

수리모형실험을 통한 호안의 수리적 안정성 분석

Hydraulic Stability Analysis of Revetments Using Hydraulic Model Test

이종필*, 박의정**, 최경환***, 김철****

Jong-Pil Lee, Eui-Jung Park, Kyoung-Hwan Choi, Chul Kim

요 지

호안은 제방 및 저수로 하안을 강수와 유수에 의한 파괴와 침식작용에 대하여 직접 보호할 목적으로 설치하는 것이다. 최근에는 자연형, 생태하천 등 하천의 친수성, 경관, 생태계의 보전·재생 등이 중요시 되면서 이런 기능을 가진 많은 호안공법들이 개발 및 시공되고 있다. 하지만 이러한 호안공법에 대한 홍수시의 수리적 안정성 검토 등의 기술적인 검토가 충분치 않은 실정이다. 따라서 호안공법이 적용된 호안에 대해 홍수시의 수리적 안정성에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 호안 조사결과 우리나라에서 가장 많은 시공사례가 있는 콘크리트 식생블록에 대해서 개수로 수리모형실험을 통하여 호안의 수리적 안정성을 분석하였다. 분석에 이용된 모형은 실제 하천에 많이 적용되고 있는 H형 식생블록을 1/10 축소모형을 제작하여 사용하였다. 호안경사 1:2에 대해 식생이 없는 경우, 식생이 0.08m, 0.04m 간격으로 있는 경우에 대해 유량을 변화시키면서 식생밀도에 따른 유속 저감 및 소류력 저감 효과에 대한 수리적 안정성을 분석하였다.

그 결과 호안경사 및 식생밀도는 호안부에서 흐름의 에너지 및 유속을 감소시키며, 식생이 없는 호안에 비해 식생이 있는 호안에서는 식생밀도가 증가함에 따라 소류력이 최대 62.24%까지 감소하였다. 호안부에서의 식생의 발달은 유속 및 소류력을 감소시켜 호안부의 안정화에 크게 기여하고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 수리모형실험, 호안, 수리적 안정성, 소류력

1. 서 론

우리나라의 하천은 주로 이수성 및 치수성, 홍수시 유수의 원활한 소통만을 고려하여 정비되고 관리되어 왔다. 그 결과 하천의 토지 이용성을 높이기 위해 복개되었고, 사행 하천은 직강화 되었으며, 사용된 호안공법은 치수적으로만 고려한 콘크리트 블록 등이 많이 사용 되었다. 최근 들어 자연형·생태하천으로의 복원이 진행되면서 하천의 친수성·경관·생태계 등을 고려한 식생블록 저수호안공법이 많이 사용되고 있다. 그러나 이들 호안공법에 사용되는 식생블록들에 대하여 홍수시 수리적 안정성 검토등의 기술적인 검토가 충분치 않은 실정이다. 김진홍(2006)은 수리모형실험을 통하여 토사사면과 식생이 있는 블록에 대해 유속 및 토사유출을 비교, 분석하였고, 최홍식

* 정회원·호남대학교 토목공학과 석사
** 정회원·호남대학교 토목공학과 박사수료
*** 정회원·호남대학교 토목공학과 석사과정
**** 정회원·호남대학교 토목공학과 교수

E-mail : jongpil1980@nate.com
E-mail : pej1214@hotmail.com
E-mail : ckh7631@naver.com
E-mail : kuchul@dreamwiz.com

(2001)은 호안블록의 구속 및 형태별로 한계유속을 측정하였으며, 서영민 등(2005)은 수리모형실험을 통해 호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감 효과를 분석하였다. 일본의 田村正秀 등(2000)은 호안블록의 형상과 항력, 양력의 특성에 관하여 연구했으며, 山本晃一 등(2003)은 호안블록의 항력, 양력계수 및 상당조도 측정 방법에 관하여 연구하였다. 본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 저수호안의 수리적 안정성을 분석하기 위해 국내 하천에 가장 많이 적용되고 있는 콘크리트 식생블록을 선정하였다. 선정된 식생블록 호안에 식생이 없는 경우, 0.08m, 0.04m 간격으로 있는 경우에 대해 유량을 변화시켜가면서 식생밀도에 따른 유속, 소류력의 저감효과에 대한 수리적 안정성을 분석하였다.

2. 이론

2.1 소류력

Darcy - Weisbach 공식으로부터 식생이 없는 경우에 대해서 하상에 작용하는 전단응력 τ_0 는 식 (1)과 같다 (Streeter et al., 1998).

$$\tau_0 = f \left(\frac{4\rho UR}{\mu} \cdot \frac{k_s}{4R} \right) \frac{1}{8} \rho U^2 \quad (1)$$

여기서, τ_0 는 하상의 단위면적당 작용하는 전단응력, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, ρ 는 물의 밀도, U 는 평균유속, R 은 동수반경, μ 는 점성계수, k_s 는 모래입자의 반경이다.

직사각형 단면의 개수로에서 하도가 전체적으로 거친 표면으로 덮혀있을 때 전단응력에 의한 난류에 대하여 Karman Prandtl의 난류유속 방정식은 식 (2)와 같다 (Hayashi, 1996; Streeter et al., 1998).

$$\frac{U}{U_*} = 5.57 \log \frac{R}{k_s} + 6.25 \quad (2)$$

여기서, U_* 는 마찰속도 \sqrt{gRI} 이다. 한편 거친 표면을 가지는 하상에서 큰 레이놀즈수를 가지는 흐름에 대하여 마찰계수 f 는 상대조도 k_s/R 에 따라 변한다. 또한 식 (1)에서 유속계수 U/U_* 와 마찰계수 f 사이의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (3)$$

Darby와 Thorne(1996)는 단면의 기하학적 형태와 하도(법면)경사, 하상재료 및 수변식생특성을 가지는 하도에 대하여 수위-유량관계곡선을 계산하기 위한 물리기반모형을 제시하였다. 특정 수위에 대한 유량의 분포를 예측하는데 필요한 모형을 적용하기 위하여 식생과 유사조도를 설명하는 윤변에 걸친 국부 Darby-Weisbach 마찰계수를 추정하는 것이 필수적이다. 식생이 된 부분에 대하여 Darby, Thorne(1996) 및 Darby(1999)는 식생줄기의 밀도에 의해 영향을 받는 Darby-Weisbach의 국부마찰계수 f 를 구하기 위해서 식 (1)을 사용할 것을 제안한 바 있다.

실험하도에서 식생이 존재하는 경우 전단응력(유효 소류력)은 유수에 의해 하도에 작용하게 된다. 식생에 의해서 피복된 면적비는 실험조건에 비해 최대 3% 정도인 것으로 나타났다. 따라서 Darby, Thorne(1996) 및 Darby(1999)에 의해 제안된 것처럼 다음과 같은 가정을 도입하였다. 전단응력은 식생이 없는 경우와 같은 메카니즘에 의해서 유수로 인하여 하상에 작용한다. 그러므로 식생이 있는 경우 하상에 작용하는 평균유속 U 와 전단응력(유효 소류력)의 관계는 식 (1)과 같

다. 수로의 마찰응력 τ_0 , 마찰계수 f 및 유속을 대신하여 하상에 작용하는 유효 소류력 F_0 , 수변식생하도의 마찰계수 및 수변식생하도의 평균유속으로 바꾸면 그 관계식은 식 (4)와 같다.

$$F_0 = \frac{f'}{8} \rho U'^2 \quad (4)$$

여기서, F_0 는 하상의 단위면적에 작용하는 유효 소류력, f' 은 수변식생이 있는 하도에서 마찰계수, U' 는 수변식생이 있는 하도의 평균유속이다. 유속 U' 를 가지는 흐름에서 식생에 작용하는 항력 F_d 는 일반적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A U'^2 \quad (5)$$

여기서 F_d 는 식생의 줄기에 작용하는 항력, C_d 는 항력계수, A 는 흐름방향으로 식생 줄기의 전면 면적(frontal area), U' 는 유속이다.

선행 연구에서 항력계수 C_d 는 식생 밀도와 강한 상관성을 나타냄을 알 수 있다(Ishikawa et al., 2000). 단위면적당 모든 식생에 작용하는 항력의 합을 F_v 라 하면 $F_v = F_d/S^2$ 가 된다. 여기서, S 는 개별 식생간 간격을 나타낸다. 수변식생을 가지는 등류흐름에 대해서 하도경사를 따라 작용하는 유체중량성분 F_w 는 $F_w = \rho g H'I$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, H 는 수변식생을 가지는 하도의 수심(수리수심)이고 I 는 하도의 경사이며, F_w 는 겉보기 소류력(apparent tractive force, F_w)이라 한다. 항력 F_v 와 유효 소류력 F_0 의 합은 F_w 와 같다고 볼 수 있다.

$$\rho g H'I = \frac{1}{2} C_d \rho A U'^2 \frac{1}{S^2} + \frac{f'}{8} \rho U'^2 \quad (6)$$

흐름방향으로 각 식생줄기의 전면 면적은 $A = DH'$ 이다. 여기서, D 는 줄기의 반경이다. 만약 수변식생을 가지는 하도에서 흐름의 겉보기 마찰속도(apparent friction velocity)가 $U'_{*} = \sqrt{gH'I}$ 로 가정된다면 식 (6)으로부터 다음 식 (7)을 얻게 된다.

$$U'^2_{*} = \frac{1}{2} C_d DH' \frac{1}{S^2} U'^2 + \frac{f'}{8} U'^2 \quad (7)$$

식생밀도 $aH' = DH'/S^2$ 와 식생면적비 $\lambda = D/S^2$ 를 고려하면 유속계수의 차승 $(U'/U'_{*})^2$ 은 다음 식 (8) 및 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{U'}{U'_{*}}\right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{2} C_d aH' + \frac{f'}{8}\right)} \quad (8)$$

$$\left(\frac{U'}{U'_{*}}\right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{2C_d H'}{\pi D} \lambda + \frac{f'}{8}\right)} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)으로부터 마찰계수 f' 는 다음 식 (10) 및 식 (11)과 같다.

$$f' = \frac{8U'^2_{*}}{U'^2} - 4C_d aH' \quad (10)$$

$$f' = \frac{8U'^2_{*}}{U'^2} - \frac{16C_d H'}{\pi D} \lambda \quad (11)$$

따라서 하상의 마찰계수 f' 는 유속계수 U'/U'_{*} , 식생의 항력계수 C_d 및 aH' 는 식생의 조도(roughness concentration)와 수심의 곱을 나타내는 무차원 값이다.

3. 실험개요 및 방법

3.1 실험개요

개수로 수리모형실험을 위해 H형 식생블록을 지우개를 이용하여 1/10로 축소 제작하여 설치하였고 호안구간 3m 길이의 경사 1:2의 호안 모형을 제작하여 그림 1.과 같이 설치하였다. 본 실험에서는 길이 12m, 폭 0.4, 높이 0.4m의 제원을 가진 가변 경사 개수로를 사용하였으며, 수위측정은 그림 2.와 같은 point gage를 이용하며, 유속측정은 그림 3.과 같은 2차원 전자유속계를 사용하여 측정하였다. 식생은 실제의 식생을 축소 할 수 없기 때문에 실제 식생과 비슷한 형태와 유연성이 있는 인공식생을 사용하였다.

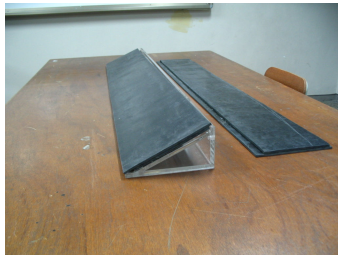


그림 1. 호안모형제작

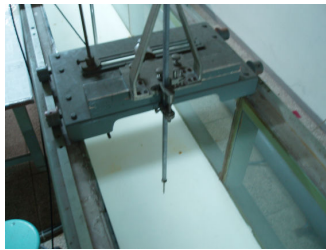


그림 2. Point Gage

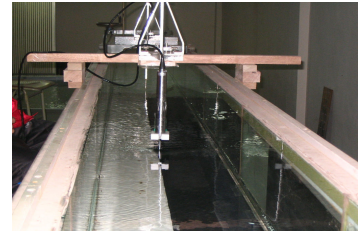


그림 3. 2차원전자유속계

3.2 실험 조건

본 연구는 저수호안의 식생밀도에 의한 수리적 안정성을 분석하기위해 그림 4.와 같은 식생이 없는 경우, 0.08m, 0.04m 간격으로 식생이 있는 경우로 모형수로를 구축하였다. 실험조건은 식생이 없는 경우, 0.08m, 0.04m 간격으로 있는 경우로 구분하였고, 유량은 각각의 경우에 0.0122m³/s, 0.0167m³/s, 0.022m³/s의 유량을 사용하여 개수로 수리모형실험 실시하였다.



식생무



식생 0.08m 간격



식생 0.04m 간격

그림 4. 호안의 식생밀도

3.3 수심 및 유속측정

수위는 개수로 레일위의 이동식 포인트 게이지를 이용하여 실험구간을 측정 하였으며, 유속은 2차원 전자유속계를 이용하여 측정하였다. 그림 5.와 같이 실험구간을 No.1부터 No.5까지 5구간으로 나누어 수위 및 유속 측정하였다.

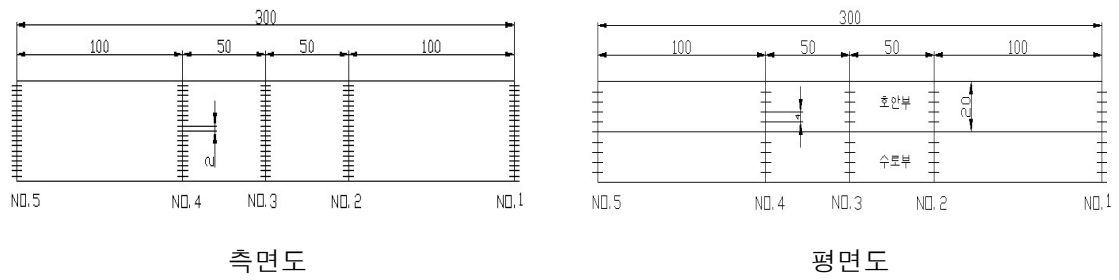


그림 5. 수위 및 유속 측정위치

4. 결과분석

4.1 유량별 유속분포

표 1.은 식생밀도에 따른 개수로의 No.3번 지점의 유속분포이며, 식생이 없을 때는 수로 쪽보다 호안부가 더 유속이 크게 나타났으나, 식생밀도가 증가 할수록 호안부의 유속이 감소하면서 수로 쪽의 유속이 증가하였다.

표 1. 유량별 유속분포

식생(cm) 유량(m ³ /s)	식생무	식생 8cm 간격	식생 4cm 간격
0.0122			
	수심:16.2(cm)	수심:16.3(cm)	수심:16.4(cm)
	0.0167		
수심:17.5(cm)		수심:17.7(cm)	수심:17.9(cm)
0.0220			
	수심:18.9(cm)	수심:19.0(cm)	수심:19.1(cm)

4.2 소류력

식생간격, 식생조도, 식생의 면적비, 수온, 유량 등의 실험조건은 표 2.에 나타내었고 실험결과 는 표 3.에 나타내었다. 실험결과 식생이 없는 경우에 비해 식생이 0.08m간격으로 있는 경우의 유효소류력이 51.1%~60.7% 감소하였고, 식생이 0.04m간격으로 있는 경우는 52.7%~62.2%감소하였다.

표 2. 실험조건

CASE	식생간격 (m)	식생조도 (m ⁻¹)	식생의 면적비 (λ)	수온 (°C)	유량 (m ³ /s)
식생무	0	0	0	12	0.0220
	0	0	0	12	0.0167
	0	0	0	12	0.0122
식생 (0.08m)	0.08	0.234	0.469	12	0.0220
	0.08	0.234	0.469	12	0.0167
	0.08	0.234	0.469	12	0.0122
식생 (0.04m)	0.04	0.938	0.938	12	0.0220
	0.04	0.938	0.938	12	0.0167
	0.04	0.938	0.938	12	0.0122

표 3. 실험결과

CASE	식생 밀도	수심 (m)	유속 (m/s)	유효소류력 (kgf/m ²)	경심	마찰계수	마찰속도	Reynold수
식생무	0	0.189	0.376	1.011	0.094	0.127	0.053	28498
	0	0.175	0.325	0.852	0.090	0.165	0.051	23471
	0	0.162	0.269	0.684	0.085	0.234	0.050	18460
식생 (0.08m)	0.045	0.190	0.395	0.421	0.094	0.282	0.075	30035
	0.041	0.177	0.349	0.393	0.090	0.337	0.072	25389
	0.038	0.163	0.292	0.362	0.085	0.444	0.069	20122
식생 (0.04m)	0.179	0.191	0.402	0.404	0.095	0.261	0.075	30664
	0.168	0.179	0.356	0.380	0.091	0.314	0.073	26084
	0.154	0.164	0.291	0.350	0.086	0.432	0.069	20136

5. 결론

본 연구에서는 호안의 수리적 안정성을 분석하기위해 하천의 호안조사를 통해 가장 많이 적용된 콘크리트 식생블록 호안에 대해 수리모형실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 식생이 없는 수로에서는 수로부보다 호안부의 유속이 크게 나타나며, 이로 인해 소류력이 증가되면서 호안의 안정성이 낮아짐을 알 수 있다.

(2) 유량과 유속의 증가 및 식생밀도가 증가 할수록 식생이 없는 호안에 비해 유효소류력의 감소율은 최대 62.24%까지 감소하였다.

(3) 호안부에서 식생밀도의 증가는 유속 및 소류력을 감소시켜 호안부의 안정화에 크게 기여하고 있을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06 건설핵심 B01-자연과 함께하는 하천복원기술개발)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 최홍식(2001). 호안블록의 수리적 안정성 분석, 생산기술학회지, Vol.10, pp. 59~74.
2. 서영민, 이승윤, 허창환, 지홍기(2006). 호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감, 한국환경과학회지 제15권, 제1호, pp. 33-43.
3. 이민호, 최홍식(2007). 호안블록의 수리적 안정성 실험, 한국수자원학회 학술발표논문집, pp. 1018~1022.
4. 김진홍(2006). 하천 호안공의 성능평가-호안 블록공을 대상으로-, 한국수자원학회 연구보고서.
5. 우효섭(2001). 하천수리학, 청문각.
6. 백창식, 오인영, 김이현, 배동만, 김학수(2002). 수리실험, 구미서관.
7. 한국건설기술연구원(2004). 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서,
8. 여홍구(2004). 다기능하천 설계기준 실험검증 사업, 한국건설기술연구원 연구보고서.
9. Streeter, V.L., B. Wylie and K. W. Bedord(1998). Fluid mechanics, McGraw-Hill, Boston.
10. Stephan, U. and Gutknecht, D(2002). Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. Journal of Hydrology, Elsevier, Vol. 269, No. 1, pp. 27-43.
11. 山本晃一, 林建二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一(2000). “護岸ブロックの抗力・揚力係数D、および相当B粗度 の計測方法について”, 水工学論文集, 第44卷, pp. 1053 ~ 1058.
12. 田村正秀, 木下正暢, 浜口憲一郎, 阿部康紀(2003). “護岸ブロックの形状と抗力・揚力特性について”,