 경사(수위저하 속도)중 최대인 것을 찾아서 그 경사를 구한 다음, 그림 5(c)에 나타난 것처럼 그림 6(b)와 같은 면적이 되도록 증수부 곡선경사 및 지속시간을 산정하여 비정상 침투해석을 위한 기본 수위파형으로 결정한다.

그러나 홍수파형 결정시 계획홍수파형을 사용할 경우 과거 홍수사상에 의한 홍수지속시간이 반영되지 않으므로 안정성 향상 측면에서 보면 과거 홍수를 고려한 홍수파를 결정하는 것이 타당할 것으로 보인다. 그림 3~6은 낙동강 수계 수위관측소중에서 남강의 정암 지점에 대해서 합성홍수파형을 작성하는 과정을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 수문자료가 존재하는 지점에 대해서는 과거 홍수자료를 토대로 홍수지속시간 및 감수부 경사를 산정할 수 있어 지금까지 경험적인 방법으로 산정함으로써 발생했던 과소설계 또는 과대설계 가능성을 최소화 할 수 있을 것으로 보인다.

그림 7은 합성홍수파형의 홍수지속시간과 계획홍수파형의 홍수지속시간을 나타낸 것인데, 과거홍수사상의 지속시간을 반영한 합성홍수파의 지속시간이 계획홍수량 산정시 이용했던 계획홍수파의 지속시간보다 큰 것으로 나타났다. 그림 8은 합성홍수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사를 비교한 것이다. 그림에서 점들의 편차는 있으나, 대체로 합성홍

수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사가 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 비정상 침투해석시 이와 같은 방법을 이용한다면 안전측면에 유리한 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 호안 안전성 평가를 위한 정량적 설계기법

우리나라 대부분의 하천제방 비탈면에 호안이 설치되고 있음에도 불구하고, 호안의 종류나 제원을 결정할 수 있는 명확한 방법은 제시되어 있지 않다. 최근 돌망태나 환경블럭 등이 많이 사용되고 있으나, 홍수시 유실되는 경우가 많이 발생하고 있어 정량적인 안전성 평가방법의 사용이 요구되고 있다.

#### 3.2.1 식생 호안

일본에서 수행하고 있는 안전성 평가방법에서 대표유속과 유속계수로 표현되는 외력 소류력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_*' = V_0 / \Phi, \quad \Phi = (1/n) \cdot (H_d)^{1/6} / \sqrt{g}$$

위의 식에서  $V_0$ 는 대표유속,  $\Phi$ 는 유속계수를 나타낸다.

평균근모량( $\sigma_0$ )으로 나타내어지는 침식의 용이성

을 나타내는 변수  $\alpha(=50\sigma_0+9)$ , 전단응력 지속시간 ( $t$ ), 허용침식깊이( $Z_{brk}$ )로 표현되는 내력 소류력( $u_s$ )은 아래와 같다.

$$u_s = \frac{Z_{brk}}{a} \frac{1}{\log t}$$

### 3.2.2 돌망태공

돌망태의 비탈덮기공은 대표 유속에 의해 망태속 재료의 이동을 허용하지 않는 조건으로 평가한다. 즉 망태속 재료는 무차원 외력 소류력에 견딜 수 있도록 설계한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\tau_{sd} = \tau_{sd} \times \cos\theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}} \geq \tau_{*sd} = \frac{u_s^2}{sgD_m}$$

$\tau_{sd}$ 는 내력 소류력을 나타내고  $\tau_{*sd}$ 는 외력 소류력,

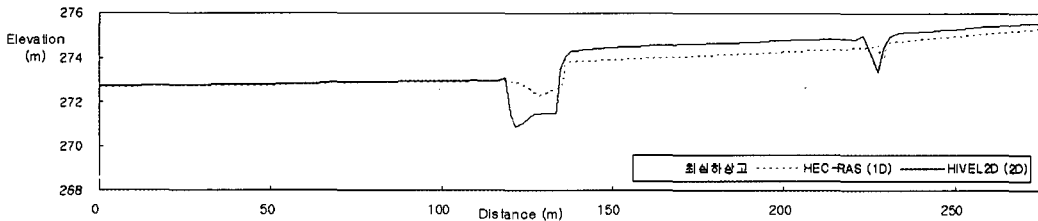
$s$ 는 하상재료의 수중비중( $\approx 1.65$ ),  $D_m$ 는 돌망태 안의 돌의 평균입경을 나타낸다.

### 3.2.3 콘크리트 블럭공

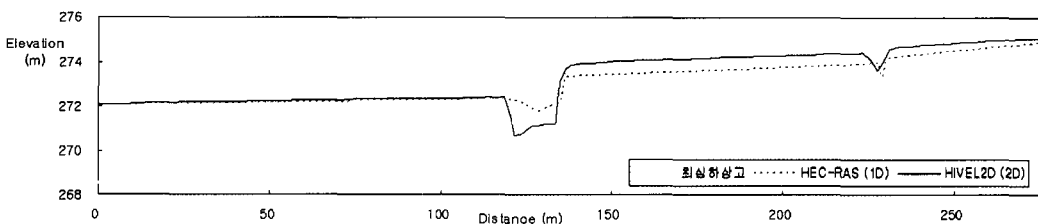
비탈면에 설치된 콘크리트 블럭은 유체력에 의한 활동이 생기는 조건으로 안전성 평가를 조사한다. 즉, 수중에서의 콘크리트 블럭의 항력과 양력에 대한 활동에 대한 안정성을 조사한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\mu(W_w \cos\theta - L) \geq ((W_w \sin\theta)^2 + D^2)^{1/2}$$

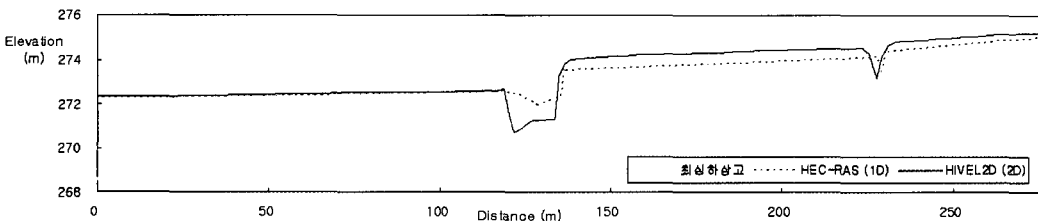
양력( $L$ )은  $L = \rho_w / 2 C_L A_b V_d^2$ , 항력( $D$ )은  $D = \rho_w / 2 C_D A_D V_d^2$ 와 같으며,  $W_w$ 는 비탈덮기공의 부재 수 중중량을 나타내는데  $W_w = (\rho_b - \rho_w) g K_v A_b t_d$ 와 같다.



(a) 계획홍수량(50년 빈도,  $Q=740\text{m}^3/\text{s}$ )



(b) 2002년 태풍 루사( $Q=528\text{m}^3/\text{s}$ )



(c) 2003년 태풍 매미( $Q=598\text{m}^3/\text{s}$ )

그림 9. 가천천 가조교 지점에 대한 2차원 및 1차원 모의 결과 비교

지금까지 살펴본 바와 같이 식생공의 안전성 평가를 통하여 호안공 필요 유무를 판단한 후 호안공 필요시 각 호안공법에 대한 안전성 평가에 의해 적합한 호안공을 선택하여 제방 강화가 이루어져야 할 것이다. 또한 침식에 대한 제방의 안전성은 홍수시의 제방 부근의 대표유속에 의해 결정되는데 이 유속은 하도의 형상과 하상 재료 등에 관계가 되므로 하도 특성을 평가하는 하나의 지표인 하도의 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안공법의 분류가 필요한 것으로 판단된다.

### 3.3 하천횡단구조물 주위의 연결호안 설계

최근 홍수로 인한 하천횡단구조물 주위의 연결호안 붕괴로 인하여 제내지 침수 피해가 증가하고 있다. 하천에 보와 같은 횡단구조물이 있는 경우, 흐름특성을 변화시킴으로써 외력조건이 달라지므로 이에 적절한 호안설계방법이 검토되어야 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

윤광석 등(2005)은 대표적인 하천횡단구조물인 보 주위에서 발생하는 2차원 흐름특성을 검토한 바 있다. 일반적으로 정량적으로 호안을 설계할 때는 설계홍수량에 대해서 1차원 모의를 수행한 후, 그로부터 산정된 단면 평균유속을 사용하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나, 보가 설치된 지점은 하도특성이나 보 구조물의 제원에 따라 홍수시 사류가 발생하는 도수현상으로 인하여 평균유속보다 큰 유속이 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 그러므로, 하천횡단구조물이 있는 구간에 대해서는 2차원 흐름해석을 통한 국부유속을 산정하여 설계입력값으로 사용하는 방안을 강구해야 할 것이며, 향후 평균유속과 국부유속과의 개략적인 관계를 규명함으로써 간편하고 적절한 설계가 이뤄질 수 있도록 해야 할 것이다. 그림 9는 낙동강 수계 가천천 가조교 상류의 보 설치 지점에

대한 1, 2차원 해석결과로서 사용되는 모형에 따른 흐름특성 해석결과가 달라지며 이에 따라 외력조건도 달라질 수 있음을 잘 보여 주고 있다.

## 4. 결론 및 제언

제방은 홍수방어를 위한 가장 중요한 구조물이며, 안전성 확보를 위해서는 정량적인 평가 방법의 도입이 필요하다. 이러한, 구체적으로 제방의 안전성을 확보하기 위해서는 안전성 평가를 위한 내·외력 산정이 필요하다. 따라서, 수공학 측면에서의 명확한 수문설계 방법이나 수리특성해석방법이 도입되어 적절한 외력을 산정함으로써 정량적인 해석이 이뤄질 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 안전성 높은 제방설계를 위한 세부적인 연구가 수행되어야 하며 국내 실정에 맞는 설계기법을 개발하기 위해서는 더 많은 실험실증 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 建設省/河川堤防設計研究會(2000). 河川堤防設計指針, 建設省 河川局 治水課
- 윤광석, 김수진, 조용식, 정상화(2005), "HIVEL2D 모형을 이용한 보 설치 하도 구간의 흐름해석." 2005 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1896-1899.
- 윤광석 (2004), "하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, pp. 50-60.
- 한국건설기술연구원(2004). 하천제방 관련 선진기술 개발 보고서, 건설교통부/한국건설교통기술평가원
- 한국수자원학회(2005). 하천설계기준 