

# 삼목에 의한 갯버들 근계의 토양전단강도 보강효과

이춘석\* · 임승빈\*\*

\*진주산업대학교 조경학과 · \*\*서울대학교 조경학과

## The Effect of Reinforcing Soil Shear Strength by a Root System Developed from Direct Sticking of *Salix gracilistyla* Miq.

Lee, Chun-Seok\* · Im, Seung-Bin\*\*

\*Dept. of Landscape Architecture, Jinju Nat'l University

\*\*Dept. of Landscape Architecture, Seoul Nat'l University

### ABSTRACT

The purpose of this study was to verify the shore margin protection effect of a root system developed from direct sticking of *Salix gracilistyla* Miq., focusing on the reinforcement of soil shear strength.

The materials were 20cm long sticks whose average diameter and weight were 7.52mm and 14.58g respectively, and sandy loam(Sand 60.36%, Silt 28%, Clay 11.64%), whose maximum dry weight( $V_{dmax}$ ) was  $1.59gf/cm^3$  at the water ratio( $W_{opt}$ ) 13.8%.

The direct shearing test(KS F 2343) was applied to cylindric columns(diameter 132mm) of pure soil and two years old root reinforced soil. At each condition of vertical stress,  $10N/cm^2$ ,  $14.41N/cm^2$  and  $18.82N/cm^2$ , five soil+root columns were sheared. After shear tests, the root area ratio and soil moisture on the shear plane were measured.

The results of this research were as follows:

1. The average of root area ratio was 1.86% and the soil moisture 14.67%.
2. Two years old root system was found to increase the soil shear strength of pure soil in terms of Cohesion(C) and Inner Friction Angle( $\phi$ ) as follows.

	Mohr-Coulomb Failure Envelop	Cohesion $N/cm^2$	Inner Friction
Pure Soil	$S = 1.71 + \sigma \tan 20.81^\circ$	$C = 1.71$	$\phi = 20.69^\circ$
Root Ball	$S = 2.68 + \sigma \tan 38.68^\circ$	$C = 2.68$	$\phi = 38.68^\circ$

† Corresponding author : Chun-Seok Lee, Dept. of Landscape Architecture, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea. Tel : +82-55-751-3305, E-mail : stoney@jinju.ac.kr

3. The relationship between root area ratio and the increased shear strength can be presented with the following equation.

$$\Delta S \approx 0.33 \cdot Tr \cdot Ar/A$$

$\Delta S$  : Increased Shear Strength,  $Tr$  : Average Tension Strength of Root,  $Ar/A$  : Root Area Ratio

**Key Words** : Bio-Engineering, Salix, Soil Shear Strength, Root System

## I. 서론

훼손된 생태계 복원 및 네트워크 형성이라는 측면에서 도시지역에서도 인공적인 습지를 조성하기 위한 노력이 시도되고 있고, 기존의 치수 및 이수 기능 위주로 인공화된 수변 공간을 자연적인 습지로 복원하려는 노력들도 활발하게 진행되고 있는데, 습지 복원 및 신규 조성 공사에서 공법적으로 가장 민감한 부분 중의 하나가 수제부(水際部)의 생태적 호안(護岸) 처리이다(김귀곤과 조동길, 1999).

식생도입에 따른 생태 및 생물공학적(Bio-Engineering)<sup>1)</sup> 효과에 대한 다양한 연구 결과들이 제시되고 있는데, 식물의 뿌리에 의한 사면의 안정성 변화를 평가한 연구(Springer et al, 1985 ; Sotir and Nunnally, 1995 ; Simonds and Collinson, 2001 ; Day, 1995 ; A-bernethy and Rutherford, 2000)와 식물의 줄기나 잎에 의한 사면 침식억제 효과에 대한 연구(Coppin, 1990 ; Morgan and Rickson, 1995 ; Micheli and Kirchner, 2002) 등이 주를 이루고 있는 반면에, 습지 수목의 생물공학적인 역할, 특히 식물의 수제부 보호 효과에 관한 연구는 미미한 실정이다.(이진원과 유대영, 1997 ; 이삼희 등, 1999).

우리나라 자연 습지의 수제부의 비교적 안정화된 수변식생대(riparian)에 분포하는 목본식물은 버드나무류(*Salix*)가 대표적이며, 특히 모래와 자갈의 비율이 높고 물과 직접 접촉하는 수제부에는 관목인 갯버들(*Salix gracilistyla* Miq.)이 우점을 이루고 있는 것으로 알려져 있다(전승훈 등, 1988 ; 신정익과 차영일, 1999 ; 안영희 등, 2001 ; 이인순 등, 2001). 갯버들을 포함하는 버드나무과(Salicaceae) 식물은 선구식물로서 척박한 토양에서도 가지 및 뿌리의 빠른 생장속도와 손쉽게 영

양번식이 가능하다는 특성 때문에(이영노, 1996), 이미 오래 전부터 사면의 원활한 배수 및 사면지지 또는 재해복구 등에 많이 이용되어 왔으며(Coppin, 1990 ; Gary and Sotir, 1996), 최근 개발되고 있는 생태 호안 조성 관련 공법에서도 주된 생물 소재로 이용되고 있다(최정권, 1997 ; 김혜주, 2000; 2001).

그러나, 이와 같은 갯버들의 소재로서의 가능성에도 불구하고 객관적인 생물공학적인 효과, 특히 생육지인 습지수제부의 호안(護岸) 효과, 특히 갯버들을 호안 소재로 적용시 중요한 공학적 근거가 될 수 있는 뿌리부분의 토양 보강 효과에 대한 객관적인 자료가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 생태적 호안 공법에 적용되는 대표적인 목본식물인 갯버들(*Salix gracilistyla* Miq.) 근계(根系, 뿌리)의 토양 전단강도 보강 효과를 공학적으로 검토 해석코자 하였다.

## II. 기존 이론 고찰

지반 및 사면의 안정성을 평가하기 위해서 토질역학에서 가장 많이 사용하고 있는 이론은 Mohr와 Coulomb의 파괴이론(Failure Envelope)이다. 지반이 붕괴되기 직전의 지반 내 임의의 구성요소에 작용하는 다양한 주응력의 한계상황을 식과 도형으로 표현한 Mohr의 파괴포락선(Failure Envelope)과 흙의 저항력은 응력과 관계가 있는 성분과 관계가 없는 성분으로 분리될 수 있다는 Coulomb의 전단강도에 대한 개념을 합하여 흙의 전단강도 특성을 표현한 것을 Mohr-Coulomb의 파괴포락선(이하 '파괴포락선')이라고 한다(그림 1 참조).

이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{식 1})$$

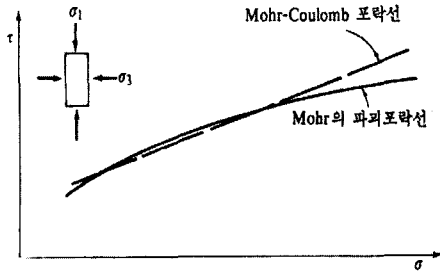


그림 1. Mohr-Coulomb의 파괴 포락선

위의 식에서  $S$ 를 전단응력,  $\sigma$ 는 수직응력,  $c$ 를 점착력(Cohesion),  $\phi$ 를 내부마찰각(angle of internal friction)이라고 한다. 여기서,  $c$ 와  $\phi$ 값은 흙의 전단강도를 결정하는데 대단히 중요한 성분이며, 이들을 합쳐서 흙의 강도정수(Strength Parameter)라고 한다(김상규, 1999).

토양 속에 식물의 뿌리가 포함되어 있는 경우, 토양과 뿌리는 '콘크리트+철근'과 같이 서로 결합되어 하나의 합성체를 형성한다. 사면에서 붕괴가 일어날 때, '토양+뿌리'는 붕괴에 의해서 밀려나는 부분과 그렇지 않은 부분으로 분리되며, 전단면 상의 뿌리에는 전단변위가 커질수록 인장력이 증가하게 되어 '흙+뿌리' 결합체의 전단력도 증가하게 된다. 이러한 현상을 예측하기 위한 기본적인 모델이 Waldron and Dakessian(1981), Wu et al(1988), Gray and Leser(1989)에 의해서 발달되어 왔다.

Waldron and Dakessian(1981)과 Wu et al.(1988)은 토양에 전단이 발생할 때, 뿌리에 발생하는 인장력은 전단에 직접적으로 저항하는 전단면에 평행한 부분과 전단부의 결속력을 증가시키는 전단면에 수직한 부분으로 구분되고, 이 두 가지의 힘에 의해서 전단응력이 증가된다고 설명하고 있다<sup>2)</sup>.

이상의 이론을 바탕으로 본 연구에서는 직접 전단 시험을 통하여 뿌리분 공시체와 단순 토양 공시체의 전단강도를 측정하여 비교하였으며, 뿌리분 공시체의 전단면상에 분포하는 뿌리의 단면적과 뿌리의 인장강도를 바탕으로 기존 연구 및 이론과 비교 고찰하였다.

### III. 재료 및 방법

#### 1. 실험 재료

##### 1) 공시 식물 재료

균일한 생육 조건과 실험의 편의를 위하여 공시체용 삼수는 경상남도 사천시와 진주시, 산청군의 경계지점인 덕천강 하류의 하상 퇴적부에 위치한 갯버들 군락지의 1년생 휴면지를 2000년 3월 채취하여 사용하였다. 채취된 삼수는 20cm의 길이로 절단하여 선발하였으며, 균등한 규격을 유지하도록 주의하였다(직경 7.52±0.22 mm, 중량 14.58±0.42g). 또한, 자연적인 생장에 영향을 미칠 수 있는 일체의 화학적 처리는 배제하였다.

##### 2) 공시 토양 재료

갯버들 자생지의 토양과 실험에 사용된 토양의 조건을 일치시키기 위해서 실험포지의 토양은 삼수 채취 지점의 토양으로 치환하였다. 실험에 사용된 토양의 입도 구성을 체 가름과 비중계법으로 분석한 결과, Sand 60.36%, Silt 28%, Clay 11.64%의 사양토(Sandy Loam)로 확인되었다.

공시토양은 비중( $G_s$ )이 2.57이며, 표준다짐시험(KS F 2312) 결과 최적 함수비( $W_{opt}$ )가 13.8%일 때, 최대 건조 단위 중량( $v_{dmax}$ )은 1.59gf/cm<sup>3</sup>으로 분석되었다. 식물의 생장과 관련이 있는 화학적 특성은 표 1과 같으며, 식물의 생장에 장애를 초래할 정도의 요소는 없는 것으로 분석되었다.

#### 2. 실험 방법

##### 1) 뿌리분 공시체 조성 방법

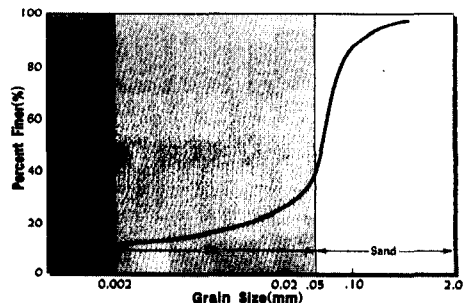


그림 2. 공시토양의 입도구성

표 1. 공시토양의 이화학적 특성

물성	Gs			$V_{dmax}$		$W_{opt}$		
	2.57			1.59gf/cm <sup>2</sup>		13.8%		
화학성	pH 1:5(H <sub>2</sub> O)	EC rS/cm	OM g/kg	Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg	Ex. cation(cmol <sup>+</sup> /kg)			
					K	Ca	Mg	Na
	6.75	0.03	9.30	87.6	0.21	9.18	1.68	0.20

본 실험에서는 갯버들 뿌리의 토양 전단강도 보강효과를 분석하기 위해서 내경이 132.5mm, 외경이 141.5mm인 폴리염화비닐관(PVC Ø125mm)에 갯버들을 삼목하여 성장시킨 공시체를 이용하였다. 이는 자연상태와 비슷한 조건에서 갯버들을 성장시키고, 교란되지 않은 상태의 뿌리분 공시체를 형성하기 위함이었다.

폴리염화비닐관은 10cm 길이 단위로 절단되었으며, 갯버들 근계의 생육 토심확보를 위해 10cm 길이 단위를 네 개씩 결합하여 식재용기로 사용하였다. 또한, 용기 식재시 발생할 수 있는 뿌리의 집중순환현상(Circling)이나, 통기부족현상을 제거하기 위하여 각 단위 길이(10cm) 당 직경 8mm의 천공 서른 개(1/13cm<sup>2</sup>)를 만들었다(Appleton, 1989).

공시토양을 충전시킨 각 식재용기에는 20cm 길이의 삽수를 삼목하여 2000년 6월부터 2년간 동일한 토양으로 조성된 포장에 매설하여 생육시켰다. 이는 최대한 자연상태와 동일한 조건의 뿌리 분포 상태에서의 사면 토양 보강효과를 해석하기 위함이었다. 2년간 성장한 갯버들 공시체는 2002년 7월 회수되어 직접전단실험에 이용되었다.



그림 3. 전단강도 측정용 뿌리분 공시체

## 2) 토양 전단강도 측정 방법

본 연구의 대상이 되는 수체부는 주 구성 토양이 점착력이 약한 사질토와 자갈로 구성되어 있는 것이 일반적이기 때문에, 사질토의 전단강도 측정에 적합하고 실험장치가 비교적 간단한 직접전단시험법(KS F 2343)에 의해 토양 전단강도 정수를 구하였는데(신방웅 등, 1997), 토양과 뿌리가 결합된 형태의 뿌리분 공시체의 전단강도를 측정해야 하는 연구의 특성 때문에, 대직경 공시체를 전단할 수 있는 별도의 전단강도 시험기를 제작하여 실험에 이용하였다. 수평응력의 측정에는 500kgf 용량의 환상검력계와 정밀도 1/100mm인 디지털 다이얼 게이지를 사용하였다. 수평변위 증가 속도는 0.07 mm/sec였으며, 전단 응력이 최고점에 도달하거나, 수평변위가 전단 공시체 직경(132mm)의 15%에 해당되는 19.8mm에 도달했을 때를 전단시점으로 간주하여 전단강도를 측정하였다. 단위면적당 수직응력은 10N/cm<sup>2</sup>, 14.41 N/cm<sup>2</sup>, 18.82N/cm<sup>2</sup>의 세 단계로 구분하여 적용하였으며, 각 수직 응력 단계별로 공시체를 달리하여 다섯 번 반복 측정하였다. 뿌리분 공시체의 토양 함수비는 14.67%였다.

뿌리의 유무에 따른 토양 전단강도 변화를 명확하게 비교하기 위해 단순토양 공시체도 뿌리분 공시체와 동일한 규격으로 최적함수비 상태에서 최대 입자 밀도 95% 이내로 다짐하여 조성하였으며, 배수가 전제된 조건에서 전단하였다.

## 3) 전단면 상의 뿌리 분포 조사 방법

기존의 식물 뿌리의 토양 전단강도 보강효과에 관한 연구에서 전단강도의 보강은 전단면 상에 분포하는 뿌리의 단면적비와 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Waldron, 1977 ; 성상규, 1991 ; 임충모, 1997). 이에

본 연구에서는 공시체 전단면 상에 분포하는 갯버들 뿌리 단면적 계산을 위해 코어절단법(The Core-break Method)을 응용하였는데(Bohm, 1979), 전단강도 측정이 끝난 10cm 길이의 공시체 코어를 용기 밖으로 약 1cm 정도 압출시켜 토양을 털어서 제거한 후, 노출되는 모든 뿌리의 직경을 측정하였다.

4) 뿌리의 인장강도 측정 방법

뿌리의 인장강도는 목재의 인장강도 측정 방법(KS F 2207)에 준하여 측정하였다. 다만, 수목의 생 뿌리는 단면 모양이 일정치 않으며, 수분함량이 높고 압축강도가 약하여 일반적인 인장강도 측정을 위한 시편 고정용 척의 사용이 곤란하였다(Cofie et al., 2001)<sup>3)</sup>. 이에 본 연구에서는 뿌리 시료의 길이를 약 30cm 길이로 조제하였으며, 시료의 고정에는 마찰력이 좋은 조경용 고무 줄과 폴리아미드 편직 매듭을 뿌리의 직경에 따라 구분하여 적용하였다.

**IV. 결과 및 고찰**

1. 공시토양의 전단강도 특성

단순토양 공시체의 전단응력은 초기에 급격히 증가한 후, 수평변위 2.5~5mm 사이에서 증가세가 둔화되며, 수평변위 12.5mm 정도에서 극에 달하였다. 각 수직응력별 평균 전단강도는 표 2와 같았다.

따라서, 단순토양 공시체의 파괴포락선은 그림 4와 같이 표현되었으며, 점착력 C 값은 1.71N/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각  $\phi$  값은 20.81°로 해석되었다.

2. 갯버들 뿌리가 보강된 토양의 전단강도 특성

표 2. 공시토양의 전단강도

구분	$\sigma_v$ (N/cm <sup>2</sup> )	$S_o$ (N/cm <sup>2</sup> )
$\sigma_{v1}$	10	5.49
$\sigma_{v2}$	14.41	7.15
$\sigma_{v3}$	18.82	8.82

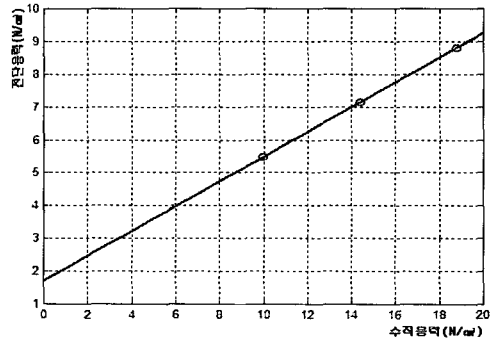


그림 4. 공시토양의 파괴포락선

수직응력( $\sigma_v$ )이 10N/cm<sup>2</sup>일 때의 갯버들 뿌리가 보강된 뿌리분 공시체의 최대 전단응력은 전단시 수평변위가 공시체 직경의 15%에 해당되는 19.3mm 지점에 도달했을 때의 값으로 해석하였으며, 평균값은 10.09 N/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 동일한 수직응력 조건에서 공시토양의 전단강도가 5.49N/cm<sup>2</sup>임을 고려하면, 갯버들 뿌리가 보강된 공시체의 전단강도는 직경 15% 수평 변위 지점을 기준으로 순수토양 공시체의 약 184%에 이르는 것으로 해석되었다. 이 때의 전단면 상에 분포한 갯버들 뿌리 단면적은 평균 10.21cm<sup>2</sup>이었으며, 전단면 대비 비율은 1.85%였다.

수직응력  $\sigma_v = 14.41$ N/cm<sup>2</sup>일 때의 뿌리분 공시체의 전단강도는 평균 15.39N/cm<sup>2</sup>로 해석되었다. 동일한 수직응력 조건에서 단순토양공시체의 전단강도가 7.15 N/cm<sup>2</sup>임을 고려하면, 뿌리분 공시체의 전단강도는 순수토양 공시체의 약 215%에 이르는 것으로 해석되었다. 이 때 전단면 상에 분포한 갯버들 뿌리 단면적은 평균 12.09cm<sup>2</sup>이었으며, 전단면 대비 뿌리 비율은 평균 2.19%였다.

수직응력  $\sigma_v = 18.82$ N/cm<sup>2</sup>일 때의 뿌리분공시체의 전단강도는 평균 17.15N/cm<sup>2</sup>로 해석되었다. 동일한 수직응력상태에서 공시토양의 평균 전단강도가 8.82 N/cm<sup>2</sup>임을 고려하면, 갯버들의 뿌리분 공시체의 전단강도는 순수토양 공시체의 약 213%로 나타났다. 이 때의 전단면 상에 분포한 갯버들 뿌리 단면적은 평균 8.50cm<sup>2</sup>이었으며, 전단면 대비 뿌리 단면적 비율은 평균 1.54%였다.

각 수직응력별로 평균 전단응력을 비교했을 때, 수직응력과 전단강도는 비례 관계를 보인다. 그러나, 수직

표 3. 수직하중별 뿌리분 공시체의 전단강도 비교

구분	$\sigma_v$ (N/cm <sup>2</sup> )	Sr (N/cm <sup>2</sup> )	So (N/cm <sup>2</sup> )	$\Delta S$ (N/cm <sup>2</sup> )	Ar/A(%)
$\sigma_{v1}$	10	10.09	5.49	4.6	1.85
$\sigma_{v2}$	14.41	15.39	7.15	8.24	2.19
$\sigma_{v3}$	18.82	17.15	8.82	8.33	1.54

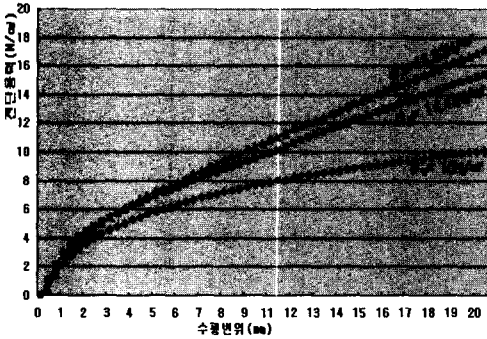


그림 5. 수직응력에 따른 뿌리분공시체의 전단응력 변화

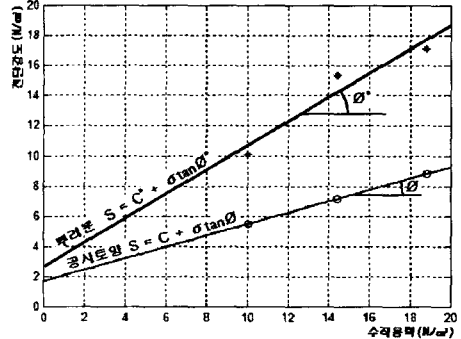


그림 6. 공시토양과 뿌리분의 파괴포락선 비교

하중을 등간격으로 적용하였음에도 불구하고, 수직응력( $\sigma_v$ )이 14.41N/cm<sup>2</sup>일 때의 전단응력 변화 곡선은 수직응력( $\sigma_v$ )이 10N/cm<sup>2</sup>일 때보다 18.82N/cm<sup>2</sup>인 경우에 가깝게 나타났다(그림 5 참조). 이는 표 3에서와 같이 전단면 상의 평균 뿌리 면적비(Ar/A)가 다른 두 경우보다 상대적으로 높기 때문으로 판단되었다.

3. 공시토양과 뿌리분의 전단강도 특성 비교

실험에 적용된 수직응력을 가로축으로 하고, 각 수직응력에 따른 전단강도를 세로축으로 하여 뿌리분 공시체의 전단강도와 단순토양의 전단강도를 파괴 포락선으로 표현하여 비교하면 그림 6과 같다. 이 때, 전단면 상에 분포한 뿌리 면적비가 공시체 간에 다소 차이가 있었기 때문에, 공시체의 평균뿌리면적비(1.86%)를 기준으로 선형해석(R<sup>2</sup>=92.3)한 결과를 바탕으로 파괴 포

락선을 도출하였다.

두 포락선을 비교할 때, 공시토양의 내부마찰각이 20.81°인데 비해, 뿌리가 보강된 뿌리분 공시체의 내부마찰각은 38.68°로 증가한 것으로 분석되었다. 또한 점착력 C는 1.71N/cm<sup>2</sup>에서 2.68N/cm<sup>2</sup>로 증가한 것으로 나타났다(표 4 참조).

4. 뿌리의 인장강도에 따른 토양 전단강도 보강 효과 고찰

갯벌들 뿌리의 인장력에 의한 토양 전단강도 보강력이 어느 정도인가를 파악하기 위해서 우선 갯벌들 뿌리의 인장강도를 측정하여, 뿌리의 단면적과 최대인장력의 관계를 회귀분석한 결과 갯벌들 뿌리의 인장강도는 약 13.72N/mm<sup>2</sup>로 분석되었다(그림 7 및 식 2 참조).

표 4. 공시토양과 뿌리분의 전단강도 비교

	파괴포락선 ( $c + \sigma \tan \phi$ )	점착력 (N/cm <sup>2</sup> )	내부마찰각
공시토양	$S = 1.71 + \sigma \tan 20.81^\circ$	C = 1.71	$\phi = 20.81^\circ$
뿌리분	$S = 2.68 + \sigma \tan 38.68^\circ$	C = 2.68	$\phi = 38.68^\circ$

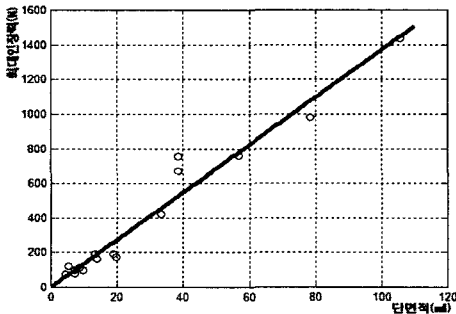


그림 7. 뿌리단면적과 인장강도의 관계

$$P_{max} = 13.72 \cdot A_R \quad (\text{식 } 2)$$

여기서,  $P_{max}$  : 최대인장력(N),  
 $A_R$  : 뿌리 단면적(mm<sup>2</sup>)

또한, 갯버들 뿌리의 인장강도와 뿌리분의 전단강도의 관계를 분석한 결과, 그림 8과 같이 뿌리에 의한 토양 전단강도 증가치는 전단면의 단위면적당 평균 뿌리 인장강도와 비례하는 것으로 나타났다.

전단면상의 단위면적당 뿌리의 평균 인장강도와 토양 전단강도 증가치의 비례상수는 적용한 수직응력에 따라서 달리 도출되었는데, 그 평균값을 취하여 0.33을 비례상수값으로 취하여, 비례관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta S_R \approx 0.33 \cdot Tr \cdot Ar/A \quad (\text{식 } 3)$$

여기서,  $\Delta S$  : 토양 전단강도 보강치,  
 $Tr$  : 뿌리의 평균 인장강도,  
 $Ar/A$  : 전단면의 뿌리 단면적비

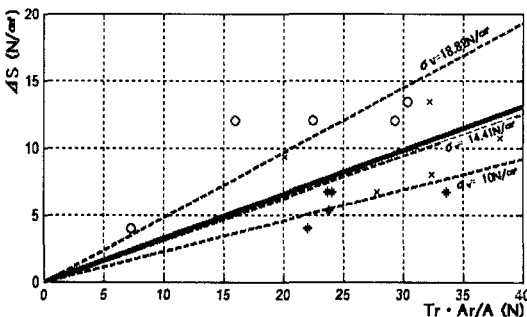


그림 8. 단위면적당 뿌리면적비와 전단강도 보강치  
 \* : 10N/cm<sup>2</sup>, x : 14.41N/cm<sup>2</sup>, o:18.82N/cm<sup>2</sup>,  
 — : total avg.

Waldron(1977)은 여러 종류의 흙 속에 동일 종의 뿌리를 관입시켜 전단실험을 한 결과, 전단강도는 뿌리의 면적비에 따라서는 비례적으로 증가하지만 흙의 종류에 따라서는 현저한 차이가 나지 않는다는 결과를 제시하고 있다. 따라서, 뿌리에 의한 전단강도 보강효과 해석에 있어서는 흙의 종류보다는 뿌리의 특성이 중요한 인자라고 할 수 있다.

Gray and Leser(1989)는 Waldron and Dakessian(1981)과 Wu et al.(1988)의 현장 및 실내직접전단 시험 결과를 바탕으로 전단면에 수직한 뿌리에 의한 토양 전단강도 증가치를 다음과 같이 제시하였다.

$$\Delta S_R \approx 1.15 T_R(A_R/A) \quad (\text{식 } 4)$$

물론 이 경우, 모든 뿌리의 '인장응력이 모두 동원된다'는 것을 전제로 한 계산값이다. 그러나, Waldron(1977)은 실제의 경우 사면 파괴가 일어날 때 모든 뿌리의 '인장응력이 모두 동원된다'는 실험의 전제 조건과는 달리 뿌리의 전단강도 전체가 동원되는 경우는 생기지 않으며, 사면 파괴 도중에 뿌리가 끊어지더라도 이러한 현상은 발생하지 않는다는 것을 밝혀 낸 바 있다.

국내에서는 성상규(1991)가 밤나무가 식재되어 있는 일반 사면을 대상으로 한 현장실험 결과, 전단면상의 뿌리 면적비가 0.14%이며, 뿌리 평균 인장강도의 51.5%가 전단강도 보강에 동원되었다는 결과를 제시한 바 있다.

$$\Delta S_R \approx 0.515 T_R(A_R/A) \quad (\text{식 } 5)$$

이와 같은 기존연구에서 제시한 뿌리 인장강도에 의한 보강 효과와 본 연구의 보강효과를 비교할 때, 상당한 차이가 발생하는데, 이는 실험 방법과 식물, 토양 및 전단 해석 기준점의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다(표 5 참조).

Gary and Leser(1989)의 연구결과는 뿌리 인장강도와 토양 전단강도의 이론적 보강 모델에 실험으로 측정된 전단시의 뿌리 변형각을 대입하여 도출한 값이다. 또한, 성상규(1991)의 연구결과는 현장에서 유압 기구를 이용해서 측정된 전단응력의 최대치(Peak)값을 분석한 결과이다. 반면에, 본 연구의 결과는 2년생 삼목묘

표 5. 뿌리의 인장강도와 토양 전단강도 보강 모델 비교

연구자	결과	실험방법 특징	
		실험방법	전단강도 해석방법
Gary & Leser(1989)	1.15 Tr · Ar/A	실험 및 모델 해석	모델 해석
성상규(1991)	0.515 Tr · Ar/A	현장 직접전단시험	밤나무 뿌리 대상 산지 토양 측정
본 연구	0.33 Tr · Ar/A	실내 직접전단시험	갯버들 대상 하천 토양 측정

의 뿌리로 구성된 뿌리분 공시체를 실내 직접 전단시험으로 측정한 것이며, 공시체 직경의 15%가 전단되었을 때의 값을 비교한 것이다. 또한, 실험에 사용된 토양과 식물의 차이 등을 고려할 때, 본 연구의 측정 결과는 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

이상을 정리할 때, 2년생 갯버들 삼목묘 근계는 토양 전단강도 보강 측면에서 점착력(C)과 내부마찰각( $\phi$ )을 각각 두 배씩 증가시키는 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 실제 습지수제부(濕地水際部)에 분포하는 갯버들은 본 실험에서 사용된 삽수에 비해 훨씬 성숙된 개체들이라는 점을 고려할 때, 갯버들 근계의 실질적 호안 효과는 본 실험의 결과보다 뛰어난 것이다. 다만, 본 실험의 결과만으로 국한해서 살펴볼 때, 현장에서 직접 삼목묘 2년생 갯버들 삼목묘 근계에 의해서도 분명한 호안 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

갯버들 뿌리가 토양의 전단강도를 보강하는 효과를 분석하기 위해 직경 132.6mm, 높이 400mm의 PVC 용기에 2000년 5월에 갯버들을 삼목하고 2002년 7월까지 생장시킨 뿌리분 공시체를 이용하여 직접전단시험으로 전단강도를 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 수직응력을 10N/cm<sup>2</sup>, 14.41N/cm<sup>2</sup>, 18.82N/cm<sup>2</sup>로 구분하여 전단강도를 측정한 결과, 갯버들 뿌리가 관입되지 않은 단순토양의 전단강도는 수직응력에 따라서 각각 5.49N/cm<sup>2</sup>, 7.15N/cm<sup>2</sup>, 8.82N/cm<sup>2</sup>로 수직응력에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이 값들을 이용하여 파괴포락선을 작도한 결과 공시토양의 내부마찰각  $\phi$ 는 20.81°로 분석되었으며, 점착력 C는 1.71N/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

2. 위와 동일한 수직응력 하에서 뿌리분 공시체의 직접전단시험을 수행한 결과, 수직응력에 따라서 각각 10.09N/cm<sup>2</sup>, 15.39N/cm<sup>2</sup>, 17.15N/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이 값을 바탕으로 작도된 파괴포락선의 기울기 즉, 뿌리로 보강된 토양의 내부마찰각  $\phi$ 는 38.68°로 분석되었으며, 점착력 C는 2.68N/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 따라서, 전단면 상의 뿌리분포면적비가 평균 1.86%일 때, 본 실험에서와 동일한 조건의 토양과 갯버들 뿌리 분포 상황에서 점착력 C는 1.71N/cm<sup>2</sup>에서 2.68N/cm<sup>2</sup>로, 내부마찰각  $\phi$ 는 20.81°에서 38.68°로 각각 증가하는 것으로 해석되었다.

3. 갯버들 뿌리의 인장강도가 토양 전단강도에 미치는 보강 정도를 파악하기 위한 분석에서 갯버들 뿌리의 인장강도는 13.72N/mm<sup>2</sup>인 것으로 측정되었다. 또한, 뿌리의 단위면적당 평균 인장강도와 토양 전단강도 보강치의 관계를 분석한 결과, 전단면상에 분포하는 평균 뿌리 인장력의 33%가 토양 전단강도의 보강에 동원된 것으로 해석되었다.

본 연구는 식물의 생물공학적 특성과 역할에 관한 실증적 연구가 부족한 상황에서 생태복원의 주된 관심 대상이 되고 있는 습지(濕地)의 수제부(水際部)에 분포하고 있는 대표적인 목본 수목인 갯버들의 토양 보강 효과를 직접적인 실험을 통하여 해석한 데 의의가 있었다. 특히, 수변에서 직접적으로 측정하기 어려운 뿌리가 포함된 토양의 전단강도 측정을 공시체 배양을 통하여 직접적으로 수행함과 동시에, 토질역학에서 토양의 안정성과 강도를 표현하는 방식인 파괴포락선으로 제시함으로써 갯버들 뿌리가 토양의 전단강도 보강에 기여하는 바를 수치로 비교한 점과, 일정 규격으로 조성된 뿌리분 공시체와 직접전단시험기를 이용한 실내시험을 통하여 토양 보강효과를 측정함으로써 향후 생태



복원 관련 연구에 적용할 수 있는 연구 방법론을 제시한 점이 본 연구의 의의라고 할 수 있다.

그러나, 갯버들이 주로 생육하는 수제부의 특성 상, 현장 토양의 다양한 수분 조건과 현장에서 생육 중인 식물을 직접적인 대상으로 하지 못한 점, 다짐된 토양의 시간경과에 따른 강도 변화를 고려하지 못한 점이 본 연구의 한계이다. 따라서, 현장 적용을 위해서는 이러한 조건들에 대한 고려가 충분히 이루어진 상태에서의 후속연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

주 1. '생물공학적(Bio-Engineering 또는 Bio-Technical)'이란 생물적 과정의 기술적 이용으로서, 식물을 마치 토목재료처럼 이용하는 것을 말하며, 생물공학적 소재의 구비조건으로는 물리적 상해에 대한 재생력과 저항력이 있어야 하며, 뿌리조직은 토양을 지지할 수 있어야 한다(김혜주 등, 1998 ; Coppin, 1990 ; Gary and Leaser, 1989).

주 2. 이 경우 다음 가정을 전제로 하고 있다. ① 뿌리는 전단영역 주변에 마찰이나 점착력에 의해 빠져 나오지 않도록 충분한 길이와 가지를 고정되어 있다. ② 모든 뿌리는 전단면에 수직하게 배치되어 있다. ③ 모든 뿌리의 인장강도가 모두 동원된다.

주 3. Cofie et al(2001)은 토양의 보강효과 해석에 이용되는 뿌리의 인장강도와 전단강도의 측정방법에 대한 연구에서 목재 크랩프를 고안하여 적용하였으나, 아직 표준화된 방법이 아니고, 본 실험의 대상 뿌리의 직경이 비교적 작은 것으로 구성되어 있어 적용에 어려움이 있었다.

### 인용문헌

1. 김귀곤, 조동길(1999) 인공습지 조성후 생물다양성 증진 효과에 관한 연구. 한국조경학회지 27(3):1-17.
2. 김상규(1999) 토질역학. 서울:청문각.
3. 김혜주, 이준현(1998) Salix 종의 생물공학적 이용성에 관한 연구. 한국조경학회지 26(3):143-151.
4. 김혜주(2000) 생물공학적 하안 시공공법. 대한민국특허청공개특허공보, 특2000-0004831.
5. 김혜주(2001) 생물공학적 호안공법. 대한민국특허청공개특허공보, 특2001- 0004830.
6. 김상규(1991) 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 연구. 고려대학교 석사학위 논문.
7. 신방용, 김홍용, 최기봉, 이준대, 신진환, 김주섭(1997) 건설재료 시험. 서울:구미서관.
8. 신정이, 차영일(1999) 갯버들(*Salix gracilistyla* Miq.)의 질소와 인 제거능력. 한국환경생물학회지 17(4):449-457.
9. 안영희, 양영철, 전승훈(2001) 안성천 수계의 버드나무과 식물의 분포특성에 관한 연구. 한국환경생태학회지 15(3):213-223.
10. 이삼희, 이진원, 옥기영(1999) 하천 식생에 의한 수리특성 예측모형 개발. 한국건설기술연구원 보고서.
11. 이영노(1996) 원색 한국 식물도감. 서울:교학사.
12. 이인순, 이팔용, 손성곤, 김철수, 오경환(2001) 남강 유역에서 환경 구배에 따른 버드나무속의 분포와 생태적 지위. 한국생태학회지 24(5):289-296.
13. 이진원, 유대영(1997) 하천 내 수목의 내력시험. 한국수자원학회 논문집 30(3):211-223.
14. 전승훈, 현진이, 최정권(1998) 하천 미지형 및 하상 저질에 따른 갯버들과 달뿌리풀 군락의 분포특성에 관한 연구. 한국조경학회지 27(2):58-69.
15. 최정권(1997) 하천저수지의 수층부 자연형 호안공법. 대한민국특허청공개특허공보, 특1997-0027534.
16. Abernethy, B., and I. D. Rutherford(2000) The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. Earth Surface Processes and Landforms 25:921-937.
17. Appleton, B. L.(1989) Evaluation of nursery container designs for minimization or prevention of root circling. Journal of Environmental Horticulture 7(2):59-61.
18. Bohm, W.(1979) Methods of studying root systems. Springer-Verlag Berlin:88.
19. Cofie, P., and A. J. Koolen(2001) Test speed and other factors affecting the measurements of tree root properties used in soil reinforcement models. Soil & Tillage Research 63(2001):51-56.
20. Coppin, N. J.(1990) Use of vegetation in civil engineering. Butterworths:199-229.
21. Day, R. W.(1995) Root reinforcement and waterway embankment stability. Environmental & Engineering Geoscience, Vol.1, No.1:85-88.
22. Gray, D. H., and A. T. Leser(1989) Role of vegetation in the stability and protection of slopes. Biotechnical slope protection and erosion control. Krieger Publishing Company: 37-43.
23. Gray, D. H., and R. B. Soti(1996) Biotechnical and soil bioengineering Slope Stabilization. A Wiley-Interscience Publication.
24. Micheli, E. R., and W. Kirchner(2002) Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion 1. remote sensing measurement of streambank migration and erodibility. Earth Surf. Process. Landforms 27:627-639.
25. Morgan, R. P. C., and R. J. Rickson(1995) Water erosion control. Slope stabilization and erosion control : A bioengineering approach. E&FN spon:133-190.
26. Simonds, A., and A. Collinson(2001) Scientific basis for streambank stabilization using riparian vegetation. Seventh federal interagency Sedimentation Conference, March 25-29th. NV.
27. Sotir, R. B., and N. R. Nunnally(1995) Riprap in Soil Bioengineering Streambank protection. River, Coastal and Shoreline Protection. John Wiley & Sons:578-589.
28. Springer, F. M., C. R. Ullrich, and D. J. Hagerty(1985) Streambank stability. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111(5):624-640.
29. Waldron, L. J.(1977) Shear Resistance Root Permeated Homogeneous and Stratified Soi. Soil Science, Vol. 41: 843-849.
30. Waldron, L. J., and S. Dakessian(1981) Soil Reinforcement by roots : Calculation of increased soil shear resistance from

root properties. Soil Science vol. 132(6):427-435.  
31. Wu, T. H., R. M. McOmber, R. T. Erb, and B. E.

Beal(1988) Study of Soil-Root Interaction. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114(12):1351-1375.

---

원 고 접 수 : 2003년 10월 21일  
최종수정본 접수 : 2003년 11월 24일  
3인의명 심사필