Journal of Wetlands Research, Vol. 15, No. 4, pp. 431-439 (2013)

초본류에 의한 인발저항력 및 전단저항력 변화에 관한 연구

김태균* · 채수권**+ · 전승훈***

* 경남과학기술대학교 조경학과

** 을지대학교 보건환경안전학과

*** 가천대학교 조경학과

A Study on Pull-out Capacity and Shear resistance strength change by grasses

Taegyun Kim* · Soo Kwon Chae**+ · Seung Hoon Chun***

** Department of Landscape Architecture, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, Korea*

*** Department of Environmental Health and Safety, Eulji University, Seongnam, Korea*

**** Department of Landscape Architecture, Gachon University, Seongnam, Korea*

요 약

본 연구는 뗏장형태로 재배된 식생매트호안공법에 이용되는 갈대, 물억새, 사초의 성장에 따른 뿌리의 발달과 인발저항력 및 전단저항력 증가에 대하여 실험하였다. 실험기간은 식물의 성장기인 5월(2012년 5월 23일 식재) 하순부터 총 9주에 걸쳐 시행되었고, 실험포지의 토양은 하상과 비슷한 사질토이다. 3가지 초종의 뿌리성장은 식재 후 빠른 성장을 보이다가, 4주후부터 물억새와 사초는 성장속도가 둔화되었고 갈대는 비슷한 속도로 계속하여 증가하였다. 뿌리성장의 차이는 지하경의 발달에 의한 것으로 물억새와 갈대는 씨앗에 의한 번식 뿐 아니라, 지하경으로 번식하는데, 갈대의 지하경은 대단히 굵고 성장속도도 빠르기 때문이다. 이러한 뿌리성장의 특징으로 식재 후 시간이 지남에 따라 뿌리무게 증가와 인발저항력 및 전단저항력이 증가하나, 물억새와 사초는 일정한 시간이 경과한 후에는 증가 속도가 둔화되고, 갈대는 계속하여 증가하는 것으로 나타났다. 물억새와 사초는 식재 후 11주 전후로 최대값을 가지는 한계전단저항력을 가지는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 녹화, 인발력, 전단저항력, 초본류 뿌리

Abstract

It was tested in field that a Pull-out Capacity and Shear resistance strength change of reed, common reed and sedge which were planted by mat-type turf and used for revegetation of bank. The testes were done for 9 weeks from end of May and the grasses were planted on sandy soil. Roots grew fastly after planted and increasement of a common reed and sedge root were reduced after 4 weeks but increasement of reed roots were not reduced. The difference of increasement of roots is due to a difference of propagation method. Sedge propagate by seed. Reed and commom reed propagate by seed and subterranean stem and reed has bigger subterranean stem than common reed. So increasement of common reed and sedge roots were slow than reed. By root growth pattern, increasement of pull-out capacity and shear resistance strength showed very similar way of root growth, those of common reed and sedge were fast in early stage of cultivation but were reduced. But increasement of pull-out capacity and shear resistance strength of reed was not reduced. A Maximum shear resistance strength called critical shear resistance strength of common reed and sedge can be Analyzed at 11 weeks after planted.

Keywords *: revegetation, pull-out capacity, shear resistance stress, grasses root*

1. 서 론

최근 자연형하천공법, 생태하천공법 등 다양한 이름으로 불리는 호안공법중 식물을 이용한 공법(식생호안공법)은 흐름이 느리거나 빠르지 않아 세굴로 인한 호안의 안전에 큰 문제가 되지 않는 하천구간에 적용되는 것이 보통이다. 이는 호안재료가 자연석, 콘크리트와 같이 강하지 못할 뿐 아니라, 식생호안에 대한 안전도를 평가하는 방법 역시 명확하지 않기 때문으로 판단된다.

하천의 식물과 관련된 연구로는 주로 흐름 특성에 미치는 식생의 영향을 연구한 경우가 가장 많은데, YOON et al.(2002) 은 수초대로 인한 흐름 특성변화, 수초대 상하류 및 측방향으로 유속의 가감에 대하여 조사하였고,

+ Corresponding author : cskwen@eulji.ac.kr

Lee(2000a)는 식생에 의한 홍수류의 흐름특성 변화와 부유사 이송특성에 대하여 언급하였으며, Lee(2000b)는 자갈하천구간에서 안정식생역의 확대과정을 통해 수리학적 생태학적 분석을 통하여 하도내 식생의 동태와 하상변동이 상호 밀접한 관계이 있음을 정량적으로 입증하였다.

최근 시행되고 있는 저수 또는 고수호안에 적용되는 식생공법과 관련하여 Han et al.(2010)은 식생매트를 이용한 복토공법의 유실율과 수리적 안정성을 평가하였다. 또 Rhee et al.(2007)은 수리실험을 통하여 식생호안의 수리학적 안전성을 담보할 수 있는 유속과 유량을 산정하였고, 식생매트의 수리학적 안전기준에 대하여 연구하였다.

호안에 적용되는 식생공법에 대한 연구는 주로 식생기반이 되는 지반 유실과 그에 따른 수리 안전성을 평가하는데, Kim and Kim(2009)는 하천에 서식하는 식물의 인발력 실험을 통하여 식물뿌리 체적과 인발력의 관계를 분석하였다.

본 연구에서는 뗏장 형태로 재배된 식생매트를 이용한 호안공법(이하 완성형식생매트공법)의 전단저항력을 측정하여 호안사면의 사면안정에 미치는 영향과 식생이 빠른 유속에 저항하는 저항특성을 파악하고자 인발저항력 측정실험을 대표적인 다년생 수변식물인 갈대, 물억새, 사초에 대하여 시행하였다.

2. 이론적 배경

식물뿌리에 의한 토양의 역학적 특성 변화에 대한 연구는 토질역학분야에서 일찍이 이루어져 왔는데 주로 뿌리가 사면의 안정에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로 활동을 방지하는 식물뿌리의 역할을 규명하는 것으로 부터 시작되었다.

사면활동은 전단강도에 따라 좌우되는데, 식물뿌리에 의한 전단강도의 증가와 관련된 이론적 모형은 Waldron(1977), Wu et al.(1979) 등에 의해 제안되었는데, Coulomb 전단강도식에 뿌리에 의하여 활동에 저항하는 전단저항력, C_R 을 추가하여 새로운 식으로 나타내었다 (Cho and Ahn, 1998).

$$R_t = C + C_R + \sigma \tan\Phi \tag{1}$$

여기서 R_t는 활동에 대한 저항하는 전단강도(kg/㎠), C는 점착력(단위), σ는 수직응력(kg/㎠), Φ는 내부마찰각에 의하여 구하였다. 식(1)로 기술되는 활동에 대한 저항강도식 중 흙 자체 및 외부 외력조건에 의하여 결정되어지는 C, σ, Φ를 제외한, 식물뿌리에 의한 전단강도의 증가치는 다음과 같다.

$$\Delta C_R = S_t(\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi) \tag{2}$$

여기서 S_t : 흙의 단위면적당 뿌리의 평균 인장강도 (kg/㎠)

θ : 전단 비틀림각

흙의 단위면적당 뿌리의 평균 인장강도는 다음의 식 (3)에 의하여 구할 수 있다.

$$S_t = T_r(A_r/A) \tag{3}$$

여기서 T_r : 임의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도(kg/㎠)

A_r : 임의의 전단면속에 포함되어 있는 뿌리의 전체면적((㎠)

A : 임의의 전단면 면적(㎠)

위의 식들에 의하면 전단강도의 증가는 뿌리의 인장력, 면적비율, 전단비틀림각과 흙의 내부마찰각에 의존한다고 볼 수 있다.

따라서 전단강도 증가치를 나타내는 식 (2)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta C_R = (\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi)\, T_r \frac{A_r}{A} \tag{4}$$

식 (4)로 나타나는 전단강도 증가식에 대한 연구 결과는 내부마찰각과 전단비틀림각으로 나타나는 계수, $\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi$의 값을 주로 규정하고 있다. 즉 뿌리의 인장강도, 뿌리단면적은 전단실험에 이용된 시료로부터 쉽게 구할 수 있어, $\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi$만 구할 수 있다면 뿌리에 의한 전단강도 증가량을 구할 수 있기 때문이며, 기존 연구결과가 Table 1.에 나타나 있다.

Table 1. shear resistancd stress increasement by roots

researcher	$\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi$	notes
Gray and Lerser(1982)	1.15(1.0-1.3)	Φ:20-50°, θ:40-90°
Lee et. al.(1991)	0.60	Chestnut tree
Lee and Im(2003)	0.33	Willow
Cho and Ahn(1998)	Shear Stress Field Test of Lespedexa cytobotrya, Sasamorpha Purpurascens, Miscanthus sinensis	$\frac{A_r}{A} = 10^{-3}$

Noboru(1979, Cho and Ahn(1998)에서 재인용)는 식물뿌리의 역할은 지상부를 지지하는 작용을 하고, 뿌리의 지지력은 토양의 무게 및 긴박력(緊縛力), 흙의 전단저항력에 직접적인 관계가 있는 것으로 판단하였다. 만약 현

장에서 직접 측정할 수 있는 뿌리의 발근저항력(인발저항력)이 뿌리와 토양을 단단히 묶어주는 토양긴박작용(土壤緊縛作用)의 지표가 된다고 가정하면 전단저항력이 발근저항력에 비례한다고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 뿌리의 역학적 보강효과에 대하여, Kim(1996)은 이를 측정하고 정량화하는 것이 용이하지 않다고 밝힌 바 있다.

본 연구의 호안공법의 대상인 완성형 식생매트는 수변에서 자라는 정수식물인 갈대, 물억새, 사초 등으로 재배된 식생매트이다. Table 1. 에서 알 수 있는 바와 같이, 기존 연구에 사용된 식물은 교목, 관목류이며, 초본류는 이들에 비하여 토양에 존재하는 뿌리의 면적비율 산정이 쉽지 않아 식 (4)와 같은 형태로 전단저항력의 증가를 나타내기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구를 토대로 뿌리 체적 대신에 뿌리의 무게와 인발저항력, 뿌리무게와 전단저항력의 관계를 파악코자 하였다. 동일한 개체의 식물에서 식물뿌리의 단위중량이 동일하다면 식물뿌리의 체적과 무게는 동일시 할 수 있고, 뿌리의 체적을 측정하는 것보다 뿌리의 무게를 측정하는 것이 간편하고 정확하기 때문이다.

3. 연구방법

본 연구의 선행연구인 Kim et al.(2012)에서는 식재를 식물의 추수기에 가까운 시점에 이루어지는 점을 고려하여 비닐하우스 온실에서 이루어졌으나, 본 연구는 식물의 성장기에 실험이 이루어지므로 노지에서 이루어졌다.

3.1 완성형 식생매트

기존 호안공사에서 사용되는 식생매트의 대부분은, 씨앗을 뿌리거나 미리 씨앗이 심겨져 있는 매트 등을 호안에 시공하는 공법으로 Photo 1(a)와 같이, 발아 및 성장기 전에 내린 비로 인하여 토양이 유실되거나, 낮은 발아율, 우점종과의 경쟁 등으로 일정한 피복도를 유지하기 어렵다. 완성형 식생매트란 호안공법 시공후에도 일정한 피복도를 유지하고, 세굴에 의한 토양의 유실을 방지하기 위하여 Photo 1(b)와 1(c)와 같은 500mm×340mm×20mm 크기로 재배된 뗏장형태의 식생매트를 말한다.

Photo 1. Mat-type Sod (a) Soil Erosion (b) Mat-type Sod (c) bottom of Mat-type Sod

3.2 인발저항력 측정을 위한 식생매트 식재

완성형 식생매트의 인발저항력 측정시 완성형 식생매트가 찢어지거나, 식물의 상부가 뽑혀 뿌리의 인발저항력을 측정하지 못하는 것을 방지하기 위하여 완성형 식생매트와 같은 크기의 그레이팅을 제작하고, Photo 2(a)와 같이 그레이팅을 식재기반이 되는 토양 위에 놓고, 그레이팅 위에 완성형 식생매트를 식재하였다. 인발저항력 측정은 로드 셀을 이용하였고, 인발을 위하여 삼각지주대와 체인블록을 설치하였다.

초종별 완성형 식생매트의 인발저항력 실험을 위한 식생매트 식재는 2012년 5월 27일 시행하였고, 인발저항력 실험은 식재후 2, 4, 5, 7, 9주차에 측정하였으며, 초종별로 측정시 3회씩 총 45개(=3종×5주×3회)의 식생매트를 식재하였다. 최초 측정이 2주인 것은 식물뿌리가 충분히 성장하여 그레이팅을 관통하는데 대략 2주 정도가 소요되는 것으로 추정하여 2주 이후부터 시행하였다.

Photo 2. Instrument of Pull-out capacity Test and Test (a) Vegetation for test
(b) Instrument of Pull-out capacity Test (c) After Pull-out capacity Test

3.3 전단저항력 측정을 위한 식생매트 식재 및 직접 전단시험기 제작

완성형 식생매트의 전단저항력 측정을 위하여 교란없이 일정한 크기로 시료를 채취하는 것은 초본류 뿌리가 가늘고 작은 점을 고려하면 토양긴발력의 한계로 인하여 대단히 어려울 것으로 판단된다. 본 연구에서는 교란없이 완성형 식생매트의 전단저항력을 측정하기 위하여 직접전단시험기를 제작하여 이용하기로 하였고, 그에 맞는 시료를 채취하기 위하여 거푸집을 설치하여 완성형 식생매트를 식재하였으며, 거푸집과 직접전단시험기 및 시험 전경이 Photo 3.에 나타나 있다.

본 연구에서는 뿌리에 의한 전단저항력의 증가분을 분석하는 것이 목적이므로 Coulomb의 전단저항식에서 상부하중의 증가에 의한 전단저항력 증가분을 고려할 필요가 없다. 즉 식(1)에서 $\sigma \tan\Phi$를 산정할 필요가 없으므로 전단저항력만을 측정할 수 있도록 제작하였다.

Photo 3. instrument of shear resistance stress test and cast (a) instrument of shear resistance stress test (b) vegetation in cast (c) before a shear resistance stress test (d) After shear resistance stress test

4. 결과 및 고찰

노지에서의 식물 성장은 기후, 토양 등에 외부조건에 따라 결정되므로, 실험에 이용된 완성형 식물매트의 성장에 따른 시료로서의 균질성을 확보하기가 대단히 어렵다. 따라서 시료의 균질성을 확보하고자 하천과 비슷한 환경을 가진 사질토 토질의 농장에서, 주기적으로 관수하는 등 관리 하에 재배하였으나 실험 결과로 나타난 식생매트의 성장속도는 상당한 차이를 보였다.

4.1 뿌리의 성장

식생매트의 뿌리의 성장과 관련하여서는 Kim et al. (2012)은 8월말부터 온실에서 시행된 식생매트의 평균뿌리무게 비교에서 초기성장은 사초, 물억새, 갈대 순으로 빨리 자라며, 특히 시간이 지남에 따라 사초와 갈대의 뿌리가 대단히 빨리 증가하는 것으로 조사되었다(Fig. 1(a) 참조).

반면 노지에서 식물의 성장기인 5월말부터 시행된 본 연구의 실험에서는 Fig. 1(b)와 같이, 물억새와 갈대의 뿌리가 식재후 짧은 기간에 대단히 빠른 속도로 증가하는 것을 알 수 있고, 4주 이후 뿌리무게의 증가추세는 둔화되는 것을 알 수 있다. 2011년 실험과 2012년 실험의 차이는 동일한 조건에서도 식물의 성장이 일률적이지 않을 뿐 아니라, 추수기에 온실에 이루어진 실험과, 성장기와 노지에서 이루어진 점의 차이 인 것으로 판단된다. Fig. 1(b)의 뿌리무게 평균값은 인발저항력실험과 전단저항력 실험에 이용된 식생매트 시료를 모두 합한 평균값을 이용하여 도시한 것이다.

Fig. 1(b)에서 물억새와 갈대의 뿌리 성장이 9주후에도 상당히 빠른 속도로 증가하는 것은 개체성장이 이루어진 후 나타나는 번식을 위한 지하경(Photo 4. 참조)의 성장으로 인한 것이며, 물억새의 지하경에 비하여 갈대의 지하경이 크고 굵어 무게가 더 빨리 증가하는 것으로 나타났다. 개체번식을 위한 지하경의 발달은 갈대가 자라는 토양의 역학적 특성변화에 대단히 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

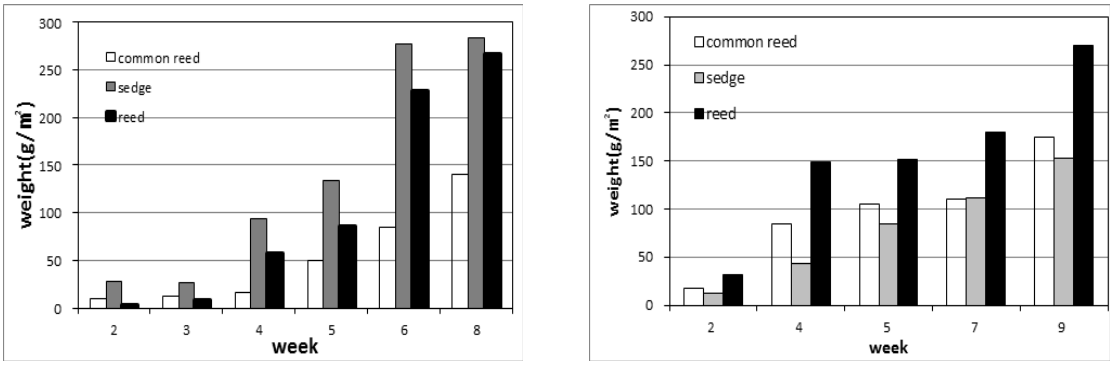

Fig. 1. root growth (a) greenhouse test(Aug. 2011) (b) field test(May. 2012)

Photo 4. Roots and subterranean stem (a) Roots after 9 weeks(Reed, Common Reed, Sedge)
(b) subterranean stem(Reed, Common Reed, Sedge)

4.2 초종별 인발저항력

성장기간과 인발저항력의 관계는 성장기간이 증가함에 따라 인발저항력도 증가할 것이라는 것을 추정(Kim el al., 2012)할 수 있으나. 식물의 성장특성상 동일기간이라 할지라도 성장속도가 다르고 뿌리의 성장량에 차이를 보여, Fig. 2.와 같이 인발저항력도 차이를 보인다.

Table 2. pull-out capacity test

(grating weight : 7.5 kg)

grass	week	No.	pull-out capacity (kg)	sample Weight (kg)	roots Weight (g)	specific roots Weight (g/㎡)	net pull-out capacity (kg)	specific net pull-out capacity (kg/㎡)
Reed	2	1	80.2	24.6	7.7	45.3	55.6	327.1
		2	65.2	24.2	4.6	26.8	41.0	241.2
		3	59.3	25.6	3.7	22.0	33.7	198.2
	4	1	106.1	22.2	9.5	55.7	83.9	493.5
		2	119.9	21.0	23.8	140.0	98.9	581.8
		3	177.8	27.2	42.5	250.0	150.6	885.9
	5	1	207.7	23.3	34.4	202.2	184.4	1084.7
		2	117.2	22.8	24.5	144.2	94.4	555.3
		3	176.1	23.1	27.9	164.0	153.0	900.0
	7	1	124.9	24.1	13.3	78.5	100.8	592.9
		2	153.3	25.9	32.4	190.8	127.4	749.4
		3	111.1	24.2	18.8	110.6	86.9	511.2
	9	2	204.7	25.1	39.1	229.8	179.6	1056.5
		3	185.9	27.3	35.1	206.2	158.6	932.9
Common Reed	2	1	64.3	26.6	1.8	10.8	37.7	221.8
		2	72.1	32.1	2.0	11.9	40.0	235.3
		3	56.4	26.3	2.5	14.4	30.1	177.1
	4	1	167.1	28.6	13.7	80.6	138.5	814.7
		2	188.2	32.8	11.3	66.5	155.4	914.1
		3	182.9	30.8	17.8	104.7	152.1	894.7
	5	1	144.7	36.0	17.9	105.1	108.7	639.4
		2	199.4	35.9	9.9	57.9	163.5	961.8
	7	1	177.8	34.6	11.2	65.9	143.2	842.4
		2	243.6	31.0	23.2	136.5	212.6	1250.6
		3	209.4	34.2	15.6	91.6	175.2	1030.6
	9	1	233.7	32.7	23.0	135.2	201.0	1182.4
		2	248.3	36.8	26.9	158.0	211.5	1244.1
		3	258.2	34.5	41.9	246.5	223.7	1315.9

Table 2. pull-out capacity test (continued)

(grating weight : 7.5 kg)

grass	week	No.	pull-out capacity (kg)	sample Weight (kg)	roots Weight (g)	specific roots Weight (g/㎡)	net pull-out capacity (kg)	specific net pull-out capacity (kg/㎡)
Sedge	2	1	60.5	23.7	2.5	14.4	36.8	216.5
		2	44.6	26.2	1.8	10.4	18.4	108.2
	4	1	124.7	31.9	8.5	49.8	92.8	545.9
		2	125.8	30.8	7.4	43.5	95.0	558.8
		3	95.4	21.9	6.2	36.5	73.5	432.4
	5	1	193.1	34.6	23.4	137.5	158.5	932.4
		2	187	37.3	16.7	98.0	149.7	880.6
	7	1	194.1	55.0	25.5	149.9	139.1	818.2
		2	148.2	45.9	15.3	90.2	102.3	601.8
		3	121.5	37.2	14.5	85.4	84.3	495.9
	9	1	275.4	38.5	33.2	195.4	236.9	1393.5
		2	155.9	39.4	17.4	102.5	116.5	685.3
		3	192.6	33.8	25.0	146.8	158.8	934.1

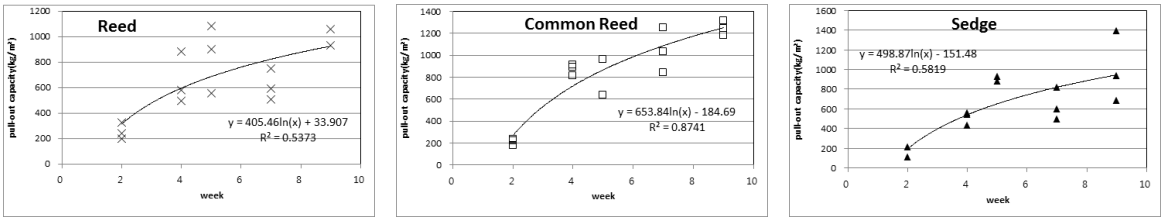

Fig. 2. pull-out capacity increasement

Fig. 2. 의 초종별 시간증가에 따른 인발저항력 증가는 시간에 대한 비례하여 증가하기 보다는 로그함수로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 Kim et al.(2012)에 의한 결과도 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 식재 초기에는 시간이 지남에 따라 뿌리성장이 활발이 일어지만, 초본류의 경우는 뿌리성장이 계속되지 않고 일정한 시간이 지나면서 뿌리 자체의 성장은 둔화되고 개체성장을 위한 지하경이 발달하거나, 추수기를 위한 역할로 바뀌기 때문으로 판단된다.

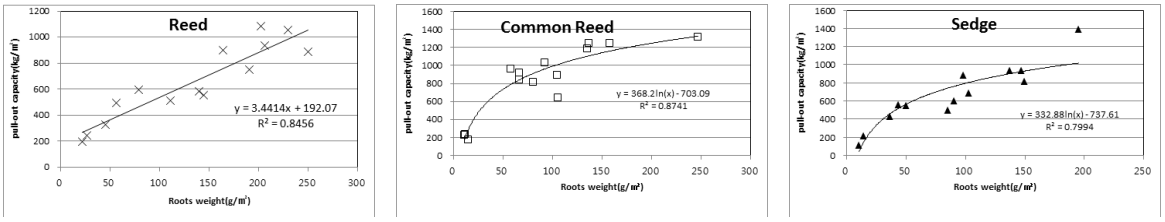

Fig. 3. relationship between pull-out capacity and roots weight

Fig. 3.에서는 뿌리무게와 인발저항력의 관계를 나타내고 있는데, 뿌리무게가 증가함에 따라 인발저항력도 증가하는 것을 알 수 있는데, 물억새, 사초와 갈대는 약간 다른 형태를 보인다. 물억새, 사초의 경우는 뿌리무게가 증가함에 따라 인발저항력이 증가하나 로그함수적으로 증가한다. 반면 갈대의 경우는 뿌리무게와 인발저항력 증가 비가 선형적인 것을 알 수 있는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 갈대 뿌리는 개체성장이 끝난 후, 번식을 위하여 지하경의 발달이 활발해지며, 지하경은 일반뿌리에 비하여 대단히 굵고, 강도 또한 크기 때문으로 판단된다.

4.3 초종별 전단저항력

2.절에서 밝힌 바와 같이 식물에 의한 전단저항력 보강효과는 식 (1)과 같은 형태로 Coulomb의 식에 식물뿌리에 의한 전단저항력 보강효과를 더하는 방법으로 나타내었으며, Wu et al. (1979)은 전단면의 뿌리단면적(A_r)과 뿌리의 인장력(T_r)의 함수로 나타내었다. 본 연구에 이용된 식생매트는 기존의 연구에서 이용된 교목,

관목과 달리 다년생 초본류를 대상으로 하였으며, 이들의 뿌리는 단면적을 측정하고, 뿌리의 인장력을 측정하기에는 가늘고 약하여 기존의 연구와 같은 형태의 식을 이용하여 전단저항력의 보강효과를 나타내기 어렵다.

본 연구에서는 전단면의 뿌리단면적과 뿌리의 인장력을 산정하는 대신에 뿌리의 무게를 측정하여 전단저항력의 크기를 나타내고자 한다. 같은 초본류 식물의 뿌리 밀도가 동일하다면 전단면의 뿌리단면적은 뿌리의 무게로 대체할 수 있을 것이다. 예를 들어 전단면의 뿌리단면이 크다면 뿌리의 체적도 커질 것이고, 밀도가 동일하다면 무게도 증가할 것이다. 본 연구에서는 뿌리에 의한 전단저항력을 측정하기 위하여 직접전단시험기를 제작하였으며, 시료를 교란없이 채취하기 위하여 Photo 2.에 나타나 있는 것과 같은 식생매트와 같은 크기의 거푸집을 제작하여 전단시험을 시행하였다.

Table 3. shear resistance stress test

grass	week	No.	shear resistance stress (kg)	sample weight (kg)	roots weight (g)	specific roots weight (g/m²)	net shear resistance stress (kg)	specific net shear resistance stress (kg/m²)
Reed	5	1	50.0	12.3	21.2	132.5	37.7	392.7
		2	80.8	13.2	27.6	172.2	67.6	704.2
		3	82.7	14.1	18.4	115.0	68.6	714.6
	7	1	112.5	16.3	37.0	231.5	96.2	1002.1
		2	92.3	11.4	37.9	236.8	80.9	842.7
		3	94.7	12.2	43.6	272.2	82.5	859.4
	9	1	234.9	15.7	64.7	404.4	219.2	2283.3
		2	132.4	12.1	51.3	320.6	120.3	1253.1
		3	153.4	13.2	39.6	247.5	140.2	1460.4
Common Reed	2	1	83.8	11.2	3.3	20.3	72.6	756.3
		2	130.9	12.1	5.6	35.2	118.8	1237.5
		3	112.4	13.7	3.2	20.0	98.7	1028.1
	5	1	157.8	12.1	21.9	137.1	145.7	1517.7
		2	92.9	11.9	24.4	152.5	81.0	843.8
		3	115.4	13.4	15.1	94.6	102.0	1062.5
	7	1	95.8	15.5	18.5	115.5	80.3	836.5
		2	184.2	16.2	24.6	154.0	168.0	1750.0
		3	201.2	18.1	19.0	118.5	183.1	1907.3
	9	1	192.6	17.4	22.9	143.0	175.2	1825.0
		2	241.7	16.5	27.2	170.0	225.2	2345.8
		3	186.6	17.1	35.8	223.7	169.5	1765.6
Sedge	5	1	75.5	11.1	12.3	76.6	64.4	670.8
		2	128.3	12.4	5.3	33.1	115.9	1207.3
	7	1	145.8	13.2	24.5	153.4	132.6	1381.3
		2	123.8	14.3	24.7	154.5	109.5	1140.6
		3	85.4	12.1	9.8	61.4	73.3	763.5
	9	1	134.9	13.9	27.4	171.3	121.0	1260.4
		2	116.3	12.2	22.6	141.2	104.1	1084.4
		3	155.4	15.3	30.2	188.8	140.1	1459.4

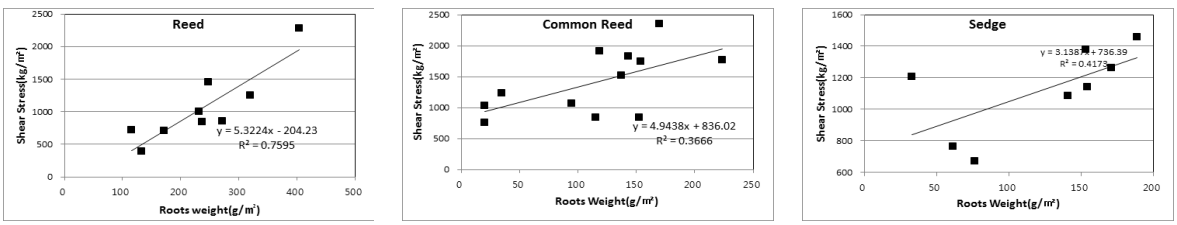

Fig. 4. relationship between roots weight and shear resistance stress

Fig. 4.는 갈대, 물억새, 사초의 뿌리무게당 전단저항력의 관계를 나타내고 있다. 갈대의 경우 뿌리무게와 전단저항력은 비교적 높은 상관관계를 가지는 것을 알 수 있고, 물억새와 사초는 상관관계가 낮기는 하나 대체적으로 뿌리무게가 증가하면 전단저항력이 증가하는 것을 알 수 있다. 물억새와 사초에 비하여 갈대의 상관도가 높은 이유는 개체성장이 이루어진 후 지하경에 의한 개체번식이 이루어지는데, 이때 지하경은 지면과 같은 방향으로 성장하고 일반 뿌리에 비하여 대단히 굵어 무게와 전단저항력의 증가에 동시에 기인하기 때문으로 판단된다.

한편 4.2절에서 밝힌 바와 같이, 식재후 시간이 지남에 따라 뿌리의 성장도 빨라지며, 전단저항력의 보강효과도 같이 증가함을 알 수 있는데 <Fig. 9>에서는 시간에 따른 전단저항력의 변화를 나타내고 있다.

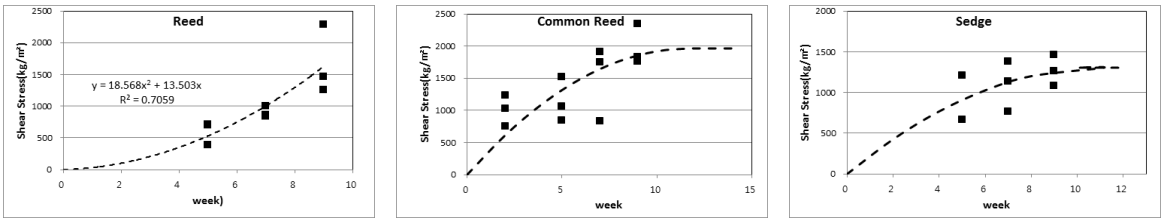

Fig. 5. shear resistance stress change

시간에 따른 전단저항력의 변화는 물억새와 사초는 시간이 지남에 따라 전단저항력의 증가가 둔화됨을 알 수 있고, 갈대의 경우는 시간 증가와 더불어 전단저항력도 같이 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 초종별 차이는 전술한 바와 같이 초종별 성장특성에 따른 것으로 보인다.

한편 물억새와 사초의 시간에 따른 전단저항력 증가는 뿌리성장이 정체되는 시기가 되면 한계에 도달하게 되는데, 회귀분석에 의하여 전단저항력 증가의 한계점을 찾을 수 있고, 시간에 따른 전단저항력 증가량을 추정할 수 있으며, Table 4. 에 나타나 있다.

Table 4. critical shear resistance stress of common reed and sedge

grass	critical point		Eq. of shear resistance stress	notes
	critical time (week)	critical shear resistance stress (kg/m²)		
common shear	11.7	1963.2	$\tau = -14.2t^2 + 334.5t$	τ : shear stress (kg/m²) t : week
sedge	11.1	1305.0	$\tau = -10.5t^2 + 234.2t$	

완성형 식생매트의 식재후 일정한 시간(한계시간)이 도달한 후에 전단저항력이 더 이상 증가하지 않는 것은 Kim et al.(2012)에 언급한 바와 같이, 흙의 역학적 특성에 기인하는 뿌리의 역학 때문으로, 흙의 역학적 특성인 인발저항력 또는 전단저항력에 저항하는 것은 뿌리 전체의 부착력과 뿌리의 인장강도인데, 1개의 뿌리가 길이 성장을 계속하여 무게가 무거워지면 부착력은 증가하나 뿌리단면의 인장강도는 단면이 크게 증가하지 않으므로 인장강도 역시 크게 증가하지 않는다. 따라서 뿌리 무게가 증가하여 뿌리 무게가 늘어나더라도 인발저항력 또는 전단저항력의 증가에는 한계가 있기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 뗏장형태로 재배되어 호안에 시공할 수 있도록 제작된 완성형 식생매트의 성장과 그로 인한 역학적 특성, 전단저항력과 인발저항력에 대한 노지실험을 실시하였다.

홍수시 식물에 외력으로 작용하는 하천수의 흐름에 저항할 수 있는 힘(Kim and Kim, 2009)인 인발저항력을 측정하였다. 전단저항력은 호안사면의 활동과 관련된 흙의 특성으로 기존의 많은 연구들이 뿌리 단면적과 인발저항력의 관계를 이용하여 전단저항력을 결정하는 방법을 시도하였으나, 본 연구에서는 동일한 식물의 뿌리 밀도는 일정하다고 가정하고 뿌리의 체적 대신에 뿌리 무게와 전단저항력의 관계를 유도하였다. 뿌리무게를 이용한 것은 교목이나 관목보다 가늘고 약한 초본류의 뿌리를 대상으로 하였고, 초본류 뿌리의 체적을 결정하는 방법은 표준화된 방법이 없을 뿐 아니라 정확한 뿌리 체적 및 전단면의 뿌리 단면적을 측정하기 어렵다(Kim et al., 2012).

본 연구에서 완성형 식생매트로 재배된 물억새, 사초의 뿌리 무게는 초기에 빠른 속도로 증가하나, 시간이

증가할수록 성장속도는 둔화된다. 갈대의 경우는 개체번식을 위한 지하경이 자라면서 시간과 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

홍수시 하천수 흐름에 저항하는 인발저항력의 측정에서 3가지 초종 모두 시간이 지나면서 뿌리의 무게가 증가하고, 그에 따라 인발저항력도 증가하는 것을 알 수 있었는, 물억새와 사초는 뿌리의 성장이 둔화되면서 인발저항력의 증가도 둔화되는나, 갈대는 지하경의 발달로 뿌리무게와 인발저항력이 선형의 관계를 가짐을 알 수 있다.

호안사면의 활동과 관계된 흙의 역학적 특성인 전단저항력을 측정하기 위하여 본 연구에서는 초본류를 대상으로 교란되지 않은 시료를 채취하기 위하여 식생매트와 동일한 크기의 거푸집을 토양에 설치하여 초종을 재배하였으며, 뿌리에 의한 전단저항력 증가치를 산정하는 실험이므로, 직접전단저항력 측정장치를 제작하여 실험하였다.

전단저항력 측정결과, 인발저항력과 같이 물억새와 사초는 뿌리의 증가와 함께 전단저항력이 증가하나 일정한 기간이 지나면 증가세가 둔화되며, 이를 2차식으로 나타내면 전단저항력의 한계값을 구할 수 있다. 물억새, 사초 모두 11주 정도에서 한계치를 나타내며, 이는 식물의 성장기인 5월 중순부터 시작되는 초본류의 성장기를 고려하면 7월말, 8월 초에 전단증가는 최대치에 이르는 것을 알 수 있다. 8월 중순이후에는 수변식물이 개체성장을 하기보다는 번식을 위한 성장이 이루어지므로 식물성장주기와도 비슷한 것을 알 수 있다.

본 연구에서 인발저항력과 전단저항력에 이용된 물억새, 사초 및 갈대의 뿌리에 의한 흙의 역학적 특성이 다르게 나타나는 것은, 갈대, 물억새, 사초의 번식특성과 깊은 관계가 있는 것을 알 수 있다. 갈대와 물억새는 벼과 식물로 씨앗과 지하경을 이용하여 번식하며, 사초는 씨앗만을 이용하는 초종인데, 갈대는 물억새에 비하여 상대적으로 크고 굵은 지하경을 통하여 번식하며, 갈대 지하경의 성장으로 인한 흙의 역학적 특성변화가 물억새, 사초 등과 달리 나타나기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 ECO-STAR(수생태복원사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

Cho, JH and Ahn, BW (1998). An experimental study on the reinforcement and stabilization of slope by vegetation roots, *Journal of Korean Environmental Restoration and Revegetation Techniques*, 1(1), pp. 54-62. [Korean Literature]

Han, EJ, Hwang, SE, Kim, YD, Park, JH and Kim, C (2010). A study on hydraulic stability of vegetation mat method on high water revetments, *Journal of Wetlands Research*, 12(2), pp. 75-89. [Korean Literature]

Kim, SK (1996). *Principle of Soil Mechanics*, pp. 89-71. Dongmyongsa. [Korean Literature]

Kim, T, Chae, SK, Chun, SH and Jeong, JC (2012). A study of pull-out strength increasement by root of grasses, *Journal of Wetlands Research*, 14(2), pp. 199-210. [Korean Literature]

Kim, YH and Kim C (2009). Study on the hydraulic stability of bank revetments by vegetation roots, *Proceedings of the 2009 Conference of Korea Water Resources Association*, pp. 457-463. [Korean Literature]

Lee, CS and Im, SB (2003). The effect of reinforcing soil shear strength by a root system developed from direct sticking of *Salix Gracilistyla Miq*. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 31(5), pp. 1-10. [Korean Literature]

Lee, IM, Sung, SG and Im, CM (1991). An experimental study on the effect of vegetation roots on slope stability of hillside slopes, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 7(2), pp. 51-66. [Korean Literature]

Lee, SH (2000a). A study on the hydraulic characteristics of riparian vegetation, *Journal of Korea Water Resources Association*, 33(1), pp. 63-72. [Korean Literature]

Lee, SH. (2000b). A relationship research of stream bed and vegetation change on gravel bed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 33(S1), pp. 732-737. [Korean Literature]

Noboru, K (1979). *Illustration of Tree Roots*, Sungmoonsa, pp. 143-144. [Japanese Literature]

Rhee, DS, Ahn, HK, Woo, HS and Kwon, BA (2007). Application and assessment of new vegetation revetment techniques considering safety against flood and environmental performance, *Journal of Korea Water Resources Association*, 40(2), pp. 125-134. [Korean Literature]

Waldron, LJ (1977). The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. *Journal of Environmental Quality*, 132(2), pp. 843-849.

Wu, TH, Mckinnell, P and Swanston, DN (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska, *Can, Geotech Journal*. 16(1), pp. 19-23.

Yoon, TH, Shin, YJ and Lee, JS (2002). Flow variation in open channel due to presence of vegetation zone, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 22(2-B), pp. 143-149. [Korean Literature]

○ 논문접수일 : 2013년 02월 07일
○ 심사의뢰일 : 2013년 03월 14일
○ 심사완료일 : 2013년 04월 26일