

식물뿌리에 의한 인발력 증가에 관한 연구

김 태 균* / 채 수 권** / 전 승 훈*** / 정 재 철****

A Study of Pull-out strength increasement by root of grasses

Kim, Taegyun* / Chae, Soo Kwon** / Chun, Seung Hoon*** / Jeong, Jae Cheol****

요약 : 본 연구에서는 매트형 식생호안공법에 이용되는 물억새, 사초, 갈대의 성장기간의 경과에 따른 인발력 증가에 대하여 실험하고, 뿌리의 무게와 인발력의 관계를 도출하기 위한 현장 실험을 시행하였다. 흙의 전단력은 임의단면에서의 뿌리 단면적과 인발력의 함수로 나타낼 수 있으므로 인발력 측정은 흙의 전단력 측정을 위한 기초자료로 이용될 수 있다. 현장실험결과 3가지 초종 모두 시간의 경과에 따라 뿌리 무게가 증가하고, 그에 따른 인발력도 증가하였으나, 초종별 특성에는 차이를 보이며, 이는 물억새, 사초의 성장, 번식특성과 갈대의 성장, 번식이 다르기 때문으로 판단된다. 갈대는 두 식물에 비하여 지하경에 의한 번식이 활발하며, 번식을 위하여 지하경이 증가하고, 그에 따라 뿌리 무게, 인발력이 비례하여 증가한다.

핵심용어 : 인발력, 전단력, 녹화, 뿌리 무게

Abstract : In this study, a pull-out strength increasement of grasses was tested in field and the relationship between a weight of root and pull-out strength was established. The tested grasses were common reed, reed and sedge which were cultivated by mat-type like turf and used for revegetation of bank. The shear stress of soil at a section can be discribed as a function of root area and pull-out strength, therefore the result of this study will be used as a foundational data for reinforcing the shear stress of the revegetated bank. The heavier weight of root increased, the stronger shear stress was for all grasses. But the relationship between the weight and the shear stress were different by a kind of grass. The difference between common reed, sedge and reed is due to difference of growth and propagation. A reed propagates by subterranean stem and a root weight and pull-out strength are linearly increased by root and growth of subterranean stem.

Keyword : pull-out strength, shear stress, revegetation, root weight

1. 서 론

1990년대 중반이후에 시행되기 시작한 새로운 형태의 하천정비사업은 자연형하천 복원, 생태하천 복원, 친자연형하천 복원 등 다양한 이름으로 전국적으로 시행되었는데, 기존의 이·치수위주의 하천개수정책이 하천생태계에 대한 배려없이 이루어져 하천생태계가 거의 절멸한 것에 대한 대

안으로 시행되었다. 그러나 새로이 도입된 하천복원사업 역시 하천생태계에 대한 배려보다는 도시하천의 경우 주로 친수공간 확보 및 경관 개선에 주력하는데, 본래 하천이 가지는 생태계를 회복하는 것과는 상당한 거리가 있다고 할 수 있으며, 이는 본래의 넓은 하천부지를 회복할 수 없는 도시하천의 공간적 한계와 시민들의 필요에 따른 결과라 할 수 있다.

+ Corresponding author : cskwen@ulji.ac.kr
* 정회원 경남과학기술대학교 조경학과 교수 · E-mail : tgkim@gntech.ac.kr
** 정회원 을지대학교 보건환경안전학 · E-mail : cskwen@ulji.ac.kr
*** 정회원 가천대학교 조경학과 교수 · E-mail : chunsh@kyungwon.ac.kr
**** 하동균청 · E-mail : jjch3735@korea.kr

도시하천의 공간적 한계는 새로운 하천정비사업의 수리학적 특성(유속, 소류력 등)의 변화를 유도할 수 없으므로 저수호안 및 고수호안에 사용되는 재료 또한 콘크리트에서 이와 유사한 돌(거석쌓기, 전석쌓기, 조정석쌓기 등)을 이용한 공법을 선호하고 있고, 소류력이 커 홍수시 유실 우려가 있는 지역의 경우는 생태블럭 등 콘크리트 제품을 이용하기도 한다. 새로운 하천정비사업에 사용되는 재료의 대부분은 치수적으로 안전성을 확보할 수 있는 재료를 이용하는 것이 현실이다.

한편, 최근에 들어 하천 생태계의 회복과 경관을 향상시키기 위하여 하류구간 또는 비수충부, 직선구간을 중심으로 식생호안공법을 적극 도입하고 있다. 최규창 등(1999)는 “하천변의 자연식생 군락은 자연미를 제공하며, 각종 새들의 서식공간과 은신처를 제공하며, 파랑과 유속에 의한 수변 침식을 억제하는 긍정적 효과를 가져다 준다.”고 하였고, 자연형 하천 식생복원에 이용되는 달뿌리풀, 물억새, 솔새, 수크렁에 대하여 식생이 기반이 되는 용토별 식물의 생육 적합성 여부, 용토별 뗏장형성 가능성 여부 및 초종별 식재간격 등에 대하여 언급하였다.

하천복원공사에서 식생을 도입하는 방법은 ① 갈대, 물억새, 달뿌리풀 등의 초본류를 포트에 재배하여 호안사면에 식재하거나, ② 코코넛 섬유로 짠 코이어물에 초본류를 식재된 상태로 호안에 설치하는 방법이 있고, 또 다른 형태로는 ③ 넷트에 초본류의 종자를 붙인 형태의 식생매트가 시공된다. 전술한 2가지 방법은 이미 충분히 성장한 다년생의 초본류를 대상으로 하므로 식재후 성장기가 되면 자연히 성장하는 것을 볼 수 있고, 식생매트의 경우는 성장기에 발아한 후 호안을 보호하게 된다.

식생을 이용한 호안공법(이하 식생호안공법)의 문제점은 콘크리트, 석재, 목재 등의 재료를 이용한 공법에 비하여 상대적으로 낮은 치수안전성을 가진다는 것이다. 한은진 등(2010)은 식생매트 설

치 여부에 따른 복토된 토양의 상대적 유실율의 차이를 확인하였는데, 토양의 유실은 호안식재의 기반이 되는 흙이 유실됨으로서 호안의 파괴를 유도한다. 또 부적절한 식물도입시기, 식물의 시공 형태(종자, 포트 등) 등의 문제로 발생하는 홍수시 유실, 식물발아율의 저하, 공법 자체 파손 등이 발생하였으며, 창원천, 홍제천 등에서는 다른 공법으로 대체되기도 하였다.

식생공법의 수리학적 안정성 여부를 판정하기 위한 이론적, 실험적 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 김운환 등(2009)은 식생호안이 충분한 수리적 안정성을 확보할 수 있는 지 판정하기 위한 방법으로 하천에서 직접 초본류를 인발하는 식생 인발시험을 시행하였고, 그 결과로 뿌리체적이 증가할 수록 인발강도가 비례적으로 증가함을 증명하였다. 그러나 이와 관련된 대부분의 연구는 토질역학적 관점에서 사면의 안정을 확보하기 위한 수단으로 식물을 이용하는 방법에 대하여 이루어졌으며, 하천의 호안과 초본류를 대상으로 한 경우는 거의 없다.

본 연구에서는 기존의 식생호안공법이 가지는 토양유실을 방지하여 호안사면의 안전을 확보할 수 있는 뗏장형태로 재배된 식생매트의 역학적 특성을 평가하고, 이를 근거로 식생매트공법의 적용 가능성을 평가하는 기초자료로 이용하고자 한다.

2. 이론적 배경

하천정비사업에서 식생호안 설치 여부는 초본류 성장으로 인한 홍수시 조도계수의 변화, 관목류 식물의 성장에 따른 통수단면적의 감소 및 그에 따른 홍수위 상승 등의 치수안전성 문제에 집중되었으며, 최근에 들어 초본류를 이용한 식생호안공법의 도입과 호안의 안전성 문제를 평가하기 시작하였는데, 이에 대한 연구는 아직 미미한 수준으로 뿌리에 의한 사면보호효과 즉 비탈면 활동을 방지하는 식물뿌리의 역할을 규명하는데서부터 출발하였다.

Noboru(1979, 조주형(1998)에서 재인용)는 식물뿌리의 역할은 토양에서 양분을 흡수해서 식물의 생육에 필요한 물질을 저장함과 동시에 지상부를 지지하는 작용을 하고 있다고 하였으며, 이러한 뿌리의 지지력은 토양의 무게 및 긴박력(緊縛力), 흙의 전단저항력에 직접적인 관계가 있는 것 판단하였다. 한편 이를 측정하고 정량하기는 상당히 어려운데, 김상규(1996)은 자연비탈면에서의 식생뿌리의 역할은 토양의 전단저항력을 증가시켜, 비탈면 붕괴를 방지하는 중요한 인자이나 이를 측정하고, 정량화하기는 용이하지 않다고 밝힌 바 있다.

지병윤 등(2006)은 뿌리보강효과를 측정하기 위하여 임도사면에 주로 이용되는 도입초본 5종, 재래초본 9종, 재래목본 4종 등 총 18종을 선정하여 종별 뿌리의 신장깊이, 인발강도 등을 측정하였다. 분석된 식생중 뿌리의 신장한계는 족제비싸리가 가장 깊은 것으로 나타났고, 인발강도는 목본류가 초본류보다 높고, 초본류는 재래초본이 도입초본보다 높은 것으로 나타났으며, 뿌리밀도도 목본류, 재래초본류, 도입초본류 순으로 조사되었다.

따라서 측정이 가능한 뿌리의 발근저항력이 뿌리와 토양을 단단히 묶어주는 토양긴박작용(土壤緊縛作用)의 지표가 된다고 가정하면 전단저항력이 발근저항력에 비례한다고 볼 수 있다. 즉, 임의의 비탈면에서 파괴가 발생하면 흙과 뿌리의 합성체는 파괴에 의해 밀려 나가는 부분과 그렇지 않은 두 부분으로 나누게 되고, 전단면상의 토괴를 관통하는 뿌리에는 파괴에 의한 변위가 커질수록 인장응력이 증가하게 되며, 이에 의해 전단저항이 증가하게 된다고 설명할 수 있다(조주형, 1998).

전단강도의 증가를 예측하기 위한 연구의 이론적 기초는 뿌리의 인장강도에서 저항력을 구한 연구(北村와 難波, 1981)와 뿌리에 의한 사면안정화의 실험연구(陶山와 原, 1986) 등이 있으며, 간단한 이론적 모델은 Waldron(1977), Wu, et

al.(1979) 등에 의해 연구되어 왔다. 이들의 연구는 붕괴전단면의 붕괴저항력 C_R 을 흙의 Coulomb 강도식에 넣어, 붕괴발생에 대한 흙과 뿌리의 저항력을 포함한 강도에 의하여 구하였다(조주형, 1998).

$$R_t = C + C_r + \sigma \tan \Phi \quad (1)$$

여기서 R_t 는 붕괴에 대한 저항강도로서 C 는 점착력, σ 는 수직응력, Φ 는 내부마찰각에 의하여 구하였다. 식(1)로 기술되는 붕괴에 대한 저항강도식 중 흙 자체 및 외부 외력조건에 의하여 결정되어지는 C , σ , Φ 를 제외한, 식물뿌리에 의한 전단강도의 증가치는 다음과 같다.

$$\Delta C_R = S_t (\sin \theta + \cos \theta \tan \Phi) \quad (2)$$

여기서 S_t : 흙의 단위면적당 뿌리의 평균 인장강도

θ : 전단 비틀림각

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

$$S_t = T_r (A_r / A) \quad (3)$$

여기서 T_r : 임의의 전단면에 존재하는 뿌리만의 평균 인장강도

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.

Gray와 Lerser(1982)의 현장 및 실험에 의해

관찰된 전단비틀림각은 40-70°에서 대부분 발생하며, 흙의 내부마찰각이 20-50°와 전단비틀림각이 40-90°일 때 $\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi$ 의 값이 1.0에서 1.3 사이로 전단비틀림각과 내부마찰각의 변화에 대하여 비교적 둔감하게 나타난다는 사실을 인용하여 뿌리의 전단저항력을 다음과 같이 나타내었다(조주형 등, 1998).

$$\Delta C_R = 1.15 T_r (A_r/A) \quad (4)$$

한편, 이인모 등(1994)의 연구에 의해 $\sin\theta + \cos\theta \tan\Phi$ 의 값은 상수 0.6으로 나타내었다.

$$\Delta C_R = 0.6 T_r (A_r/A) \quad (5)$$

이춘석 등(2003)은 하천복원에 많이 이용되는 갯벌 뿌리의 토양전단강도 보강효과를 평가한 연구에서 상수의 값을 0.33으로 산정하였다.

$$\Delta C_R = 0.33 T_r (A_r/A) \quad (6)$$

식 (2)에서 식물뿌리에 의한 전단강도 증가치는 식물뿌리의 인장강도의 함수로 나타낼 수 있으며, 식 (3)을 통하여 식물뿌리의 평균 인장강도는 임의 단면의 뿌리 면적의 함수로 나타낼 수 있다. 즉 전단면의 식물뿌리 면적이 인장력에 직접적인 영향을 미친다.

한편 초본식물의 경우 토양에 존재하는 뿌리의 면적비율산정이 쉽지 않다. 따라서 인발시험에 의해 뽑힌 뿌리의 체적을 이용하여 인발강도와의 관계를 파악하였다(조주형 등, 1998). 김윤환 등(2009)은 전단면의 뿌리면적 대신에 하천에서 직접 인발한 식물뿌리의 총 체적과 인발력의 관계를 유도하였는데, 식물종류에 따라 차이는 있으나 식물뿌리체적이 증가할수록 인발력도 증가하는 것을 알 수 있다.

이러한 기존의 연구를 토대로 본 연구에서는 뿌리 체적 대신에 뿌리의 무게와 인발력의 관계를 파악코자 하였다. 동일한 개체의 식물에서 식물뿌리의 밀도(단위중량)가 동일하다면 식물뿌리의 체적과 무게는 동일시 할 수 있고, 뿌리의 체적을 측정하는 것보다 뿌리의 무게를 측정하는 것이 간편하고 정확하기 때문이다.

3. 연구방법

본 연구는 식생호안공법중 하천변에 성장하는 식물인 물억새, 사초, 갈대를 미리 뗏장 형태로 재배하여 호안에 식재할 수 있도록 준비된 완성형 식생매트를 대상으로 매트 식재후 시간의 경과에 따른 인발력의 증가를 관찰하였다.

실험에 사용된 완성형 식생매트의 규격은 500mm×300mm×20mm이고, 그림 1(a)에 나타나 있다. 인발력 측정시 뗏장형태로 재배된 완성형 식생매트가 찢어지거나, 식물의 상부가 뽑혀 뿌리의 인발력을 측정하기 어려운 경우를 방지하기 위하여 완성형 식생매트와 같은 크기의 그레이팅을 제작하고, 그레이팅을 식재기반이 되는 토양위에 놓고, 그레이팅 위에 완성형 식생매트를 식재하였다(그림 1(b)와 1(c)). 또 계절적으로 8월 말에 실험이 시작됨을 감안하여 온실내에 포지를 설치하여 기온이 저하하더라도 기온의 영향을 적게 받도록 하였다. 인발력 측정은 로드셀을 이용하였고, 식물을 인발하기 위한 장치로는 그림 1(d)와 같은 체인 블록과 삼각지주대를 설치하였다.

초종별 완성형 식생매트의 인발력 실험을 위한 식생매트 식재는 2011년 8월 25일 시행하였고, 인발력 실험은 식재후 2, 3, 4, 5, 6, 8주차에 측정하였으며, 초종별로 측정시 3회씩 총 54개(=3종×6주×3회)의 식생매트를 식재하였다. 최초 측정이 2주인 것은 식물뿌리가 충분히 성장하여 그레이팅을 관통하는데 대략 2주 정도가 소요되는 것으로 추정하여 2주 이후부터 시행하였다.



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1. 인발력 실험을 위한 식재 및 측정 장치. (a) 뗏장형 식생매트, (b) 그레이팅 설치 및 식재기반 조성, (c) 식재, (d) 인발력 측정 장치

4. 결과 및 고찰

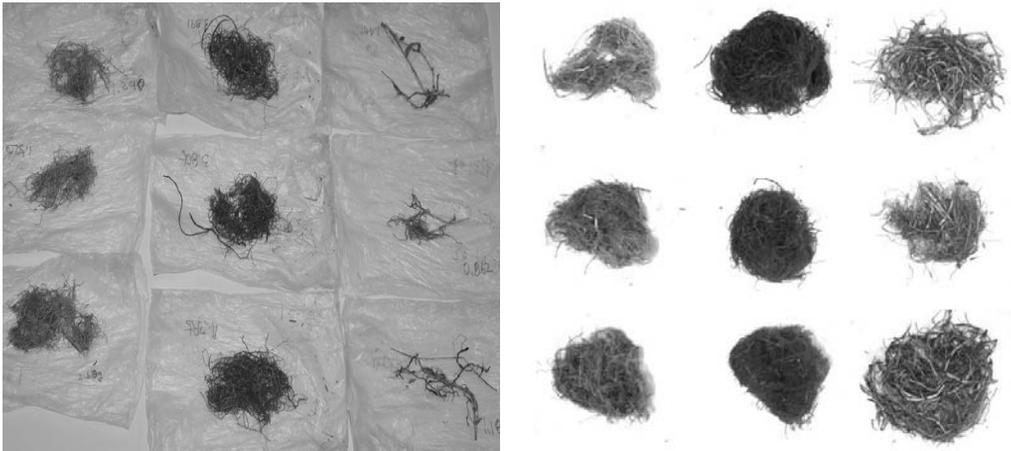
식재후 총 8주간의 실험기간중 2, 3, 4, 5, 6, 8주차에 걸쳐 총 54(물억새, 사초, 갈대 등 3가지 초종별 각 3회씩 실험)회에 걸친 실험결과가 표 1에 나타나 있다.

4.1 뿌리의 성장

8월말에 시행된 실험임에도 불구하고 뿌리 무게는 인발력의 차이를 밝힐 수 있을 정도 충분하였다. 기간별 초종별 뿌리성장속도는 그림 2(a),

2(b)와 같이, 같은 기간 같은 초종에서도 상당한 차이를 보인다. 즉 6주차 갈대 식생매트 3개의 뿌리 무게가 42.8g, 18.3g, 38.5g으로 차이가 난다. 또 평균 뿌리 무게(그림 2(d))은 초기에는 천천히 증가하다가 시간이 길어질수록 뿌리 무게는 지수함수적으로 빨리 증가함을 알 수 있다.

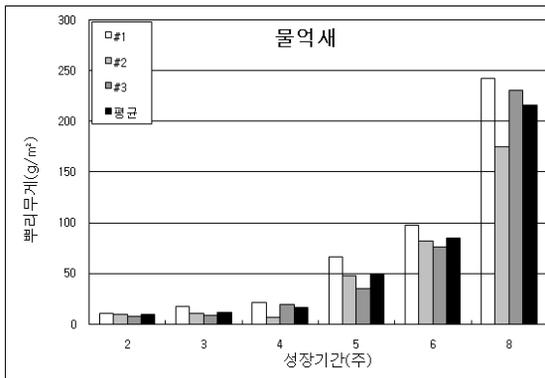
식재후 초기의 평균 뿌리 무게는 사초, 물억새, 갈대 순으로 나타났으나 4주가 지난 후 부터는 사초, 갈대, 물억새 순으로 성장함을 알 수 있으며, 시간이 지남에 따라 사초와 갈대의 뿌리 무게 차이는 점점 감소하고, 물억새와 차이는 점점 커지는 것으로 나타났다.



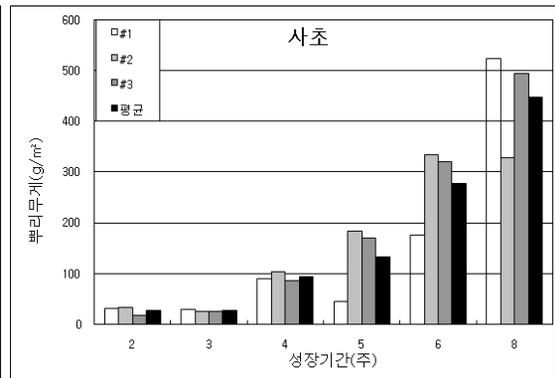
(a)

(b)

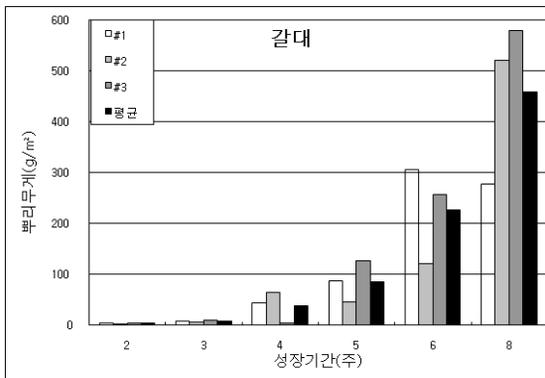
그림 2. 종별 성장후 뿌리. (a) 2주 성장후 뿌리, (b) 8주 성장후 뿌리



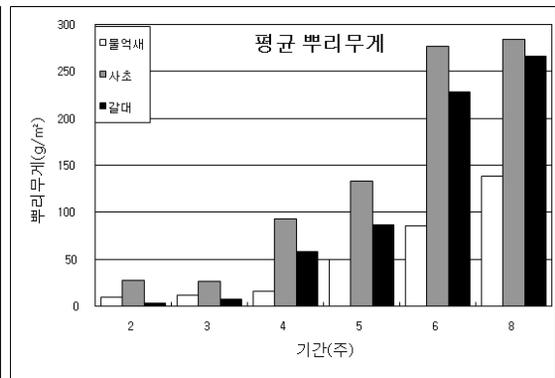
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 기간별 뿌리 무게 증가량. (a) 물억새, (b) 사초, (c) 갈대, (d) 평균인발력

표 1. 물억새의 기간별 뿌리무게, 인발력 측정결과

구 분		멧장 당 인발력 (kg)	멧장 무게 (kg)	멧장 당 순인발력 (kg)	멧장 당 뿌리무게 (g)	단위무게당 인발력 (kg/g)	단위면적당 인발력 (kg/m ²)	단위면적당 뿌리무게 (g/m ²)	단위면적당 단위무게당 인발력 (kg/m ² /g)
2주차 실험	#1	55.3	20.9	34.4	1.540	22.3	229.3	10.3	148.9
	#2	89.7	22.1	67.6	1.480	45.7	450.7	9.9	304.5
	#3	69.3	21.7	47.6	1.150	41.4	317.3	7.7	275.9
	평균	71.4	21.6	49.9	1.4	36.5	332.4	9.3	243.1
3주차 실험	#1	100.9	23.2	77.7	2.618	29.7	518.0	17.5	197.9
	#2	62.7	22.8	39.9	1.520	26.3	266.0	10.1	175.0
	#3	62.8	21.5	41.3	1.204	34.3	275.3	8.0	228.7
	평균	75.5	22.5	53.0	1.8	30.1	353.1	11.9	200.5
4주차 실험	#1	97.2	22.0	75.2	3.239	23.2	501.3	21.6	154.8
	#2	67.2	22.3	44.9	1.000	44.9	299.3	6.7	299.3
	#3	103.0	22.7	80.3	2.892	27.8	535.3	19.3	185.1
	평균	89.1	22.3	66.8	2.4	32.0	445.3	15.8	213.1
5주차 실험	#1	134.8	23.6	111.2	9.996	11.1	741.3	66.6	74.2
	#2	123.9	22.8	101.1	7.137	14.2	674.0	47.6	94.4
	#3	96.7	23.0	73.7	5.181	14.2	491.3	34.5	94.8
	평균	118.5	23.1	95.3	7.4	13.2	635.6	49.6	87.8
6주차 실험	#1	150.5	21.7	128.8	14.582	8.8	858.7	97.2	58.9
	#2	103.2	23.1	80.1	12.338	6.5	534.0	82.3	43.3
	#3	142.3	22.5	119.8	11.402	10.5	798.7	76.0	70.0
	평균	132.0	22.4	109.6	12.8	8.6	730.4	85.2	57.4
8주차 실험	#1	168.5	22.5	146.0	36.257	4.0	973.3	241.7	26.8
	#2	117.9	23.2	94.7	26.168	3.6	631.3	174.5	24.1
	#3	162.1	22.6	139.5	34.515	4.0	930.0	230.1	26.9
	평균	149.5	22.8	126.7	32.3	3.9	844.9	215.4	26.0

표 2. 사초의 기간별 뿌리무게, 인발력 측정결과

구 분		멧장 당 인발력 (kg)	멧장 무게 (kg)	멧장 당 순인발력 (kg)	멧장 당 뿌리무게 (g)	단위무게당 인발력 (kg/g)	단위면적당 인발력 (kg/m ²)	단위면적당 뿌리무게 (g/m ²)	단위면적당 단위무게당 인발력 (kg/m ² /g)
2주차 실험	#1	41.8	21.8	20.0	4.780	4.2	133.3	31.9	27.9
	#2	38.4	22.3	16.1	5.070	3.2	107.3	33.8	21.2
	#3	34.2	22.1	12.1	2.660	4.5	80.7	17.7	30.3
	평균	38.1	22.1	16.1	4.2	4.0	107.1	27.8	26.5
3주차 실험	#1	87.2	23.5	63.7	4.395	14.5	424.7	29.3	96.6
	#2	67.5	23.7	43.8	3.805	11.5	292.0	25.4	76.7
	#3	85.8	22.4	63.4	3.891	16.3	422.7	25.9	108.6
	평균	80.2	23.2	57.0	4.0	14.1	379.8	26.9	94.0
4주차 실험	#1	116.3	24.1	92.2	13.531	6.8	614.7	90.2	45.4
	#2	129.0	23.2	105.8	15.450	6.8	705.3	103.0	45.7
	#3	139.6	22.9	116.7	12.921	9.0	778.0	86.1	60.2
	평균	128.3	23.4	104.9	14.0	7.6	699.3	93.1	50.4
5주차 실험	#1	75.7	21.4	54.3	6.870	7.9	362.0	45.8	52.7
	#2	176.0	22.4	153.6	27.598	5.6	1024.0	184.0	37.1
	#3	164.9	22.6	142.3	25.470	5.6	948.7	169.8	37.2
	평균	138.9	22.1	116.7	20.0	6.4	778.2	133.2	42.3
6주차 실험	#1	152.1	22.0	130.1	26.248	5.0	867.3	175.0	33.0
	#2	184.3	23.0	161.3	50.246	3.2	1075.3	335.0	21.4
	#3	149.0	21.9	127.1	48.072	2.6	847.3	320.5	17.6
	평균	161.8	22.3	139.5	41.5	3.6	930.0	276.8	24.0
8주차 실험	#1	186.6	27.1	159.5	78.575	2.0	1063.3	523.8	13.5
	#2	157.0	21.6	135.4	49.165	2.8	902.7	327.8	18.4
	#3	213.5	19.1	194.4	74.050	2.6	1296.0	493.7	17.5
	평균	185.7	22.6	163.1	67.3	2.5	1087.3	448.4	16.5

표 3. 갈대의 기간별 뿌리무게, 인발력 측정결과

구 분		뗏장 당 인발력 (kg)	뗏장 무게 (kg)	뗏장 당 순인발력 (kg)	뗏장 당 뿌리무게 (g)	단위무게당 인발력 (kg/g)	단위면적당 인발력 (kg/m ²)	단위면적당 뿌리무게 (g/m ²)	단위면적당 단위무게당 인발력 (kg/m ² /g)
2주차 실험	#1	34.7	26.2	8.5	0.570	14.9	56.7	3.8	99.4
	#2	31.7	25.2	6.5	0.340	19.1	43.3	2.3	127.5
	#3	35.9	23.1	12.8	0.690	18.6	85.3	4.6	123.7
	평균	34.1	24.8	9.3	0.5	17.5	61.8	3.6	116.8
3주차 실험	#1	30.2	22.4	7.8	1.180	6.6	52.0	7.9	44.1
	#2	42.5	25.6	16.9	0.862	19.6	112.7	5.7	130.7
	#3	28.2	20.1	8.1	1.471	5.5	54.0	9.8	36.7
	평균	33.6	22.7	10.9	1.2	10.6	72.9	7.8	70.5
4주차 실험	#1	48.7	24.2	24.5	6.623	3.7	163.3	44.2	24.7
	#2	43.6	22.1	21.5	9.621	2.2	143.3	64.1	14.9
	#3	28.9	23.0	5.9	9.793	0.6	39.3	65.3	4.0
	평균	40.4	23.1	17.3	8.7	2.2	115.3	57.9	14.5
5주차 실험	#1	60.4	21.5	38.9	13.067	3.0	259.3	87.1	19.8
	#2	41.7	22.8	18.9	6.843	2.8	126.0	45.6	18.4
	#3	80.1	21.8	58.3	18.987	3.1	388.7	126.6	20.5
	평균	60.7	22.0	38.7	13.0	2.9	258.0	86.4	19.6
6주차 실험	#1	108.3	22.7	85.6	45.778	1.9	570.7	305.2	12.5
	#2	108.9	21.8	87.1	18.269	4.8	580.7	121.8	31.8
	#3	92.3	24.6	67.7	38.452	1.8	451.3	256.3	11.7
	평균	103.2	23.0	80.1	34.2	2.8	534.2	227.8	18.7
8주차 실험	#1	117.9	23.0	94.9	41.678	2.3	632.7	277.9	15.2
	#2	125.7	22.1	103.6	78.175	1.3	690.7	521.2	8.8
	#3	142.3	28.6	113.7	86.911	1.3	758.0	579.4	8.7
	평균	128.6	24.6	104.1	68.9	1.6	693.8	459.5	10.9

4.2 초종별 성장기간별 인발력

성장기간이 증가하면 앞 절에서 살펴본 바와 같이 뿌리 무게가 지수함수적으로 성장하는 것을 알 수 있고, 그에 따라 인발력도 증가할 것이라는 것을 쉽게 추정할 수 있다. 그림 4의 초종별 성장기간별 인발력 측정결과를 살펴보면 물억새, 사초, 갈대 등 3가지 초종 모두 성장기간이 증가함에 따라 인발력도 증가하는 것을 알 수 있는데, 물억새와 사초는 성장기간과 정비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 갈대는 뿌리 무게와 같은 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 물억새와 사초의 뿌리 형태,

성장 특성과 갈대 뿌리의 형태, 성장이 다르기 때문으로 추정된다. 지하경에 의한 개체번식이 왕성한 갈대는 물억새와 사초에 비하여 뿌리가 늦게 성장하나, 일단 뿌리가 충분히 성장한 후에는 개체번식을 위한 지하경의 성장이 왕성하게 일어난다. 지하경은 보통의 갈대 뿌리보다 굵어 인발력이 급격히 증가하는 것으로 보인다.

물억새도 개체번식을 위한 지하경이 성장하기는 하나 갈대에 비하여 지하경의 숫자와 굵기가 상대적으로 약해 보인다.

뿌리의 형태와 특성에 따른 이와 같은 결과는, 인발력의 증가가 전단력의 증가와 직접적인 상관관계가 있으므로(조주형 등, 1998, 이인모, 1994,

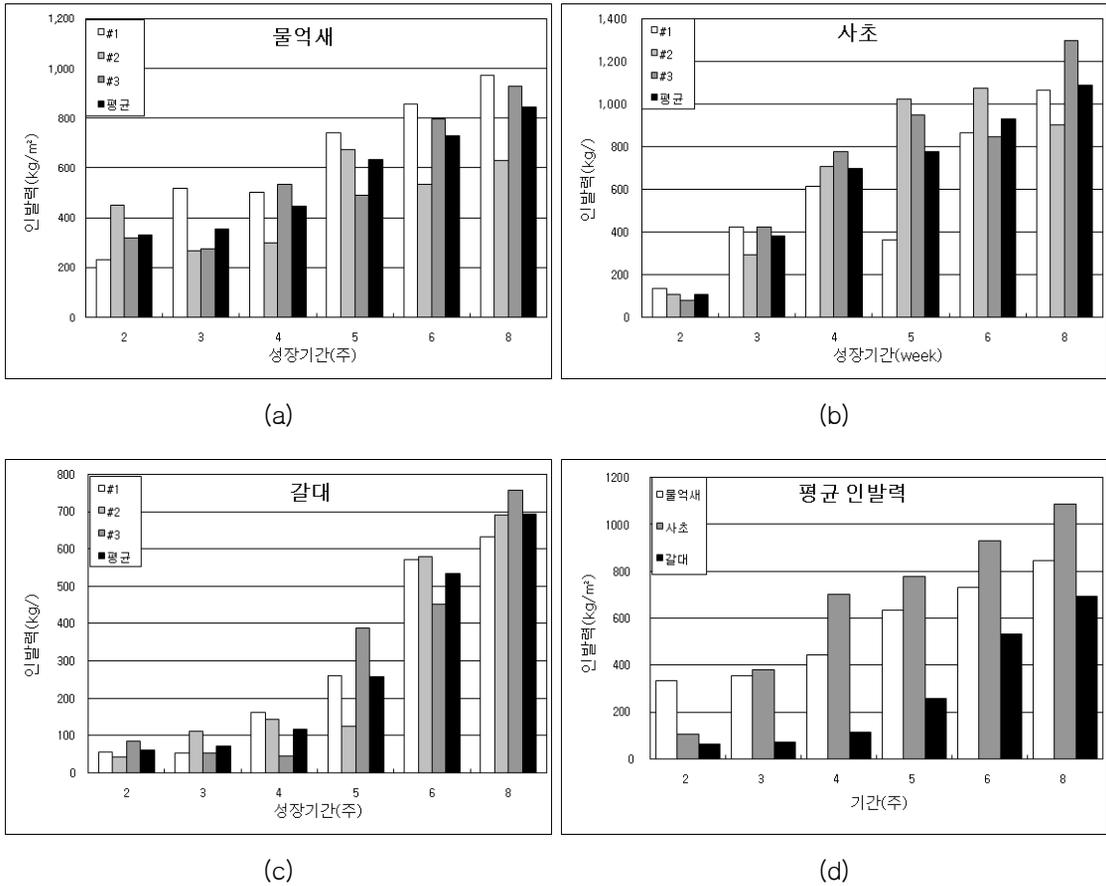


그림 4. 기간별 인발력 증가량. (a) 물억새, (b) 사초, (c) 갈대, (d) 평균인발력

이춘석, 2003) 시공 초기에 호안의 안정이 필요한 경우 또는 우기에 가까이 시공할 경우에는 물억새, 사초 등을 시공하는 것이 바람직하다.

4.3 초종별 뿌리 무게와 인발력

성장기간이 길면 길수록 뿌리 무게는 증가하나 4.1절에서 언급한 바와 같이 같은 기간이라 할지라도 뿌리 무게에 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 성장기간과 무관한, 즉 뿌리 무게와 인발력의 관계를 살펴볼 필요가 있으며 그림 5에 나타나 있다. 그림 5(a), 5(b)의 물억새와 사초의 뿌리 무게와 인발력의 관계를 살펴보면, 식재 초기에는 뿌리무게의 증가에 따라 인발력이 급격히

증가하다가 시간이 지날수록 뿌리무게의 증가에 따른 인발력의 증가량이 급격히 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 물억새의 경우는 8주후 뿌리 증가량에 대한 인발력 증가량이 거의 증가하지 않는 평형상태에 도달함을 보여준다. 반면 갈대의 경우는 뿌리 무게가 증가할 수록 인발력도 증가하는 선형의 관계를 나타내는 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과 역시 4.2절에서 설명한 뿌리의 형태와 특성 및 지하경의 성장 여부에 따른 결과로 보인다. 즉 갈대의 경우는 뿌리가 충분히 성장한 이후에는 지하경의 숫자와 굵기가 증가하므로 인발력의 증가율도 감소하지 않고 지속적으로 증가하는 것으로 추정된다.

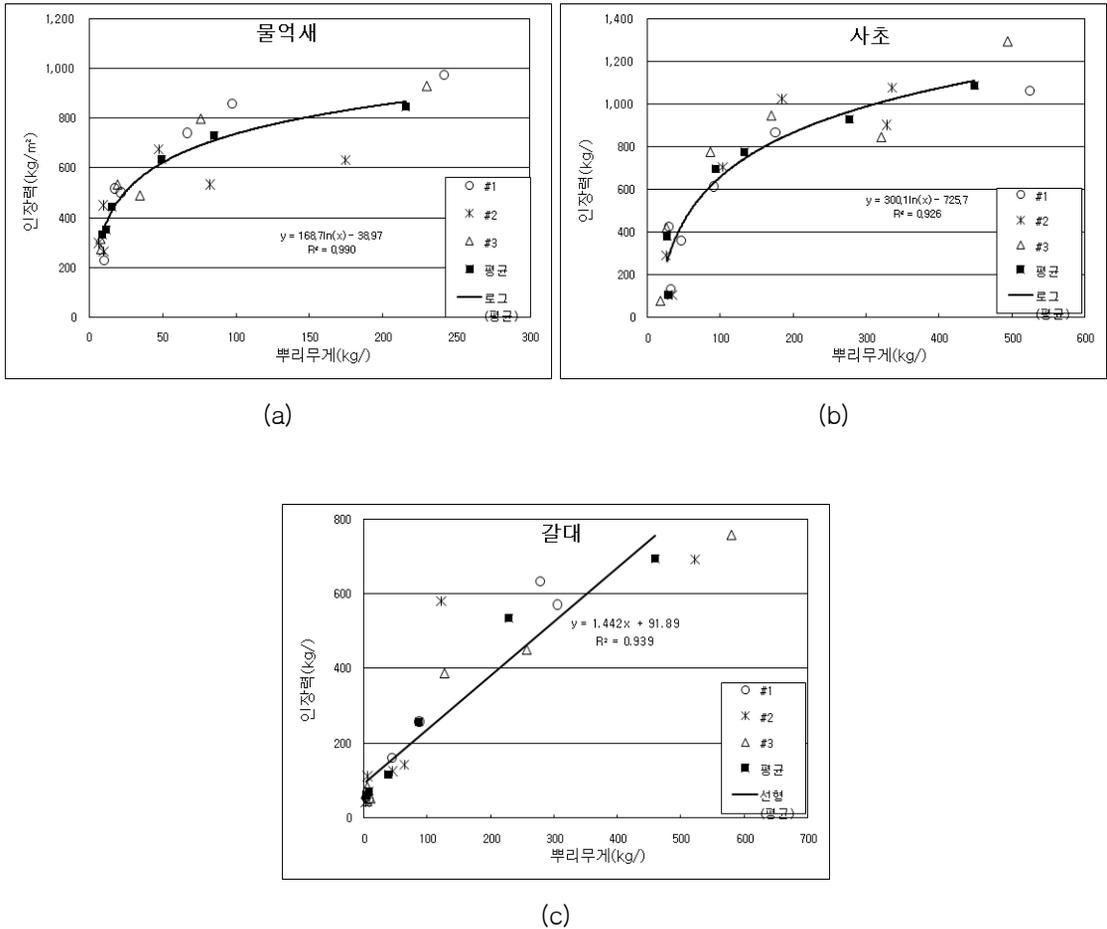


그림 5. 뿌리무게-인장력 관계. (a) 물억새, (b) 사초, (c) 갈대

4.4 뿌리단위무게당 인발력

성장기간이 늘어남에 따라 뿌리 무게는 증가하나 단위뿌리무게당 인발력의 증가는 감소하는 것을 그림 6.에서 알 수 있다. 이는 뿌리가 뽑힐 때 전체의 뿌리가 저항하는 것이 아니라 측정된 위치에 있는 뿌리 단면이 인발에 대하여 저항하므로 생겨난 결과로 볼 수 있다. 즉 인발력에 저항하는 것은 뿌리 전체의 부착력과 뿌리의 인장강도인데, 1개의 뿌리가 길이 성장을 계속하여 무게가 무거

워지면 부착력은 증가하나 뿌리단면의 인장강도는 단면이 크게 증가하지 않으므로 인장강도 역시 크게 증가하지 않는다. 따라서 뿌리 무게가 증가하여 뿌리 무게가 늘어나더라도 인발력의 증가에는 한계가 있고, 단위뿌리무게당 인발력은 감소하게 된다.

또 4.3절에서 물억새와 사초의 경우 뿌리 무게가 증가하여도 그림 5.에서와 같이 인발력이 선형적으로 증가하지 않는 것도 같은 이유인 것으로 판단된다.

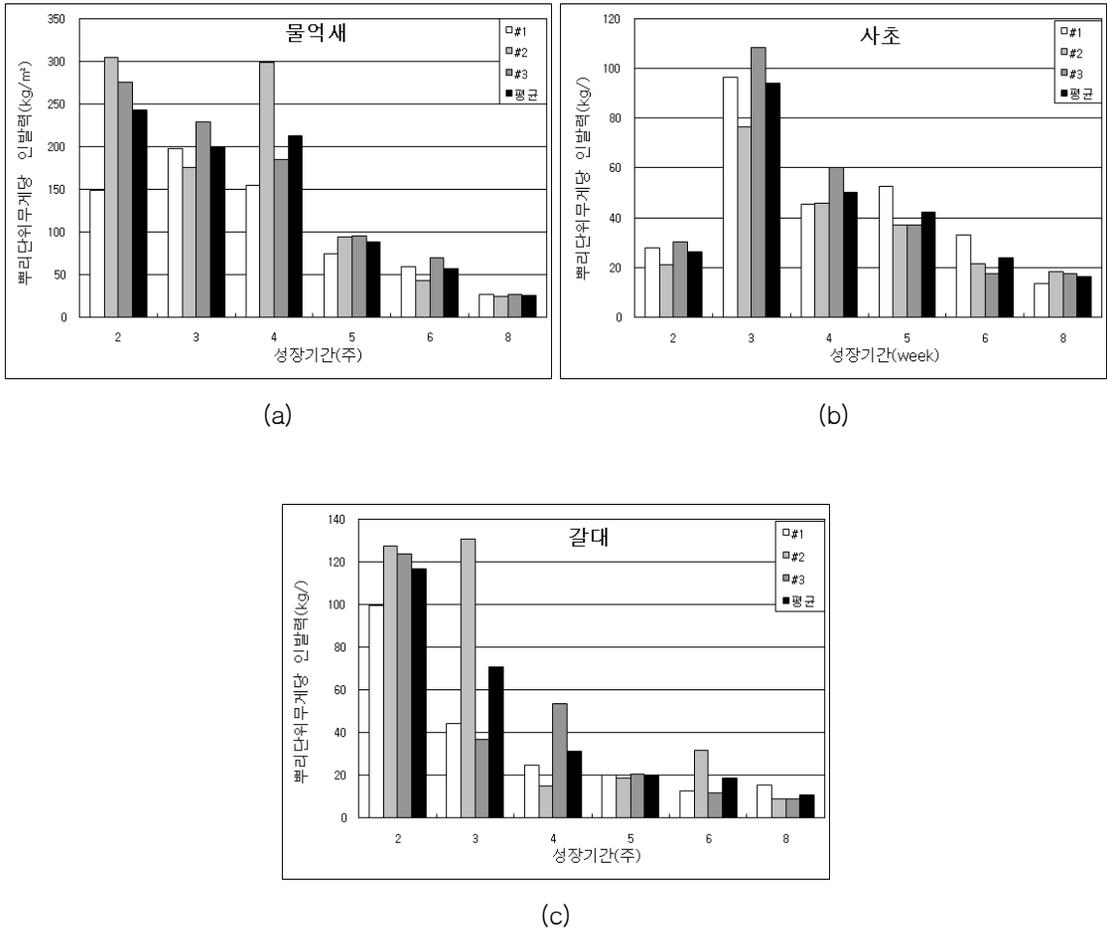


그림 6. 기간별 뿌리단위무게당 인발력. (a) 물억새, (b) 사초, (c) 갈대

5. 결 론

본 연구는 뗏장형태로 재배되어 호안에 시공할 수 있도록 제작된 완성형 식생매트의 성장과 그로 인한 역학적 특성, 특히 사면안전에 결정적 영향을 미치는 흙의 전단력 향상과 관계있는 인발력의 증가를 측정하는 포지실험을 실시하였다.

기존의 많은 연구들이 뿌리 단면적과 인발력의 관계를 이용하여 전단력을 결정하는 방법을 시도하였으나, 본 연구에서는 동일한 식물의 뿌리 밀도는 일정하다고 가정하고 뿌리의 체적 대신에 뿌리 무게와 인발력의 관계를 유도하여 전단력 측정

을 위한 기초자료로 이용하였다. 식물 뿌리 체적 대신에 무게를 측정하여 인발력과의 관계를 유도한데는, 기존의 연구가 목본류 및 관목류의 뿌리가 전단력 증가에 미치는 영향을 분석하였는데 반하여, 본 연구에서는 초본류의 뿌리를 대상으로 하였고, 초본류 뿌리의 체적을 결정하는 방법은 표준화된 방법이 없을 뿐 아니라 정확한 뿌리 체적 및 전단면의 뿌리 단면적을 측정하기 어렵다.

실험에 의하면 초본류의 뿌리 무게는 시간이 경과함에 따라 급격히 증가하였고, 뿌리 무게가 증가함에 따라 인발력이 증가함을 알 수 있었다. 초기 인발력의 증가는 물억새, 사초가 갈대에 비

하여 상대적으로 크게 나타났고, 갈대는 두 식물에 비하여 시간의 경과에 따라 천천히 증가하였으나 6주후 부터는 급격히 증가하였다.

또한 시간 경과와 뿌리 무게 증가에 따른 인발력의 증가는 물억새와 사초의 경우는 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 뗏장을 식재한 후, 활착을 위하여 먼저 뿌리의 개체수(갯수)가 증가하고, 충분히 활착이 이루어진 후에는 식물의 성장을 위하여 깊이 방향으로 뿌리가 성장하게 된다. 따라서 식물 뿌리량이 증가함에 따른 뿌리의 부착력은 증가하나 뿌리 단면의 증가는 이루어지지 않기 때문이다.

갈대의 경우는 뿌리 무게가 증가함에 따라 인발력도 선형적으로 증가하였는데, 이는 성장을 위한 뿌리 개체수가 늘어날 뿐 아니라, 갈대의 번식 방법인 지하경의 증가로 뿌리의 개체수(갯수)가 계속하여 많아지기 때문으로 판단된다.

본 연구의 또 다른 결과로 우기에 가까운 시기에 매트형 식생호안을 시공할 경우에는 사초, 물억새를 시공하는 것이 초기에 인발력을 확보하고 전단력을 증가시키는데 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(수생태 복원사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김상규(1995) 토질역학의 기본원리, 동명사, pp. 179-210

김윤환, 김철 (2009) 식생뿌리에 의한 호안의 수리적안정에 관한 연구, 한국수자원학회 학술대회논문집, pp. 457-463

이인모, 성상규, 임충모 (1991) 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구,

한국지반공학회지, vol. 7, No. 2, pp. 51-66

이춘석, 임승빈(2003),삼목에 의한 갯버들 그네의 토양전단강도 보강효과, 한국조경학회지, Vol. 31, No. 5, pp. 1-10

조주형, 안봉원(1998), “식생뿌리에 의한 비탈면 안정과 보강에 관한 실험적 연구”, 한국환경복원녹화기술학회 1(1), pp. 54-62

지병윤, 정도현, 전권석, 김종윤(2006), 임도사면 녹화식물뿌리의 인발강도특성에 관한 연구, 한국임학회지, Vol. 95, No. 1, pp. 45-49

최규창, 김남춘(1999), 자연형 하천 식생복원을 위한 달뿌리풀, 물억새, 솔새, 수크령의 녹화 방법에 관한 연구, 한국환경복원녹화기술학회, Vol. 2, No. 2, pp. 70-77

한은진, 황수덕, 김영도, 박재현, 김철(2010), 고수호안 식생매트공법의 수리적 안정성에 관한 연구, 한국습지학회지, 제 12권 제 2호, pp. 75-89

北村嘉一, 難波宣士(1981) 拔根試驗を通して林木根系の崩壊防止機能, 林試年報. 333, pp. 175-208

陶山正憲, 原 敏男(1986) 樹草根系による斜面安定化機構す關實驗的研究(Ⅲ), 日林論 99, pp. 599-600

Noboru, K. (1979) Illustration of tree roots, 誠文堂新光社

Waldron, L. J.(1977) The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of America, Vol. 132, No. 2, pp. 843-849

Wu, T. H., P. Mckinnell and D. N. Swanston (1979) Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Can, Geotech, J. 16 pp. 19-23

○ 논문접수일 : 2012년 03월 08일

○ 심사의뢰일 : 2012년 03월 09일

○ 심사완료일 : 2012년 04월 03일