

# 고수호안 복토공법의 토양 유실율에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Soil Loss Rate of Recovery Soil Technique at High Water Revetment

채동석\* · 김영도\*\* · 박재현\*\*\* · 김 철\*\*\*\*  
Chae, Dong Seok · Kim, Young Do · Park, Jae Hyeon · Kim, Chul

### Abstract

Recently, to ensure the stability of flood control, instead of removal of concrete revetment, the vegetation mat method has been widely used on the recovery soil. However, the recovery soil method often failed to be stable against the flood, which caused the economic loss. In this study, the rate of soil loss and the velocity distribution on high water revetment are evaluated by the hydraulic experiments. The maximum difference of the soil loss rate was 52% depending on the vegetation. The reduction of the soil loss rate according to the vegetation is large when the revetment slope is steep. The maximum soil loss rate is 19.5% when there is no vegetation.

**Key words** : high water revetment, recovery soil technique, hydraulic stability, soil loss rate

### 요 지

현재 우리나라 도심하천의 고수호안 설계에서는 치수적 안정성 확보를 위해 기 설치된 콘크리트 호안을 철거하는 대신에 복토 후 식생매트 공법을 통한 자연친화적인 하천공법이 널리 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 복토공법의 적절한 수리학적 기준이 제시되지 않아 홍수기 유실로 인한 경제적 손실이 자주 발생하고 있다. 본 연구에서는 수리적 안정성을 포함한 친환경적인 식생복토공법의 유실을 평가에 관해 수리모형 실험을 통해 규명하고자 하였다. 식생의 활착 유무에 따른 복토의 유실율을 살펴보면 호안경사에 따라서 식생의 유무에 따른 유실율 차이가 52%로 나타났으며, 호안의 경사도가 클수록 식생에 의한 저감 효과가 큰 것으로 연구결과 나타났다. 또한 유속 조건 및 호안의 경사에 따라서 식생이 없을 경우 유실율이 최대 19.5%로 나타났다.

**핵심용어** : 고수호안, 복토공법, 수리적 안정성, 토양 유실율

### 1. 서 론

호안은 제방 및 하안을 홍수시 침식작용으로부터 보호하기 위하여 설치된 것이지만, 이러한 침식방지 기능과 아울러 자연환경의 보전·재생 또는 친수성 등의 기능 확보도 설계상의 중요한 요소이다. 호안은 이러한 기능들을 포함하면서 구조가 안정하도록 시공성, 경제성, 유지관리를 고려하여 설계되어야 한다. 신정민 등(2008)의 연구에 의하면 하천시설물 공사비 중 호안공의 비중이 항구복구공사의 경우 27%, 수해 복구공사의 경우 12%를 차지하는 것으로 나타났다. 이렇게 하천 공사비에 큰 비중을 차지하는 호안공의 설계시 적용의 일관성이나 기준이 없을 경우 공사비의 낭비를 막기 위해 보다 변별력 있는 식생호안공법 선정을 위한 단기적인 설계방

법 개선안을 제시하여 현장에서 활용 가능하도록 제안하기도 하였다(황경우 등, 2008). 과거 하천의 제방은 치수안전성, 경제성, 재료확보 등의 이유로 돌붙임, 타원형돌망태와 모르타르 블록 등이 주로 이용되었다. 이러한 호안들은 2000년대에 들어서 환경성이 요구되면서 환경적이며, 경제적이고, 수리적 안정성 등이 우수한 호안 형태가 필요하게 되었다. 그러나 돌망태, 콘크리트 블록 등에 비하여 평평, 식생매트 등의 공법은 시공실적이 적어 정비과정에서 호안공법의 적용에 치우쳐 부적합한 공법 도입 사례가 발생하였다(최윤주, 2001). 국내에서는 이러한 안정성과 친환경적인 호안을 구축하기 위하여 자연형 호안공법에 관한 연구가 1990년대 후반부터 본격적으로 시작되었으며(한국건설기술연구원, 2001), 국내 하천 환경에 적합한 생물 재료를 활용한 저수호안 공법

\*인제대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: sdc270he@naver.com)  
\*\*정회원 · 인제대학교 환경공학부 (낙동강유역환경연구센터) 조교수(교신저자)  
\*\*\*정회원 · 인제대학교 토목공학과 부교수  
\*\*\*\*정회원 · 호남대학교 토목환경공학과 교수

등이 개발된 바 있다(우효섭, 1999). 또한 식생이 개수로 흐름에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 수리실험이 실시되어 왔으며, 식생공간에서의 조도계수 산정을 위한 수리실험을 수행한 바 있고, 이러한 수리실험 결과를 활용하여 식생의 영향을 고려한 흐름모형에 관한 연구가 진행된 바 있다. 또한 호안용 돌망태의 수리학적 특성을 규명한 바 있으며(배상수 등, 2001), 식생호안의 관한 하도특성과 식생 상관관계 분석, 자연하천을 중심으로 하천식생에 관한 지속적 연구가 수행된 바 있다(이울경, 1999)

그러나 국내에서 치수안정성을 이유로 실무에서 식생호안보다 자주 적용되는 복토 후의 식생매트 설치 공법의 식생 활착 유무에 따른 토양 유실과 이로 인한 수리적 안정성에 관하여 연구된 바가 없다. 국외에서는 이와 유사한 수리적 특성을 갖는 홍수조절수로에서 거석에 대한 안정성 실험을 통해 수리학적 흐름조건에 따른 유속, 소류력, 변형 등에 대한 안정성을 검토한 바 있다(Fiuzat and Skogerboe, 1983). Tenna Riiss 등(2003)은 유속과 식생피복과의 관계를 규명하였다. 따라서 본 연구에서는 수리적 안정성을 포함한 친환경적인 식생복토공법의 유실을 평가에 관해 수리모형 실험을 통해 규명하고자 한다. 본 연구에서는 고수호안의 종적, 횡적인 구조에 대한 수리실험을 통해 인위적 호안공을 제외한 순수 복토재료에 의한 토양의 유실율을 평가하고, 식생의 활착 유무에 따른 세굴영향을 비교하며, 유실율에서 취약 부분을 평가한 후 이를 방어하기 위한 물리적 구조에 대한 수리학적 제약조건을 도출하여 보완책을 마련하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험 장치

고수호안의 식생복토공법 실험을 위하여 한국건설기술연구원에서 호안의 식생에 관한 실험연구사례(이동섭, 2006)와 일본의 국토개발기술연구센터(2003)에서 제시한 호안의 설계법을 참고하여 실험수로를 제작하였다. 본 연구에서 사용된 실험 장치는 크게 저수조와 고수조(그림 1 참조) 그리고 실험수로로 구성되어 있다. 실험수로에 공급되는 유량은 고수조로부터 유입되며, 전자식 유량계를 설치하여 그 크기를 측정하였으며(그림 2 참조), 수로내로 공급된 유량이 안정한 흐름을 유지하도록 에너지를 감소시키는 정류부와 안정화구간을 설치하였다. 수위와 유속 등이 안정된 유량을 이용하여 세굴측정구간에서 실험을 수행하며, 측정구간을 통과한 유량은 하류



그림 1. 고수조



그림 2. 유량계

부를 지나 저수조로 흘러들어가게 된다. 그림 3은 실험수로의 모식도를 나타낸 것이다. 수로의 제원은 총 길이 14m(정류부 3m, 안정화 구간 3m, 세굴측정구간 6m, 하류부 2m), 폭 1.2m, 높이 0.6m이다. 하류부에는 수위 조절을 위한 수문이 설치되어 있다.

본 연구에서 사용된 복토와 식생은 호안 평가를 위한 조사 연구가 수행되어 지고 있는 김해시 부원동에 위치한 해반천 구간 중 하류 지점에 해당되는 곳의 토양과 식생을 채취하여 실험을 수행하였으며(그림 4 참조), 그림 5는 고수호안 식생복토공법의 호안모형의 개념도를 나타낸 것이다. 실험에서 사용된 호안재료의 토양입자의 속성을 파악하기 위하여 토양입자의 크기를 체분석을 수행한 결과 평균입경( $D_{50}$ )이 0.08mm로 나타났다(그림 6).

해반천의 고수호안은 상류구간은 식생계와 식생블록으로 이루어져 있으며 하류구간은 사석과 석축으로 이루어져 있으며, 서식하는 식생들은 일부 자연적잡초와 인위적식생이 결합되

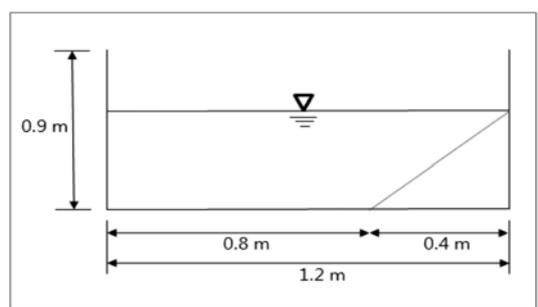
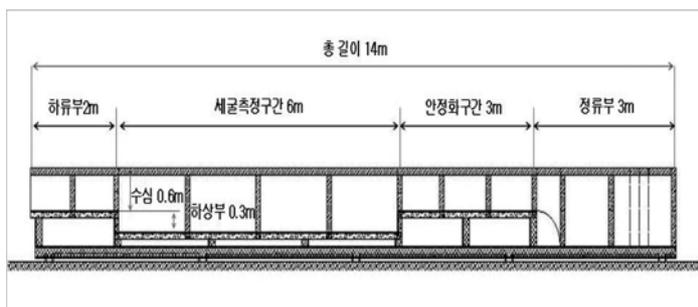


그림 3. 실험수로의 모식도

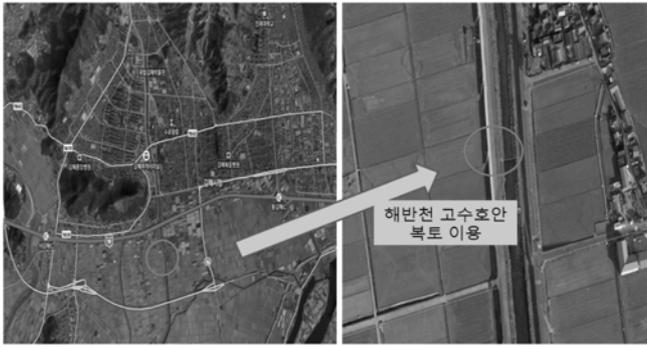


그림 4. 호안재료 채집 위치도

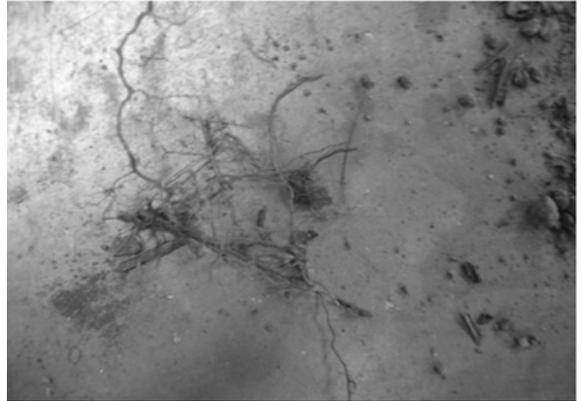
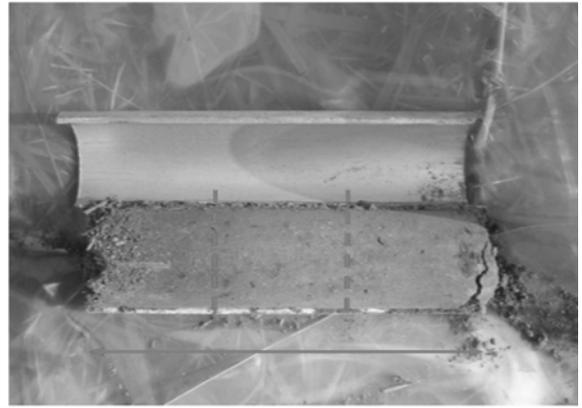


그림 7. 근모량 및 근입깊이 측정

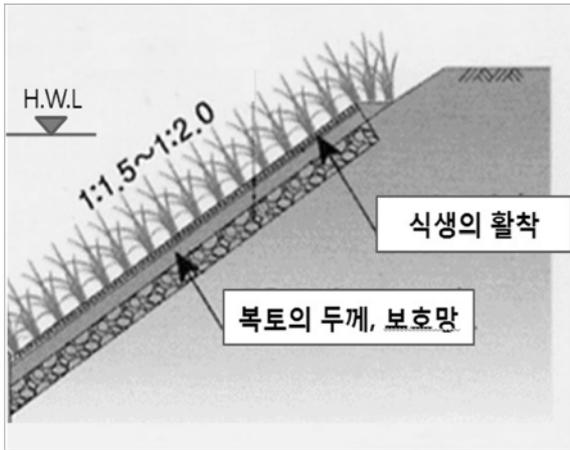


그림 5. 호안모형 개념도

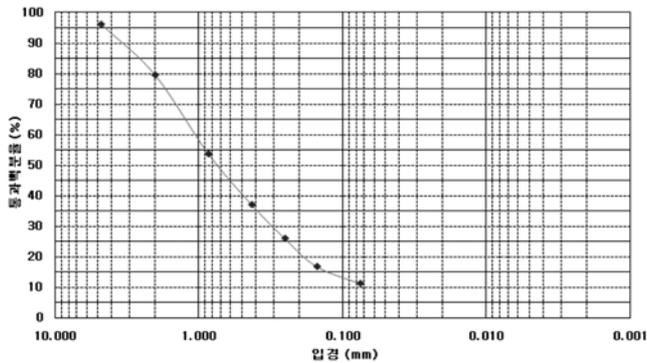


그림 6. 토양입자의 중량통과 백분율

어 있는 형태를 보이며, 훼손의 정도가 매우 낮았다. 현장의 호안식생의 근모량의 근입깊이를 상중하로 나누어 조사한 결과 근입깊이는 4 cm~5 cm 정도 활착되어 있었다(그림 7).

본 연구에서는 프로펠러 유속계와 사면측정기를 통하여 유속 및 세굴심을 계측하였으며 그림 8은 호안의 경사에 따른 측정 단면에서의 유속과 사면 측정 지점에 대한 모식도를 나타낸 것이다.

## 2.2 실험 조건

본 연구에서는 식생의 활착유무에 따른 고수호안에 복토공법의 상대적 토양 유실율을 검토하기 위하여 표 1에서와 같이 다양한 수리학적 조건에서의 실험을 수행하였다. 또한 호안의 경사를 변화시켜가며, 식생의 유무에 따른 토양 유실의 상대적 변화를 측정하였다. 호안의 경사는 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0 등 크게 3가지 조건으로 나누어 검토하였으며, 단면의 평균 유속으로는 0.2 m/s에서 0.8 m/s까지 변화시켜가며, 유속 크기에 따른 상대적인 토양 유실율의 변화를 관찰하였다. 또한 동일한 수리 조건에 대하여 식생이 없는 호안과 식생이

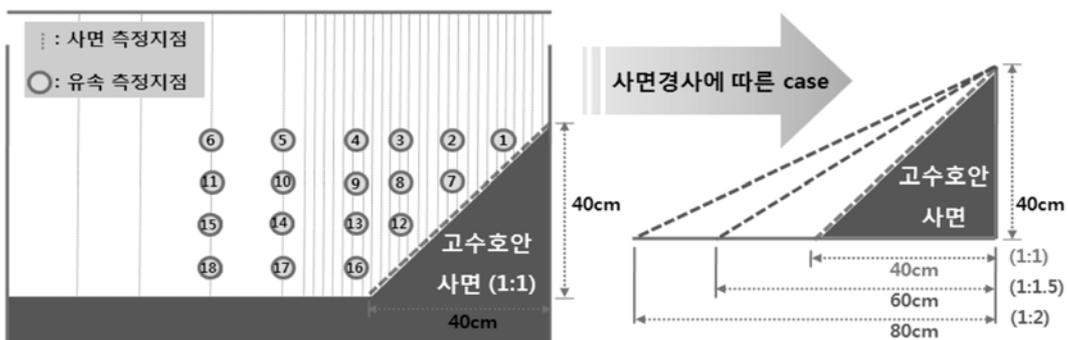


그림 8. 측정방법 모식도

표 1. 실험 조건

호안경사	단면평균유속 (m <sup>2</sup> /s)	식생유무	수심(m)
(1) 1 : 1.0 (2) 1 : 1.5 (3) 1 : 2.0	(1) 0.2 (2) 0.5 (3) 0.8	(1) 식생유 (2) 식생무	0.4

발달한 호안에서 현장에서 식생호안을 채집하여 설치 후 실험을 수행하여 복토 후 식생매트 설치공법에 대하여 식생 활착 유무에 따른 상대적인 토양 유실율을 평가하였다. 이와 같이 호안 경사, 유속, 식생 유무의 조건에 대하여 총 18가지의 실험을 수행하였으며 각각의 조건에 대하여 유속과 세굴심을 측정하였다.

### 3. 실험결과

본 연구에서는 측정오차를 줄이기 위하여 통수 후 약 10분이 경과된 후 등류수심을 확보한 상태에서 수리조건별 3개의 단면에서 각 지점별 3회를 측정하여 각각에 대하여 평균값을 구하였다. 측정된 평균값을 바탕으로 단면의 유속분포를 분석하였으며, 이와 같은 평균 유속이 특정 지점을 대표할 수 있는 유속으로 간주하여 특정 지점에서의 유속으로 발생하는 유실율(호안의 복토된 토양의 이탈 면적)을 계산하였다. 그림 9와 그림 10은 식생이 활착되지 않은 단면에서의 단면평균유속 0.8 m/s 조건에서의 호안 경사별 유실율 측정 결과를 나타낸 것이다.

그림 11과 그림 12는 식생이 활착된 단면에서의 단면평균유속 0.8 m/s 조건에서의 호안 경사별 유실율 측정 결과를 나타낸 것이다. 식생이 활착되지 않은 경우에 비하여 전체적으로 토양 유실이 적게 발생하며 유실이 일어나는 구간도 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

표 2는 전체 실험조건에 대한 유실율을 나타낸 것이다. 식

표 2. 유실율 평가 실험결과

호안경사	유속(m/sec)	식생(유/무)	유실율(%)
1:1.0	0.2	무	0.55
		유	0.01
	0.5	무	7.38
		유	1.01
	0.8	무	9.06
		유	7.14
1:1.5	0.2	무	0.12
		유	0.08
	0.5	무	0.23
		유	0.16
	0.8	무	11.69
		유	6.44
1:2.0	0.2	무	0.56
		유	0.29
	0.5	무	12.84
		유	8.91
	0.8	무	19.53
		유	10.11

생의 유무에 따른 호안의 경사와 지점별 유속결과를 살펴보면 사면과 인접한 부근에서의 유속이 평균 유속에 비해 약 20% 정도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 식생의 유무에 따른 평균 유속 결과를 비교를 하였을 경우, 식생이 있을 경우 위치에 따라 5~10% 정도 유속이 느려지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 호안의 설계시 1차원적인 단면평균 유속에 의한 평가가 아닌 위치에 따른 지점별 유속에 의한 평가가 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 하도의 특성에 대한 정량적인 분석보단 단순히 식생의 활착유무에 따른

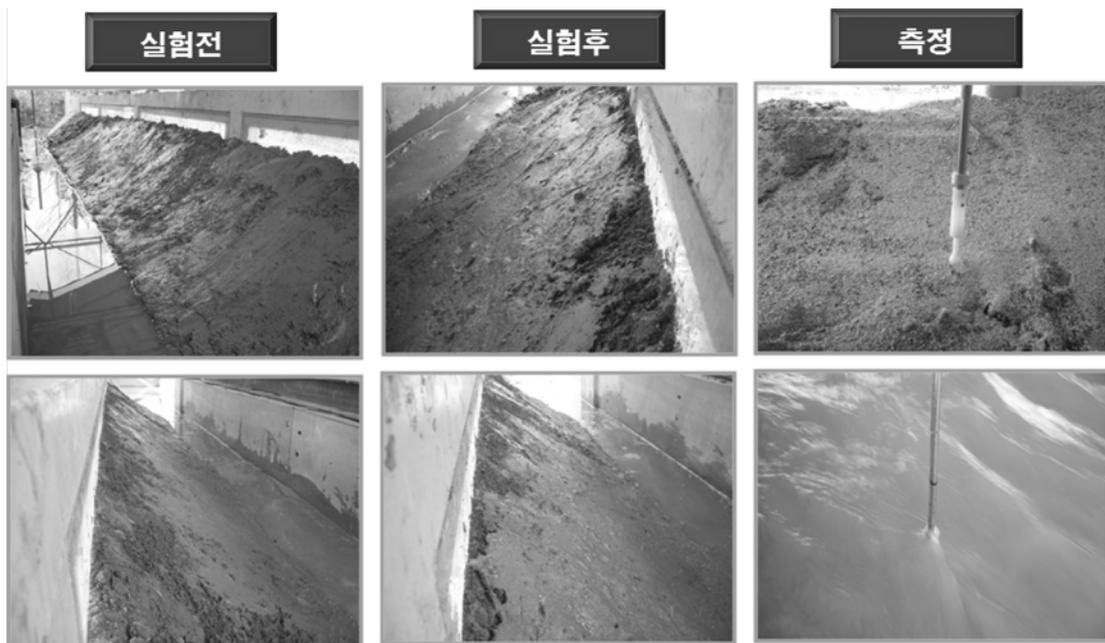
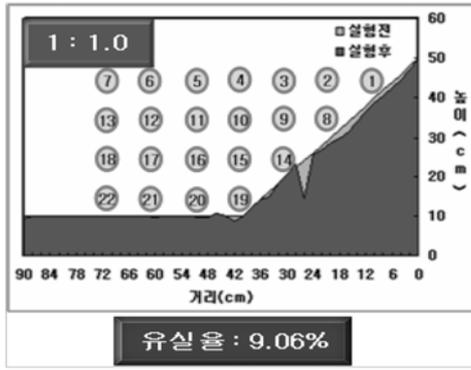
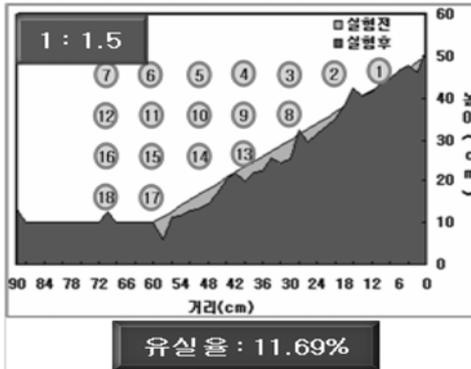


그림 9. 실험 전, 후 및 측정 사진(유속: 0.8 m/s, 식생: 무)



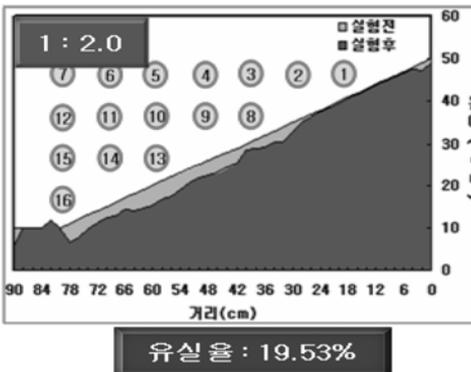
지점별 유속 (m/s)			
1	0.789	12	0.811
2	0.810	13	0.812
3	0.800	14	0.770
4	0.802	15	0.798
5	0.809	16	0.804
6	0.808	17	0.802
7	0.810	18	0.804
8	0.780	19	0.778
9	0.805	20	0.780
10	0.810	21	0.779
11	0.810	22	0.795

(a) 1 : 1.0 유실율 및 지점별 유속



지점별 유속 (m/s)			
1	0.517	12	0.870
2	0.811	13	0.730
3	0.824	14	0.900
4	0.936	15	0.700
5	0.939	16	0.837
6	0.880	17	0.850
7	0.882	18	0.798
8	0.798		
9	0.898		
10	0.974		
11	0.890		

(b) 1 : 1.5 유실율 및 지점별 유속



지점별 유속 (m/s)			
1	0.519	12	0.840
2	0.805	13	0.742
3	0.776	14	0.657
4	0.859	15	0.823
5	0.826	16	0.564
6	0.840		
7	0.850		
8	0.849		
9	0.896		
10	0.856		
11	0.790		

(c) 1 : 1.5 유실율 및 지점별 유속

그림 10. 유속 0.8 m/s 에서의 유실율 평가(식생: 무)

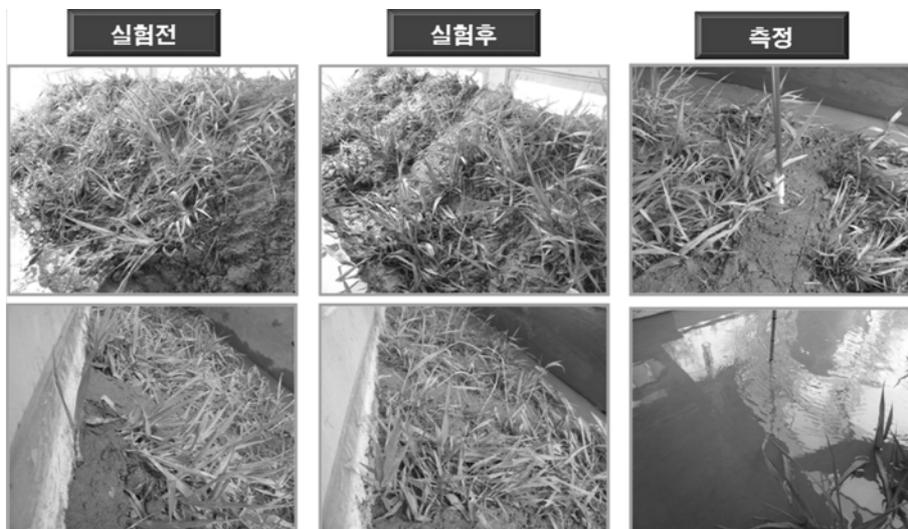
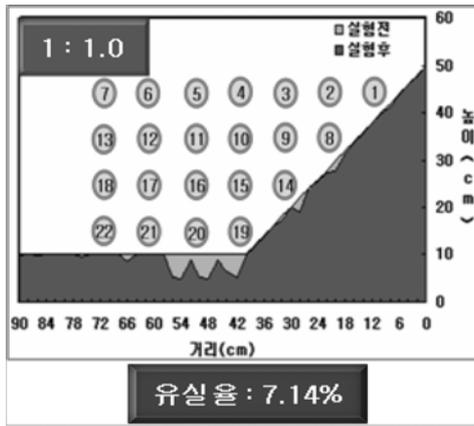
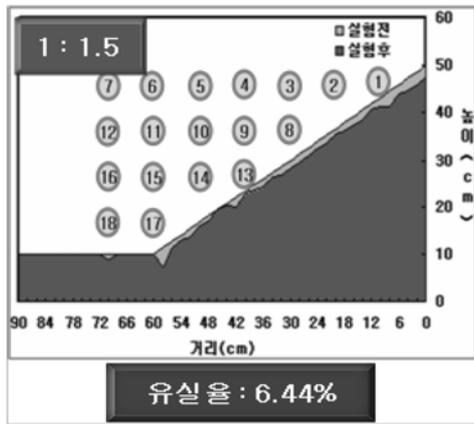


그림 11. 실험 전, 후의 측정 사진(유속: 0.8 m/s, 식생: 무)



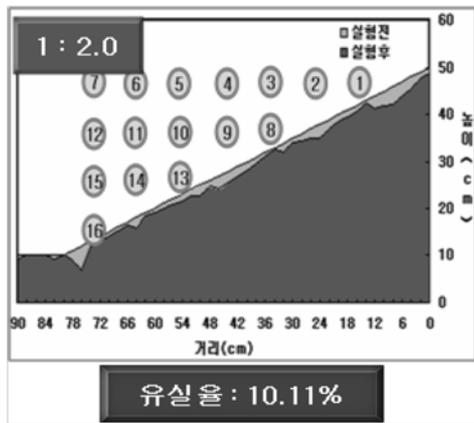
지점별 유속 (m/s)			
1	0.759	12	0.806
2	0.780	13	0.812
3	0.779	14	0.720
4	0.802	15	0.798
5	0.807	16	0.804
6	0.808	17	0.805
7	0.810	18	0.804
8	0.781	19	0.774
9	0.750	20	0.783
10	0.810	21	0.779
11	0.808	22	0.794

(a) 1 : 1.0 유실율 및 지점별 유속



지점별 유속 (m/s)			
1	0.485	12	0.870
2	0.780	13	0.689
3	0.770	14	0.780
4	0.810	15	0.820
5	0.832	16	0.780
6	0.800	17	0.805
7	0.811	18	0.798
8	0.680		
9	0.898		
10	0.810		
11	0.890		

(b) 1 : 1.5 유실율 및 지점별 유속



지점별 유속 (m/s)			
1	0.462	12	0.750
2	0.780	13	0.612
3	0.750	14	0.560
4	0.789	15	0.780
5	0.770	16	0.563
6	0.740		
7	0.778		
8	0.654		
9	0.712		
10	0.780		
11	0.770		

(c) 1 : 2.0 유실율 및 지점별 유속

그림 12. 유속 0.8 m/s 에서의 유실율 평가(식생 유)

복토의 상대적인 유실율을 평가하기 위한 기초적인 실험을 수행하였으며, 향후 원형실험을 통하여 홍수 규모의 유속에 대한 안정성 평가 실험을 수행한 후에 정량적인 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2의 실험결과를 살펴보면 다음과 같다. 수리적 조건이 가장 영향이 큰 단면 평균유속 0.8 m/s, 호안경사 1:1.0의 경우 식생의 유무에 따른 유실율 차이가 20%로 나타났다. 두 번째로 평균유속 0.8 m/s, 호안경사 1:1.5의 경우를 살펴보면 식생의 유무에 따른 유실율 차이가 45%로 큰 값을 보였으며, 마지막으로 실험한 호안경사 1:2.0 식생의 유무에 따른 유실율 차이가 52%로 나타났다. 또한 식생의 유무에 따

른 저감효과를 살펴보면 호안의 경사도가 클수록 식생에 의한 저감효과가 큰 것으로 연구결과 나타났다. 동일 유속 조건시 단면 평균유속 0.8 m/s의 경우 호안경사 1:2.0 에서의 유실율이 식생이 없을 경우 19.5%로 가장 크게 나타나고 있다. 그러나 본 실험에서는 실험 조건시 동일한 단면에서 유속을 맞추기 위해 만재하폭의 조정이 불가피 하여 실험을 수행하였으며, 일부구간에서 경사의 유실율에 대한 결과값에 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 연구 결과에서는 각 호안경사별 유속과, 수심 그리고 식생 유무에 따른 유실율의 크기 정도를 분석하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

본 연구에서는 순간유속자료를 이용하여 식생이 식재된 개수로의 흐름에서 식생의 활착 유무에 따른 복토의 유실율을 평가하였는데 호안경사에 따라서 식생의 유무에 따른 유실율 차이가 52%로 나타났으며, 호안의 경사도가 클수록 식생에 의한 저감효과가 큰 것으로 연구결과 나타났으며, 동일 유속 조건시 단면 평균유속 0.8 m/s의 경우 호안경사 1:2.0 에서의 유실율이 식생이 없을 경우 19.5%로 가장 크게 나타나고 있다.

하천은 다양한 형태와 고유의 특성을 지니고 있으며, 자연형 하천의 고수호안 역시 마찬가지로 수리적 특성 및 식생 특성을 고려하여 설계하는 것이 안정성과 환경에 있어 매우 중요하다. 본 연구에서 수행된 실험결과를 활용하여 고수호안의 설계에 있어 위치별 소류력에 따른 복토의 두께, 보호공의 설치유무, 식생의 활착정도 및 식생밀도 등을 제시하는데 기본 자료가 될 것으로 판단된다. 향후 보다 다양한 실험 조건을 추가하여 유실율 평가를 위한 비교분석에서는 호안 경사별로 따로 분류는 것이 필요할 것으로 판단되며, 동일한 만재하폭에서의 수리실험이 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서의 결과를 활용하여 홍수시 빈번히 발생하는 식생호안의 이탈을 방지하는 연구의 기초자료로 활용될 수 있으며, 보다 효율적이고 자연적인 고수호안에 대한 설계가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설기술혁신연구개발사업인 ECORIVER21 자연과 함께하는 하천복원 기술개발연구단의 지원(과제번호: 3-2)에 의해 수행되었습니다.

- 배상수, 임기석, 허수영, 지홍기 (2001) 돌방대를 이용한 호안구조물의 수리학적특성. 한국수자원학회 학술발표회논문집, pp.763-768.
- 신정민, 우성권, 이시욱, 김옥기 (2008). 하천시설물 공사의 기획 단계 개략공사비 산정체계 개발. 대한토목학회논문집, Vol.28, No.3D, pp.371-381.
- 우효섭 (1999) 지난 10년간 하천유사 연구실적과 최근의 연구동향(1). 한국수자원학회지, Vol.32, No.6, pp.128-143.
- 이동섭 (2006) 식생 조도 계수 산정을 위한 선별된 식생에 관한 실험 연구. 한국건설기술연구원 연구보고서.
- 이울경 (1999) 하천식생의 군락분류. 석사학위논문, 계명대학교.
- 최윤주 (2001) 동천의 자연형 하천 개발·복원 방안 : 자연형 하천 복원 사례 연구를 중심으로
- 황경우, 전세진, 강창훈, 손원식 (2008) 하천공사에 있어 식생호안공법적용을 위한 설계개선방안 모색. 한국수자원학회 학술기술기사, Vol.41, No.9, pp.62-69.
- 國土開發技術研究센터 (2003) 護岸의 力學的 設計法.
- Fiuzat, A. A. and Skogerboe, G. V. (1983). Comparison of open channel conriction ratings. *J. of Hydraulic Engineering*, 109(12), pp.1589-1602.
- Tenna Riis, and Barry Biggs (2003). Steam vegetation and flow regimes. *Water & Atmosphere*, 11(1)

© 논문접수일 : 10년 02월 17일  
 © 심사의뢰일 : 10년 03월 02일  
 © 심사완료일 : 10년 03월 16일