

하천제방 양질사토에 대한 수크령과 억새 뿌리의 토양전단강도 보강효과*

당지희¹⁾ · 조용현²⁾ · 이춘석³⁾

¹⁾ 공주대학교 조경학과 대학원, ²⁾ 공주대학교 조경학과, ³⁾ 경남과학기술대학교 조경학과

Effect of Soil Reinforcement on Shear Strength by *Pennisetum alopecuroides* and *Miscanthus sinensis* Roots on Loamy Sand at River Banks*

Dang, Ji-Hee¹⁾ · Cho, Yong-Hyeon²⁾ and Lee, Chun-Seok³⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Kongju National University,

²⁾ Dept. of Landscape Architecture, Kongju National University,

³⁾ Department of Landscape Architecture, GyeongNam National University of Science & Technology.

ABSTRACT

This study was conducted to find out the physical properties and soil shearing strength reinforcement effect of herbaceous plants for the slope revegetation works. Two native plants(*Pennisetum alopecuroides* and *Miscanthus sinensis*) were used for this experiment, because they have excellent seed germination rates without preconditioning, and grow naturally around rivers. To identify the physical properties, the partial dry weight of plants were investigated. To identify the soil shearing strength reinforcement effect, the respective soil shearing strengths of the control soils, *Pennisetum alopecuroides*, *Miscanthus sinensis* samples were measured. Also, we did a correlation analysis to examine the relation of shearing strength to plant features. The results are summarized as follows:

1. The average dry weight of *Pennisetum alopecuroides* samples consists of 52.36% above ground and 47.64% at root. And in dry weight, 78.24% of it's root distributes within 10 cm in soil depth.

* 본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발사업에서 지원받았습니다(과제번호: 2014000130009).

First author : Dang, Ji-Hee, Department Landscape Architecture, Graduate School of Kongju National University
Tel : +82-41-330-1452, E-mail : dangji1224@naver.com

Corresponding author : Cho, Yong-Hyeon, Department of Landscape Architecture, Kongju National University,
Chungnam 32439, Korea
Tel : +82-41-330-1446, E-mail : yhcho@kongju.ac.kr

Received : 3 March, 2017. **Revised** : 28 April, 2017. **Accepted** : 28 April, 2017.

Meanwhile the average dry weight of *Miscanthus sinensis* samples consists of 52.91% above ground and 47.09% at root. And in dry weight, 82.95% of it's root distributes within 10 cm in soil depth.

2. The results of correlation analysis showed that for both *Pennisetum alopecuroides* and *Miscanthus sinensis*, it could not be said that there was any correlation between shearing strength and plant characteristics, and statistically they were not meaningful.

3. In the shearing strength test with control soils, *Pennisetum alopecuroides*, *Miscanthus sinensis* as subjects, the differences in shearing strength measurement results were modest, and the order was shown as control soils < *Pennisetum alopecuroides* < *Miscanthus sinensis*, so the soil shearing strength reinforcement effect by the *Pennisetum alopecuroides* and the *Miscanthus sinensis* on loamy sand at river banks surface was confirmed.

Key Words : *Revegetation, River bank plant, Native plant, Plant root zone, Sandy soil*

I. 서 론

1. 하천제방 양질사토에 대한 수크령과 역새

토양 사면의 안정성과 관련된 대표적인 훼손 현상은 크게 침식(Erosion)과 붕괴(Mass-movement)로 구분될 수 있으며, 이 중 침식의 영향 요인과 형태로는 강우에 의한 빗물 충격에 의한 토양 입단 파괴(raindrop splash), 사면 표면 유실(sheet erosion), 미세 도랑 형성(rilling), 대형 세굴(gully) 등이 있으며, 이런 침식 작용은 결과적으로 하천을 형성하는 단계로 발전하게 된다. 반면에 붕괴는 현상에 따라서 붕괴(falls), 전도(topples), 미끄러짐(slides), 확산(spreads)과 흐름(flows) 등의 다섯 가지 유형으로 구분된다. 이 중에서 충분한 밀도와 길이의 뿌리를 가진 식생에 의해서는 지표면부의 입단파괴와 표면유실, 도랑 형성 등을 방지하는 사면 보호 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 특히 점질성이 부족한 토양에 대해서 그 효과가 큰 것으로 알려져 있다. 그러나, 깊은 토양층에서 발생하는 심층 사면 붕괴에 대해서는 식물 뿌리 특히 초본류의 보강 역할은 크지 않은 것으로 알려져 있다 (Gary and Leiser, 1989).

비탈면의 침식 및 붕괴현상을 방지하고 경관미를 회복하기 위해서는 식생으로 사면을 녹화시켜야 한다(Kim, 1997). 하지만 현재 우리나라 사면녹화공법은 외래 초종 도입과 생태적 친이름 고려하지 않은 녹화공법으로 인해 생태계 교란, 자연경관의 훼손 및 관리적 측면에서 문제점이 발생하고 있다(Ministry of Environment, 2001). 이를 개선하기 위해서는 현재 사용되고 있는 외래 초종의 단점을 보완하고 자연생태 조건에 부합되는 식생안정과 친이과정정이 이루어질 수 있도록 해야 한다. 조성 초기의 침식 현상을 억제하기 위해서는 목본류와 초본류의 혼파가 필요한데(Kim, 1997), 자생종을 이용한 절개비탈면 녹화실험을 통해 자연 생태적 측면을 고려한 국내자생초본의 선발이 매우 중요하다 (Ministry of Environment, 2001). 초본류는 동종을 기준으로 수입초본식물의 경우 국내자생초본식물에 비해 발아율이 현저히 낮다. 국내자생초본식물 중 수크령과 역새는 종자가 휴면을 하지 않으며 발아율이 양호하다(Kim, 2012; Cho et al., 2012; Cho and Lee, 2014; Lee, 2014). 특히 역새는 토사사면에서 84-88%의 발아율과 84-89%의 생존율, 암석사면에서 68-78%의 발

아울과 71-81%의 생존율을 보여 발아율 및 생존율이 상대적으로 우수하다(Kim, 2008).

발아율이 우수한 자생 초본식물이라 하더라도 이를 사면녹화에 활용하려면 해당 식물의 식재에 따른 토양전단강도 보강효과에 대한 기초연구가 필요하다. 지금까지 발표된 식물에 의한 토양보강효과에 관한 국내 연구들을 살펴보면 Jo and An(1998)이 조릿대, 참억새, 참싸리를 대상으로 인장강도를 측정하여 인장강도는 뿌리직경이 커짐에 따라 커진다는 것을 밝혔다. Ji et al.(2006)은 뿌리보강효과를 측정하기 위해 임도 사면 도입초본 5종, 재래초본 9종, 재래목본 4종 등 총 18종을 선정하여 종별 뿌리의 신장 깊이, 인발강도 등을 측정하여 인발강도는 목본류가 초본류보다 높고, 초본류 중에서는 재래초본이 도입초본보다 높은 것을 밝혔다. Kim et al.(2012)은 매트형 식생호안공법에 이용되는 물억새, 갈대, 사초의 성장기간의 경과에 따른 인발력 증가에 대한 실험을 실시하여, 종별 뿌리의 무게와 인발력의 관계를 밝혔다. Choi and Lee(2011)는 달뿌리풀과 잔디를 대상으로 식생호안의 침식특성을 수리모형실험을 통해 살펴본 결과 근모량이 증가함에 따라 침식에 대한 저항력이 증가하게 됨과 잔디의 침식저항능력이 뛰어남을 밝혔고, 근모량 측정 방법을 제시하였다. 이들 연구에서 알 수 있듯이 지금까지의 연구는 인발력을 측정하고, 이를 통해 토양전단강도를 간접적으로 추정하는 연구들이 주를 이룬다. 반면에 직접 토양전단강도를 측정한 국내 연구로는 Lee(2003)의 연구가 있다. 그는 갯버들 뿌리로 보강된 토양과 단순토양의 전단강도를 측정하여 뿌리가 보강된 토양이 단순토양보다 약 두 배의 강도가 나타남을 밝혔다. 이처럼 토양전단강도를 직접 측정하는 연구가 드문 이유는 식물체가 자연스럽게 자라는 토양공시체의 준비가 어렵고, 식물이 자라는 커다란 토양공시체를 다룰 적절한 규모의 토양전단강도 측정 장비 확보가 어려워 전단강도 측정이 쉽지 않기 때문이다.

이처럼 현재 국내 자생종의 기초연구가 존재하나 충분치 않고, 특히 토양전단강도의 직접 측정에 대한 연구는 매우 부족한 실정이므로 비탈면녹화용 식물 뿌리의 토양전단강도에 관한 직접 측정 연구가 요구되고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 국내자생초본식물에 의한 하천 제방 녹화 활성화를 위한 기초정보로서 하천 제방의 주요 토성인 양질사토에서 종자가 휴면을 하지 않으며 발아율이 양호한 수크령과 억새에 대한 생물체 특성, 그리고 뿌리분포역의 토양전단강도 보강효과 측정정보를 제공하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 식물 종의 선정

연구대상 종 선정과정에서는 사전연구(Cho et al. 2012; Cho and Lee, 2014)의 결과를 활용하였는데, Cho et al.(2012)의 사전연구에서는 하천 주변 경관과 조화를 이루기 위하여 제외지와 인접한 제방부, 제방비탈면, 고수부지에 형성되며 하반림에 분포하는 식생을 중심으로 전국의 하천에 넓게 분포해 척박지에 견딜 수 있으면서 종자채취가 용이하다고 판단되고 자연하천을 대상으로 조사된 하천수변의 주요 식생분포비율(Ministry of Environment, 2006)에서 높은 비율을 차지한 벼과(8.2%), 장미과(6.4%), 콩과(3.9%)를 참고로 하여, 제방의 자연성 회복과 식생의 생태적 관점에서 중요한 일년생초본류인 금강아지풀(*Setaria glauca* (L.) P.Beauv.), 가을강아지풀(*Setaria faberii* Herm.), 다년생초본류의 띪(*Imperata cylindrica* var. *koenigii*), 억새(*Miscanthus sinensis* Anders.), 수크령(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.) 등 벼과식물 5종, 다년생초본류인 콩과식물 비수리(*Lespedeza cuneata* G.Don) 1종, 그리고 싸리(*Lespedeza bicolor* Turcz.), 조팝나무(*Spiraea prunifolia* for. *simpliciflora* Nakai), 찔레(*Rosa multiflora* Thunb) 등 관목 3종을 포함한 다양한 생육형의 공시식물 9종에 대해 실험이 이

루어졌다. 이 가운데 전처리 없이 종자가 휴면을 하지 않으며, 발아율이 우세한 것으로 밝혀졌고 (Cho and Lee, 2014), 훼손지의 교란지역 및 도로 건설 등으로 인한 인공 비탈면과 각종 훼손비탈면 녹화에 많이 사용되는 벼과식물인 수크령, 갈대, 억새 3종을 실험대상 종으로 선정하였다.

2. 실험식물 채종 생장 시기 및 장소

실험에 사용된 수크령, 갈대, 억새 종자는 Cho and Lee(2014)의 파종방법에 따른 수크령, 갈대, 억새의 초기 생장 특성에 관한 연구에서 발아실험에 사용된 종자로, 2012년 10월~2012년 11월에 채취한 것이다. 채취의 적기는 종자의 성숙도에 따라 10월에서 11월에 걸쳐 채취하였고, 채종장소는 충남 예산군을 중심으로 무한천과 신양천 유역에서 채취하였으며, 선정된 식물의 채취종자는 자생지에서 채종하여 그늘에서 자연건조 후 밀폐용기에 넣어 5 °C의 냉장고에 넣어 보관하여 사용하였다. 공시식물 중 수크령(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.)과 억새(*Miscanthus sinensis* Andress.)는 무리 없이 잘 성장하였으나, 갈대(*Phragmites communis* Trin.)는 성장 중 현재의 토양조건과 맞지 않아 모두 고사하였다.

공주대학교 산업과학대학 내 실험장에서 2013년 6월부터 2015년 10월까지 약 2년 4개월 동안 성장시켰는데, 식물의 초기발아 생육은 2013년 6월부터 약 2개월 동안 상토에서 실험구 pot를 이용하였으며, 이후 실험장 내의 공시체 토양에 이식하여 성장시켰다. 이처럼 장기간에 걸쳐 실험 대상 식물을 생육시킨 이유는 자연 상태에서 식물이 충분히 정착한 상태에서 토양 전단강도 보강효과를 측정하고자 하였기 때문이다. 실험장 내의 토양은 일반적인 하천 제방 토양을 모의하기 위해 무한천 고수부지에서 채취한 양질사토(모래 83% 이상, 점토 10%, 미사 5% 미만) 한 가지로 한정하였다.

3. 공시체 제작

실험 공시체의 구조는 내경 Ø203 mm, 두께 6 mm, 높이 100 mm로 절단한 PVC파이프를 사용하였고, 단위길이 100 mm 당 직경 8 mm의 천공 30개를 만들어 3개를 결합하여 임시 결속시킨 뒤 토양에 묻었다. 실험 공시체는 식물이 식재되어 있는 실험집단과 단순토양만 존재하는 대조집단으로 구분하였다(Figure 1 참조). 단순토양만 존재하는 공시체의 경우 식물생육 공시체 옆에 토양조건을 같게 하여 같은 시기에 나란히 묻되 검정비닐을 씌워 식물 생육을 차단하였다. 약 2년 4개월간의 생육기간을 거친 후 공시체를 캐내어 토양전단강도 및 식물생장 특성을 측정하였다.



a. Experiment groups b. Contrast groups

Figure 1. Classification of containers

4. 공시식물 특성 측정

식물 뿌리분포역의 전단강도와 공시식물과의 상관성을 밝히고자 공시식물의 생장 특성을 측정하였다. 수염뿌리만 존재하는 초본류는 뿌리 단면적 산출이 어려워 식물체의 초장, 수장, 간장, 경직경, 본수와 잎, 줄기, 꽃의 건조량 및 실험 공시체의 단위길이 100 mm별로 나누어 식물의 상부 뿌리분, 중앙 뿌리분, 하부 뿌리분 건조량을 측정하였다. 측정을 위해 버니어캘리퍼스를 사용하고, 강제순환건조기를 사용하여 75 °C에서 2일 동안 건조하여 그 무게를 측정하였다.

5. 전단강도 측정

지반 및 사면의 안정성을 평가하기 위해서 토질역학에서 가장 많이 사용하고 있는 이론은 모어(Mohr)와 쿨롬(Coulomb)의 파괴이론(Failure Envelope)이다(Kim, 1999). 상이한 응력 조건하에서 행하여진 3축 압축 시험으로 얻어진 파괴시의 응력원군의 포락선은 전단 파괴시의 σ 와 τ 의 관계를 나타내어, 모어의 파괴 기준이라 하는데, 특히 이 포락선이 직선일 때 쿨롬의 마찰 법칙과 일치하기 때문에 모어·쿨롬의 파괴기준이라 한다. 흙의 전단 강도를 주는 모어-쿨롬의 파괴기준식은 식①과 같다.

$$s = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\text{식①}$$

여기서, s : 흙의 전단 강도, σ : 수직 응력,
 c : 점착력, ϕ : 내부마찰각

단순토양의 전단강도를 측정하기 위해서 사용하는 실험방법에는 삼축압축시험, 직접전단 시험, 일축압축시험 등의 실내 시험법과 베인 테스트, 콘 테스트, 표준관입시험 등의 현장시험이 있다. 그러나 식물이 관입된 뿌리분의 경우, 공시체의 채취와 이동의 곤란성, 자연적인 뿌리와 토양 결합 상태 및 토양 특성을 유지한 상태에서 전단강도를 측정할 필요성 등의 여러 가지 이유로, 베인 테스트와 현장 직접전단시험 등 현장에서 측정하는 방법이 많이 이용되어왔다(Norris and Greenwood, 2000; Wu et al., 1998; Lee, 2003). 그러나 본 연구에서는 전단장치 설치 및 작동이 어려운 점, 다양한 수직응력 상태를 고려하기 곤란한 점, 식물의 뿌리분포가 불규칙한 점, 공시체 굴취 시 뿌리의 진동으로 인한 토양 교란 가능성, 휴대용 유압 장치 이용 시 일정한 속도로 재하하기 곤란한 점 등의 한계로 별도의 뿌리분 공시체를 조성하여 실내 직접전단시험으로 전단강도를 측정하였다(Lee, 2003).

실험에 사용된 전단강도 측정기기는 기존의 전단강도 측정기기의 원리와 동일하며 실험구

직경이 커서 특수 제작되었다. 힘 또는 하중을 측정하기 위한 변환도구인 로드 셀은 1T까지 변환이 되는 것으로 사용하였으며, 로드 셀이 압축을 받거나 늘어나는 등의 변형이 일어날 때 변형 량을 전기 신호로 검출하는 변형 측정 장치로서 인디케이터를 사용하여 검출하였고 IM-Works Pro 프로그램을 사용하여 PC에서 데이터를 출력하였다(Figure 2 참조).



Figure 2. Soil shearing strength measuring equipments

직접전단시험에 의해 토양전단강도를 측정하였으며, 수평변위 증가 속도는 0.10 mm/sec이었다. 각 공시체의 최대 전단응력은 수평 응력의 증가치가 둔화되어 최초 수평에 도달한 지점의 값으로 결정하였다. 그러나 토양과 뿌리가 결합된 형태의 공시체를 전단해야 하는 실험의 특성상, 전단 상자 자체의 기계적 마찰과 식물 뿌리에 의한 전단 방해 작용이 발생하여 전단이 완료된 후에도 응력은 증가하는 특이현상이 발생하였다. 이 경우에는 공시체의 특성을 고려하여 수평변위가 전단공시체 직경의 약 7%에 해당되는 14 mm 지점의 응력을 최대 응력으로 산정하였다. 실험치의 정확성 및 신뢰성을 높이고 기계의 오차를 줄이기 위하여 단순토양 공시체의 예비실험을 실시하였다. 예비 실험에서는 세 종류 이상 서로 다른 크기의 수직응력 0.78 N/cm²,

2.03 N/cm², 2.90 N/cm²로 구분하여 각 수직응력 당 6 반복으로 전단강도 실험을 실시하였다.

본 실험은 예비실험과 같은 방법으로 로드 셀을 전단강도 측정기기에 연결하고 전단력을 추가하여 전단저항 값을 측정하였으며, 흙의 파괴 조건을 나타내는 식에 따라 “모어-쿨롬의 파괴규준식”(식①)을 적용하였고, 단위면적 당 수직응력을 2.90 N/cm², 3.90 N/cm², 6.15 N/cm²로 구분하여 각 수직응력 당 3반복으로 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 단순토양

수평변위 증가에 따른 전단응력 변화곡선(Figure 3 참조)은 11.5 mm 지점에서 처음 수평에 도달하였다. 공시체의 기계적 마찰과 토양 내부에서 전단 후의 마찰 등을 고려하여 변화곡선에서 마지막 수평에 도달한 시점을 최대 전단응력으로 해석하였다.

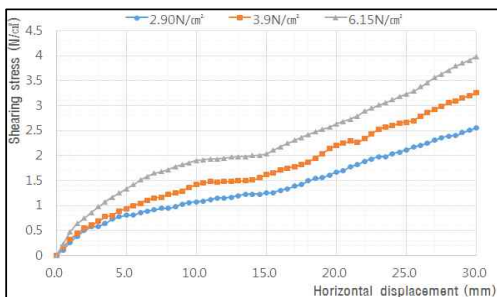


Figure 3. Shearing stress value by horizontal displacement of control soils

단순토양이 있는 공시체에 단위면적 당 수직응력이 2.90 N/cm²일 때 전단강도 값은 1.23 N/cm², 수직응력이 3.90 N/cm²일 때 전단강도 값은 1.51 N/cm², 수직응력이 6.15 N/cm²일 때 전단강도 값은 2.00 N/cm²로 나타났으며(Table 1 참조), 모어-쿨롬의 파괴규준식(식①)에 대입하면 토양의 점착력(c) 값은 0.62 N/cm²이고, 내부마찰각(ϕ) 값은 12.41°로 나타났다(Figure 4 참조).

Table 1. Shearing strength value by normal stress of control soils

	No. 1	No. 2	No. 3
Normal stress(N/cm ²)	2.90	3.90	6.15
Shearing strength(N/cm ²)	1.23	1.51	2.00

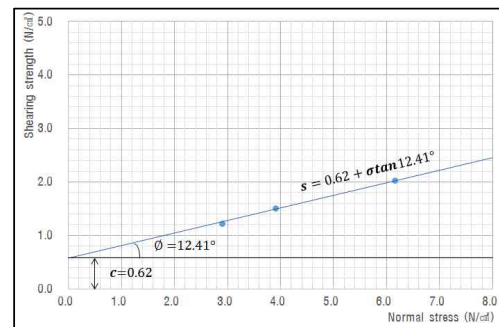


Figure 4. Mohr-Coulomb's Failure Criterion of control soils

2. 수크령

수크령 뿌리분 공시체의 경우 각각의 수직응력 2.90 N/cm², 3.90 N/cm², 6.15 N/cm² 일 때 수평변위 14 mm 지점에서 전단응력은 계속 증가하였다(Figure 5, Figure 6, Figure 7 참조). 단순토양 공시체와 같은 방법으로 최대 전단강도를 해석하였다.

단위면적 당 수직응력 2.90 N/cm²일 때 수크령 뿌리분 공시체 3개의 평균 전단강도 값은 1.34 N/cm², 수직응력 3.90 N/cm²일 때 수크령 뿌리분

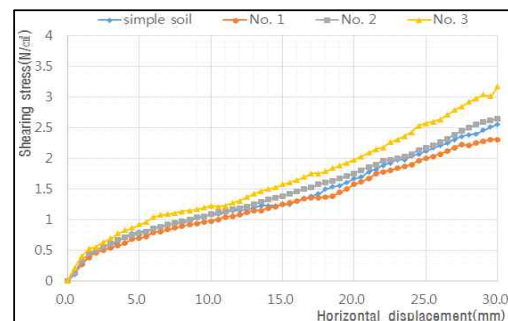


Figure 5. When the normal stress 2.90 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Pennisetum alopecuroides* samples

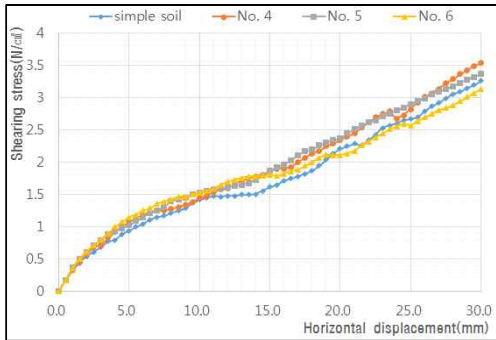


Figure 6. When the normal stress 3.90 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Pennisetum alopecuroides* samples

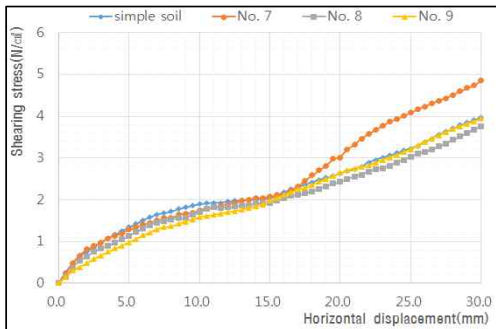


Figure 7. When the normal stress 6.15 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Pennisetum alopecuroides* samples

공시체 3개의 평균 전단강도 값은 1.76 N/cm², 단위면적 당 수직응력 6.15 N/cm²일 때 수크령 뿌리분 공시체 3개의 평균 전단강도 값은 1.93 N/cm²로 나타났으며(Table 2 참조), 모어-쿨롬의 파괴규준식(식①)에 대입하면 토양의 점착력(*c*) 값은 0.68 N/cm²이고, 내부마찰각(ϕ) 값은 13.50°로 나타났다(Figure 8 참조).

식물 특성 측정 결과 수크령의 개체 당 건중량 백분율은 지상부가 평균 52.36%, 지하부가 평균 47.64%로서 지상부와 지하부의 비율이 비슷하였다. 잎이 평균 53.85%, 줄기가 평균 45.76%, 번식기관이 평균 0.40%에 해당하고, 10cm 간격으로 구분하여 측정한 지하 뿌리부분의 건중량 백분율은 상부 뿌리부분이 평균 78.24%, 중앙 뿌리부분이 평균 16.47%, 하부 뿌리부분이 5.29%

Table 2. Shearing strength value by normal stress of *Pennisetum alopecuroides* samples

	Normal stress (N/cm ²)	Shearing strength (N/cm ²)	Average shearing strength (N/cm ²)
S a m p l e	1	1.19	1.34
	2	2.90	
	3	1.50	
P l e	4	1.78	1.76
	5	3.90	
	6	1.78	
No.	7	2.03	1.93
	8	6.15	
	9	1.84	

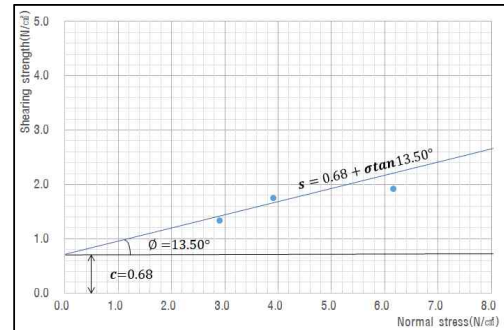


Figure 8. Mohr-Coulomb's Failure Criterion of *Pennisetum alopecuroides* samples

에 해당하여, 뿌리의 78%가 지하 10 cm이내에 분포함을 일 수 있었다. 수크령 공시체의 본수, 초장, 수장, 간장, 줄기 직경, 지상부 및 지하부 건중량의 측정결과는 Table 3과 같다.

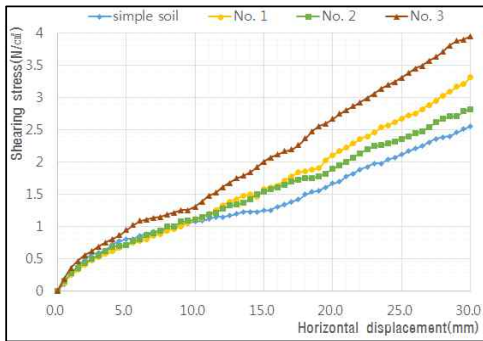
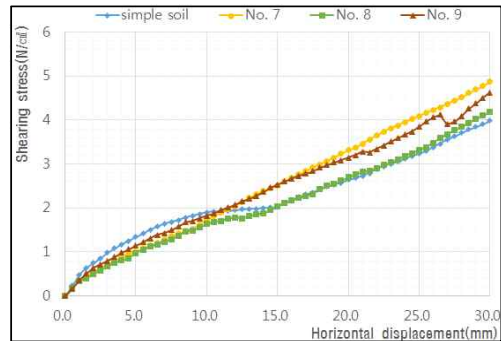
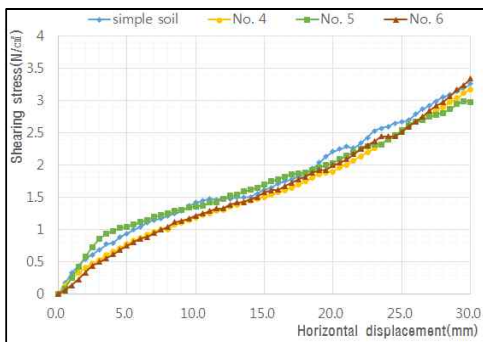
각 수직응력에 대한 전단강도와 수크령의 본수, 초장, 수장, 간장, 줄기 직경, 지상부 및 지하부 건중량의 상관분석을 실시한 결과 특성의 모든 항목에 대하여 전단강도와 상관이 있다고 할 수 없었다. 다만, 수크령 특성간의 상관분석 결과 지하부 상부 뿌리분, 중앙 뿌리분, 하부 뿌리분 건중량 및 지하부 전체 건중량은 잎, 줄기, 꽃의 건중량 및 지상부 전체 건중량과 5% 유의 수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났다.

3. 역새

역새 뿌리분 공시체의 경우 각각의 수직응력

Table 3. Physical properties of *Pennisetum alopecuroides* samples

Sample No.	Total population	Max size (cm)				Dry weight of above ground part (g)				Dry weight of root (g)			
		Plant height	Ear length	Stem length	Stalk diameter	Leaf	Stem	Propagative organ	Sum	Upper root	Middle root	Lower root	Sum
1	62	113.0	8.5	93.0	0.45	30.74	25.96	0.18	56.88	30.19	7.39	3.02	40.60
2	76	109.0	9.5	94.0	0.70	38.19	30.30	0.03	68.52	45.40	9.61	3.69	58.70
3	75	113.0	10.5	105.5	0.65	41.79	31.20	0.15	73.14	51.80	16.05	4.83	72.68
4	82	118.0	8.0	59.0	0.80	31.85	25.55	-	57.40	44.91	14.23	2.77	61.91
5	110	140.0	15.5	117.5	0.60	70.25	87.44	1.50	159.19	155.41	14.23	6.86	176.50
6	102	168.0	16.0	152.0	2.00	102.31	121.16	1.96	225.43	141.80	21.73	6.58	170.11
7	92	114.5	-	-	-	34.29	29.18	-	63.47	45.45	9.39	3.15	57.99
8	105	141.0	12.0	127.0	1.15	64.16	60.34	0.50	125.00	102.06	17.20	6.12	125.38
9	72	146.0	13.0	133.0	0.60	55.32	26.18	0.65	82.15	53.75	12.41	3.23	69.39
Mean	86.22	129.17	11.62	110.12	0.86	52.10	48.59	0.55	101.24	74.53	13.58	4.47	92.58

**Figure 9.** When the normal stress 2.90 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Miscanthus sinensis* samples**Figure 11.** When the normal stress 6.15 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Miscanthus sinensis* samples**Figure 10.** When the normal stress 3.90 N/cm², shearing stress value by horizontal displacement of *Miscanthus sinensis* samples

2.90 N/cm², 3.90 N/cm², 6.15 N/cm² 일 때 수평변위 14 mm 지점에서 전단응력은 계속 증가하였다 (Figure 9, Figure 10, Figure 11 참조). 단순토양 공시체와 같은 방법으로 최대 전단강도를 해석하였다.

단위면적 당 수직응력 2.90 N/cm²일 때 역새 뿌리분 공시체 3개의 평균 전단강도 값은 1.59 N/cm², 수직응력 3.90 N/cm²일 때 역새 뿌리분 공시체 3개의 평균 전단강도 값은 1.51 N/cm², 단위면적 당 수직응력 6.15 N/cm²일 때 역새 뿌리분 공시체 3개의 평균 전단강도 값은 2.21 N/cm²로

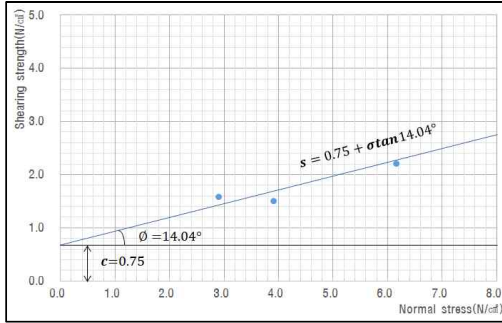


Figure 12. Mohr-Coulomb's Failure Criterion of *Miscanthus sinensis* samples

나타났으며(Table 4 참조), 모어-쿨롬의 파괴규준식(식①)에 대입하면 토양의 점착력(*c*) 값은 0.68 N/cm²이고, 내부마찰각(ϕ) 값은 13.50°로 나타났다(Figure 12 참조).

역새의 개체 당 건중량 백분율은 지상부가 평균 52.91%, 지하부가 평균 47.09%로서 수크령과 마찬가지로 지상부와 지하부의 비율이 비슷하였다. 잎이 평균 48.30%, 줄기가 평균 50.18%, 번식기관이 평균 1.52%에 해당하였고, 지하 뿌리 중에서 상부 뿌리부분이 평균 82.95%, 중앙 뿌리부분이 평균 11.73%, 하부 뿌리부분이 평균 5.32%

Table 4. Shearing strength value by normal stress of *Miscanthus sinensis* samples

	Normal stress (N/cm ²)	Shearing strength (N/cm ²)	Average shearing strength (N/cm ²)
Sample No.	1		1.50
	2	2.90	1.43
	3		1.84
	4		1.45
	5	3.90	1.62
	6		1.47
	7		2.39
	8	6.15	1.87
	9		2.37

에 해당하여, 뿌리의 83%가 지하 10cm이내에 분포함을 일 수 있었다. 이 수치는 수크령에 비해서는 5% 포인트 정도 큰 수치이다. 역새 공시체의 본수, 초장, 수장, 간장, 줄기 직경, 지상부 및 지하부 건중량의 측정결과는 Table 5와 같다.

각 수직응력에 대한 전단강도와 역새의 본수, 초장, 수장, 간장, 줄기 직경, 지상부 및 지하부 건중량의 상관분석을 실시한 결과 특성의 모든 항목에 대하여 전단강도와 상관성이 있다고 할 수

Table 5. Physical properties of *Miscanthus sinensis* samples

Sample No.	Total population	Max size (cm)				Dry weight of above ground part (g)				Dry weight of root (g)			
		Plant height	Ear length	Stem length	Stalk diameter	Leaf	Stem	Propagative organ	Sum	Upper root	Middle root	Lower root	Sum
1	82	160.0	-	-	-	43.47	45.62	-	89.09	75.26	7.34	6.21	88.81
2	89	115.0	19.0	96.0	0.55	42.15	98.50	0.24	140.89	57.07	7.36	4.67	69.10
3	117	212.0	21.0	191.0	0.75	120.08	171.68	3.37	295.13	153.18	23.49	10.79	187.46
4	69	142.0	22.0	120.0	0.55	66.39	41.46	0.51	108.36	64.59	30.05	6.23	100.87
5	99	172.5	22.5	150.0	1.30	60.56	46.97	0.29	107.82	120.85	13.87	8.20	142.92
6	136	197.0	22.0	175.0	0.65	96.17	87.84	3.35	187.36	154.35	8.96	6.97	170.28
7	107	160.0	21.5	138.5	0.60	64.92	47.32	0.89	113.13	111.24	10.58	4.40	126.22
8	57	217.0	31.0	186.0	0.80	59.39	76.05	7.85	143.29	109.34	19.99	7.25	136.58
9	74	216.0	26.5	189.5	0.75	51.39	52.51	3.87	107.77	88.67	6.29	3.51	98.47
Mean	92.22	176.83	23.19	155.75	0.74	67.17	74.22	2.26	143.65	103.84	14.21	6.47	124.52

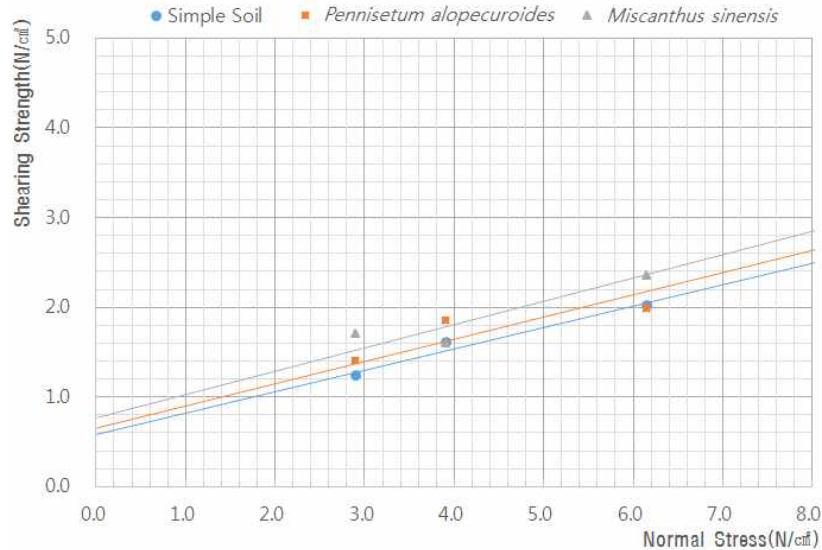


Figure 13. Mohr-Coulomb's Failure Criteria of control soils, *Pennisetum alopecuroides*, and *Miscanthus sinensis* samples

없었다. 다만, 역새 특성간의 상관분석 지하부 상부 건중량은 분수, 잎의 건중량 및 지상부 전체 건중량과 0.05 수준 이상에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 또한 지하부 하부 건중량과 지하부 전체 건중량은 잎의 건중량 및 지상부 전체 건중량과 0.05 수준 이상에서 유의성이 있는 것으로 나타났다.

4. 단순토양, 수크령, 역새 뿌리분 파괴규준 비교

단순토양, 수크령, 역새의 파괴규준을 비교하면, 단순토양의 내부마찰각(ϕ) 값은 12.41° 인 것에 비해 수크령은 13.50° , 역새는 14.04° 로 미미하지만 뿌리가 보강된 공시체의 내부마찰각(ϕ)이 증가한 것으로 분석되었다. 마찬가지로 공시토양의 점착력(c) 값이 0.62 N/cm^2 인 것에 비해 수크령은 0.68 N/cm^2 , 역새는 0.75 N/cm^2 로 증가한 것으로 분석되었다. 공시토양과 식물 뿌리분의 파괴규준 비교 그래프는 Figure 13과 같다.

5. 고찰

사면 안정성을 예측하는 인자 중 대표적인 방

법이 토양의 전단강도를 측정하여 비교하는 것인데, 주로 토양의 결속력을 평가하여 전단 발생 가능성을 검토하는 방법이다. 엄격한 의미에서 주로 사면 붕괴의 예측에 초점을 둔 방법이지만, 본 연구에서는 식물의 뿌리가 분포하는 지표면으로부터 30cm 이내 범위에 한정하여 뿌리에 의한 토양의 결속력 강화 효과 분석에 적용하였다 (Gary and Leiser, 1989).

토양보강효과 분석을 위해 토양 전단강도를 측정할 Lee(2003)의 사질양토 대상 연구에서 갯버들 뿌리의 토양 보강효과 분석에서는 점착력(c) 값이 공시토양 1.71 N/cm^2 와 대비해서 2.68 N/cm^2 로 증가하였고(57% 증가), 내부마찰각(ϕ) 값은 20.81° 에서 38.61° 로 명확히 증가(85% 증가)하였다. 이에 비해 본 실험에서 양질사토에서 수크령 뿌리의 토양 보강효과 분석에서는 점착력(c) 값이 공시토양 0.62 N/cm^2 와 대비해서 0.68 N/cm^2 로, 내부마찰각(ϕ)은 12.41° 에서 13.50° 로 약간씩 증가(각 약 10% 증가)하였다. 한편 역새의 경우 점착력(c) 값은 공시토양 0.62 N/cm^2 대비 0.75 N/cm^2 로(20% 증가), 내부마찰각(ϕ) 값은

12.41°에서 14.04°로(13% 증가) 약간씩 증가하였다. 이는 두 실험의 토양 공시체가 달라 모래성분 함량이 높아 점착력과 내부마찰각이 낮은 차이점 외에도 원뿌리와 뿌리털로 나뉘어 뿌리발달이 왕성한 갯버들에 비해 수염뿌리만 갖는 수크령과 억새의 토양 보강효과가 떨어진 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 수크령과 억새는 갯버들에 비해서는 작지만 토양보강효과가 있는 것이 확인되었다.

하천 제방을 중심으로 식생을 조사하고 선정하였지만, 갈대(*Phragmites communis* Trin.)는 성장 중 실험장의 건조한 토양조건과 맞지 않아 모두 고사하여 토양전단강도를 측정할 수 없었다. 반면에 식물의 생태적 특성으로 볼 때 수크령과 억새는 하천 제방뿐만 아니라 토사 인공비탈면에도 충분히 식재가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 표본수가 적고 실험 대상 토성이 점질 및 미사가 적은 양질사토에 한정되어 토양전단강도 변화가 크지 않은 것으로 나타났으나, 점질 및 미사가 보강된 토양에서는 토양전단강도 효과가 충분히 커질 것으로 예측된다.

IV. 결 론

본 연구는 하천 주변에 흔히 자생하며 전처리 가 되지 않아도 발아율이 우수한 국내자생초본 식물인 수크령, 억새를 이용하여 하천 제방 비탈면녹화를 개선하고 침식 및 붕괴를 방지하기 위한 기초정보를 얻고자 초장, 수장, 간장, 줄기 직경, 지상부 및 지하부 건중량 등 식물 특성을 측정하였고, 단순토양 대비 토양전단강도 변화 효과를 시험하였다. 또한 전단강도와 식물 특성의 관련성을 파악하기 위하여 상관분석을 실시하였다.

식물 특성 측정 결과 수크령의 개체 당 건중량 백분율은 지상부가 평균 52.36%, 지하부가 평균 47.64%로서 지상부와 지하부의 비율이 비슷하였다. 잎이 평균 53.85%, 줄기가 평균 45.76%, 번식

기관이 평균 0.40%에 해당하였고, 10 cm 간격으로 구분하여 측정된 지하 뿌리부분의 건중량 백분율은 상부 뿌리부분이 평균 78.24%, 중앙 뿌리부분이 평균 16.47%, 하부 뿌리부분이 5.29%에 해당하여, 뿌리의 78%가 지하 10 cm 이내에 분포함을 알 수 있었다. 억새의 개체 당 건중량 백분율은 지상부가 평균 52.91%, 지하부가 평균 47.09%로서 수크령과 마찬가지로 지상부와 지하부의 비율이 비슷하였다. 잎이 평균 48.30%, 줄기는 평균 50.18%, 번식기관이 평균 1.52%에 해당하였고, 지하 뿌리 중에서 상부 뿌리부분이 평균 82.95%, 중앙 뿌리부분이 평균 11.73%, 하부 뿌리부분이 평균 5.32%에 해당하여, 뿌리의 83%가 지하 10 cm 이내에 분포함을 알 수 있었다. 이 수치는 수크령에 비해서는 5% 포인트 정도 큰 수치이다.

전단강도 측정 결과 단순토양의 경우 모어-쿨롬의 파괴규준식에 따른 토양의 점착력(c) 값은 0.62 N/cm²이고 내부마찰각(ϕ) 값은 12.41°로 나타났으며, 수크령의 경우 점착력(c) 값은 0.68 N/cm²이고 내부마찰각(ϕ) 값은 13.50°로 나타났고, 억새의 경우 점착력(c) 값은 0.75 N/cm²이고 내부마찰각(ϕ) 값은 14.04°로 나타났다. 종합적으로 단순토양, 수크령, 억새를 대상으로 한 토양전단강도 측정에서 단순토양 < 수크령 < 억새 순으로 억새의 전단강도 값이 가장 크게 나타났다. 따라서 최종적으로 수크령과 억새는 토양전단강도 보강효과가 있으며, 수크령보다는 억새의 보강효과가 더 컸다. 한편, 전단강도와 식물 특성의 상관분석 결과 수크령, 억새의 모든 특성에 대하여 어떠한 상관관계가 있다고 할 수 없었으며, 통계적으로 유의하지 않았다.

본 연구는 토양 조건을 하천 제방에서 많이 나타나는 양질사토 한 가지로 제한하여 실시하였으며, 수직응력 당 3개의 한정된 표본을 대상으로 연구를 실시하였다는 점에서 그 한계가 있다. 따라서 본 연구의 한계를 극복하기 위해서 앞으로의 연구에서는 다양한 토성을 대상으로, 그리고 자주 사용되거나 사용이 기대되는 콩과

식물 등 다양한 식물을 대상으로 하여 식물 뿌리분의 전단강도 측정이 반드시 필요하다. 또한 추가적으로 식물 뿌리분의 뿌리 얽힘 정도에 따른 전단강도 변화 연구가 필요하다. 그리고 전단강도 실험에서 수직응력 당 더 많은 표본을 측정한다면 전단강도와 식물 특성의 상관분석 결과에서 유의성을 확인할 수 있을 것으로 사료되며, 제방 비탈면 침식 및 붕괴를 방지하기 위한 비탈면녹화에 유용한 기술적 정보로 활용될 수 있을 것이다.

References

- Cho, YH · Kim ES · Kang HK and Cheong YM. 2012. A Study on Characteristics of Seed Germination of Native Plants for Revegetation on the Slope of River bank. J. Korean Env. Res. Tech. 15(2): 103-115. (in Korean with English summary)
- Cho, YH and Lee KH. 2014. Germination and Early Growth Characteristics of *Pennisetum alopecuroides*, *Phragmites communis*, and *Miscanthus sinensis* According to the Seeding Methods, J. Korean Env. Res. Tech. 17(1), 163-172. (in Korean with English summary)
- Choi, HS and Lee WH. 2011. Analysis of the Erosion Characteristics with Root Fiber of a Vegetated Levee Revetment. J. Korea Water Resour. Assoc. 44(6): 487-495. (in Korean with English summary)
- Gary DH and Leiser AT. 1989. Biotechnical Slope Protection and Erosion Control, Krieger Publishing Company, pp.10-65.
- Ji, BY · Jung DH · Chun KS and Kim JY. 2006. Pull-out Strength Characteristics of Revegetation Species Root used for Forest Road Slope, J. Korean For. Soc. 95(1): 45-49. (in Korean with English summary)
- Jo, JH and An BW. 1998. An Experimental Study on the Reinforcement and Stabilization of Slope by Vegetation Roots. J. Korean Env. Res. Tech. 1(1): 54-62. (in Korean with English summary)
- Kim, ES. 2012. A Study on Seed Germination Characteristics of a Few Native Plants for Revegetating on the Slope of River Banks. Master Dissertation, Kongju National University. (in Korean with English summary)
- Kim, JH. 2008. Slope Revegetation by Seed Chip Technique Using Native Plant - The Case of Study on Soil and Stone Slope -. Master Dissertation, Sangju University. (in Korean with English summary)
- Kim, NC. 1997. A Study on the Seeding Timing of Several Herbaceous Plants for the Slope Revegetation Works. J. KILA 25(2): 62-72. (in Korean with English summary)
- Kim SG. 1999. Soil Mechanics. Paju: Chung Mun Gak Publishing Co. pp.147-155. (in Korean)
- Kim, TG · Chae SK · Chun SH and Jeong JC. 2012. A Study of Pull-out strength increase by root of grasses, J. Wetlands Research 14(2): 199-210. (in Korean with English summary)
- Lee, CS. 2003. The Shore-margin Protection of the Root of *Salix gracilistyla* by Direct Sticking Cuttings at Wetland. Ph. D. Dissertation, Seoul National University. (in Korean with English summary)
- Lee, KH. 2014. A Study on characteristics of early growth *Pennisetum alopecuroides* · *Phragmites communis* and *Miscanthus sinensis* according to sowing methods. Master Dissertation, Kongju National Un-

- iversity. (in Korean with English summary)
- Ministry of Environment. 2001. A Study on the Vitalization for Greening Method in Cutting Slope of the Ecological Aspects. p.17, pp.29-30. (in Korean)
- Ministry of Environment. 2006. Development of Change Prediction Program of Biological Communities from the River due to the Environmental Damage and Restoration. p.192. (in Korean)
- Norris, J. E. · Greenwood, J. R. 2000. Review of in Situ Shear Tests on Root Reinforced Soil, The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Forms, Function and Physiology. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp.287-293.
- Wu, T. H. · Beal, P. E. · Lan, C. 1998. In-Situ Shear Test of Soil-Root Systems. J. of Geotechnical Engineering, 114(12): 1376-1394.