

소나무의 근계특성이 사면안정화에 미치는 영향

서동준¹ · 김세건² · 김동근^{2*}

¹신록산림, ²경북대학교 생태환경시스템학부 산림환경자원전공

The Effect of *Pinus densiflora* Root System on Stability of Damaged Slopes

Dong-Jun Suh¹, Se-Geon Kim², and Dong-Geun Kim^{2*}

¹Sinlok Cooperative Founderation, Sangju 742-901, Korea

²Department of Forest Resources and Environment, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

ABSTRACT : To analyze the effects of tree roots on the stability of damage slope, distributional and physical properties of five-year *Pinus densiflora* roots were investigated. In the composition of roots, the proportion of main root to lateral root was 1 to 9 in slope condition. Root tensile force was increased in accordance with increased proportion to diameter of *Pinus densiflora* roots. However, tensile strength was decreased in proportion to diameter of roots. Root shear strength showed that soil containing *Pinus densiflora* roots was higher than that of non-treated soils. This result shows that *Pinus densiflora* roots significantly stabilize the surface-soil rather than sub-soil in damage slopes.

Keywords : *Pinus densiflora*, Slope stability, Root tensile force, Root shear stress

서 론

우리나라에서 발생하는 사면의 붕괴현상은 하절기의 장마나 태풍에 동반된 집중호우가 직접적인 주요 원인이며, 강우로 인해 지반에 침투한 빗물은 토양층의 전단응력을 약화시키고, 토괴조직을 흠트림으로써 사면의 붕괴를 초래한다. 이를 방지하기 위해 토양의 전단응력을 보강하는 가장 일반적인 방법은 지표면에 식생을 조성하여 토양내부에 식생의 뿌리를 활착시킴으로써 토양을 고정하는 것이다. 식생의 뿌리가 사면의 안정화에 미치는 영향은 사면의 붕괴를 초래하는 대부분의 장소가 식생이 조성되지 않거나, 훼손된 지역이라는 조사결과에서도 알 수 있다(Lee et al., 1991). 사면에서 붕괴현상이 발생할 경우, 토양의 전단면에 있는 식생의 뿌리는 뿌리 자체가 가지고 있는 인장력으로 토괴조직이 약화되지 않도록 지지하는 전단저항을 발휘함으로써 사면의 붕괴를 억제하게 된다.

그동안 식생의 뿌리가 사면의 안정화에 미치는 영향에 대하여 다양한 방법으로 많은 연구가 이루어져 왔으며, 토양의 물리적 특성과 식생 뿌리에 의한 토양보강효과를 설명하기 위한 모델들도 많이 제시되었다.

사면에서 붕괴가 발생하면 토사와 식생뿌리의 합성체는 파괴에 의해 밀려 나가는 부분과 그대로 남는 부분으로 나뉘게 되고, 전단면상의 토괴를 관통하는 뿌리는 변위가 커질수록 인장응력이 증가하게 되어 전단저항이 높아진다고 하였으며, 특히 뿌리의 면적비가 높을수록 뿌리에 의한 전단강도는 비례하여 증가한다고 하였다. 그리고 사면 안정에 영향을 미치는 뿌리는 대부분 측근으로, 대부분의 뿌리가 지표로부터 1 m 이내에 분포하므로 식생 뿌리의 토양 전단력 보강효과 영역은 1 m 내외의 토양깊이로 보는 것이 합당하다고 하였다. 또한 대부분 표토를 따라 분포하는 뿌리의 특성으로 인해 토양의 강도가 낮을수록, 사면의 파괴 규모가 작을수록, 파괴 깊이가 얕을수록 식생 뿌리의 토양 전

* Corresponding author: (E-mail) dgkim96@knu.ac.kr

※ 이 논문은 2009년도 KNU 학술연구비에 의하여 연구되었음

단응력 보강효과는 커진다고 하였다(Lee et. al., 1991).

수목 근계에 의한 사면 보강효과는 근계자체의 인장력, 토양의 긴박력, 그리고 이들 간의 복합적인 작용에 의해 사면 안정을 유지하고 있으며, 직경 10 mm 이상의 뿌리를 직경급별로 인장력을 비교해 보았을 때 전단저항력이 인장저항력보다 약간 큰 값으로 나타나 인장과 전단에 대한 외력이 뿌리에 복합적으로 작용했을 경우, 뿌리는 전단에 의한 파괴보다 인장에 의한 파괴가 먼저 발생한다고 가정할 수 있다고 하였다(Cha et. al., 2002). 그리고 뿌리의 인장력은 동일재료의 경우 일정한 값을 유지하는 것이 일반적이지만, 뿌리의 경우 직경이 큰 것보다 직경이 작을수록 단위당 인장력의 증가폭은 더 크다고 하였다. 이는 뿌리의 경우 새로운 조직일수록 인장에 대한 저항력이 더 강하다는 의미라고 하였다.

또한 벌채 이후에 토양 내에 잔존하는 뿌리의 강도에 관한 연구에서는 2년 경과 후 모든 수종에 있어서 세근의 강도저하가 빠르게 진행되고, 10년이 경과하면 주근의 강도도 대부분 저하되는 것으로 나타났다(Zimmer and Swanston, 1977; Zimmer, 1981). 이러한 결과는 일반적으로 토괴의 전단면에 저항하는 힘으로 작용하여 전단강도를 증가시키는 식생의 뿌리의 역할은 주근에 의한 말뚝효과와 측근에 의한 그물효과로 설명할 수 있다. 그리고 초본과 목본 모두 뿌리에 의한 토양보강효과가 있으나 목본의 경우가 더욱 큰 효과를 발휘하는 것으로 보고되었다(Waldron and Dakessian, 1982; Waldron et. al., 1983).

이 연구에서는 이러한 토양의 물리적 특성과 식생 뿌리에 의한 토양보강효과 연구방법을 토대로 훼손 사면에 식재되는 대표수종인 소나무를 대상으로 뿌리의 형태적, 물리적

특성을 분석하고, 뿌리의 인장력과 토양의 전단강도를 특성별로 비교·분석함으로써 소나무 뿌리의 사면 안정 보강효과에 대하여 구체적으로 규명하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

이 연구에 공시재료로 소나무(*Pinus densiflora S. et Z.*)를 사용하였다. 소나무는 한반도 전역에 자생하는 교목성 목본식물로서 척박한 환경에서도 생존이 가능한 선구식물이다. 공시재료는 2005년 경북대학교 상주캠퍼스 내의 훼손사면에 4 m×4 m의 시험구를 설치하고, 식생자루를 이용한 훼손지 녹화 방법으로 파종된 5년생 소나무 5본을 대상으로 2010년 9월에 Fig. 1과 같이 표본 추출하였다.

2. 연구방법

뿌리의 생육에 직접 영향을 주어 근계 구조를 결정하는 토양의 물리적 특성을 파악하기 위해 연구대상지를 세 곳으로 나누어 각각 20 cm 깊이로 토양 시료를 채취하고, 채취한 시료의 토양입경분포실험을 시행하였다. 실험은 한국표준규격에 제시된 토양의 입도분석시험법(KSF2302)에 따라 No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 번체를 사용하여 각 체에 남은 토양 시료의 중량비로서 각 체의 통과 백분율을 구한 후, 입경 가격 곡선을 그려 삼각좌표법에 의해 토성과 균등계수(Cu), 곡률계수(Cg)를 산출한 후에 통일 분류법(USCS)으로 토질을 분류하였다.

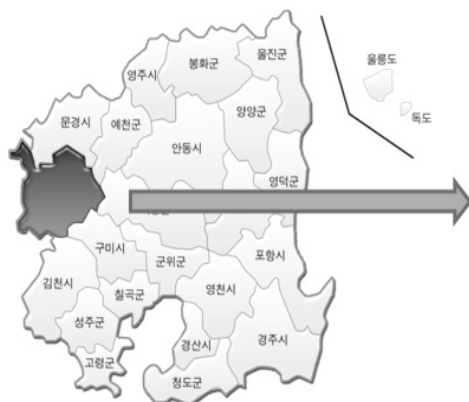


Fig. 1. Research site in Kyungbuk National University (Sangju campus)

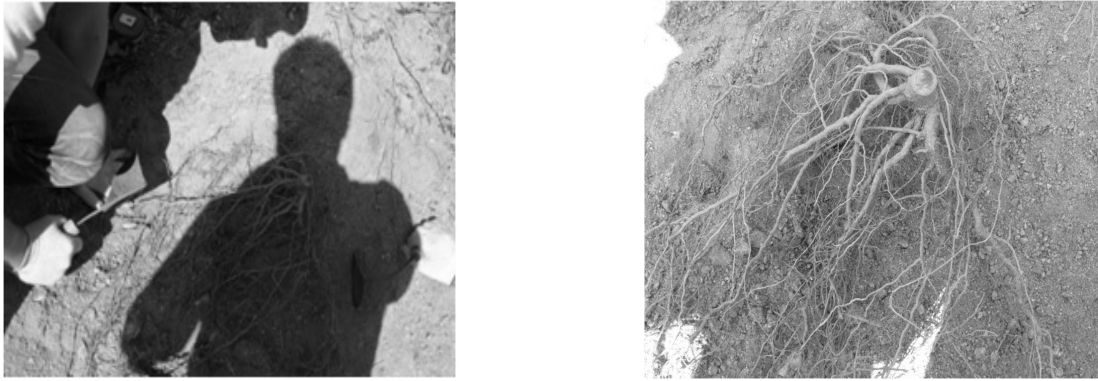


Fig. 2. Root system property of *Pinus densiflora* in damage slopes

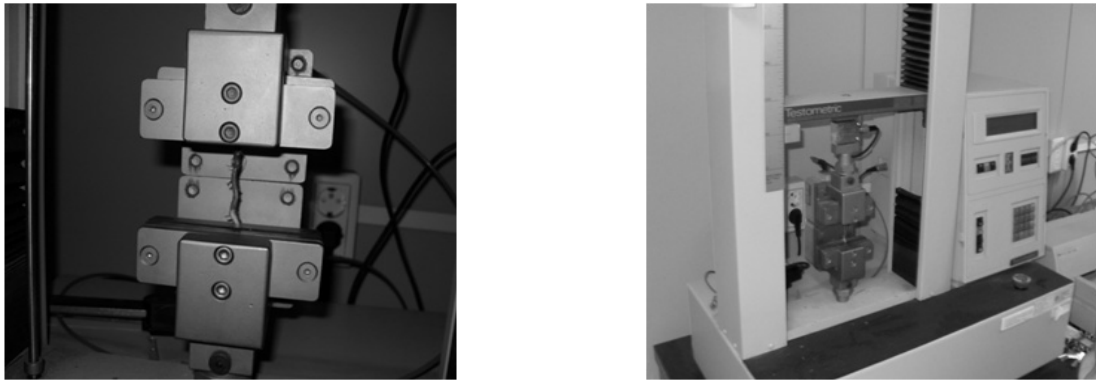


Fig. 3. Tensile strength measurement of *Pinus densiflora* in damage slopes

(1) 근계구조 분석

소나무 뿌리의 근계구조 특성에 대한 분석은 시험구내의 소나무를 표본추출법으로 5본의 표본목을 선발하고, 선발된 소나무의 뿌리구조를 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 소나무 근원부에서부터 토양을 제거하여 주근과 측근을 현장에서 직접 조사하였으며, 실험실에서 근계부는 주근부와 측근부로 나누어 무게와 길이를 조사하고, 뿌리의 직경별 분포를 조사하였다. 이를 통하여 소나무의 근계구조 및 근계의 직경별 분포를 조사하여 소나무의 근계특성을 분석하였다. 또한 지상부는 1년생 가지 부분과 나머지 부분으로 분리하여 각각의 무게를 조사하고, 이를 통하여 지상부와 지하부의 생육관계를 분석하였다.

(2) 인장력 분석

소나무의 인장력 특성은 표본목에서 추출한 근계의 직경별 시료를 이용하여 5반복 시험하였으며, 인장력을 측정하기 위하여 섬유인장력측정기(Testometric, 일본)을 사용하여 뿌리자체의 하중을 가한 후 인장파괴까지의 힘과 변형율을

측정하였다. 인장시험은 Fig. 3과 같이 시료의 양단을 시험기의 그립에 고정하고, 시료의 외부변형을 최소화하여 시험하였으며, 시험 시 인장속도는 10 mm/min으로 인장력을 측정하였다.

(3) 전단강도 분석

소나무 뿌리의 전단강도 특성은 시험구 내의 표본목을 선발하여 선발된 표본목의 근원부에서 5 cm 떨어진 거리에서 내경 4.8 cm 길이 30 cm의 쇠파일을 이용하여 직경 4.8 cm, 길이 15 cm의 강도측정시료를 채취하였고, 대조구로는 식물이 생육하지 않는 시험구 주변의 토양에서 강도측정시료를 같은 방법으로 채취하였다.

채취된 시료를 삼축압축강도시험기(한국)에 시료가 손상되지 않게 설치하였다. 삼축압축강도 시험기는 시료의 양측면에 압력을 줌으로써 자연사면 상태와 유사한 조건을 조성하여 전단강도를 측정할 수 있도록 고안한 장비로서 Fig. 4와 같이 일반토양과 뿌리를 내재한 토양이 가지는 전단력을 3반복 실험하여 측정하였다.

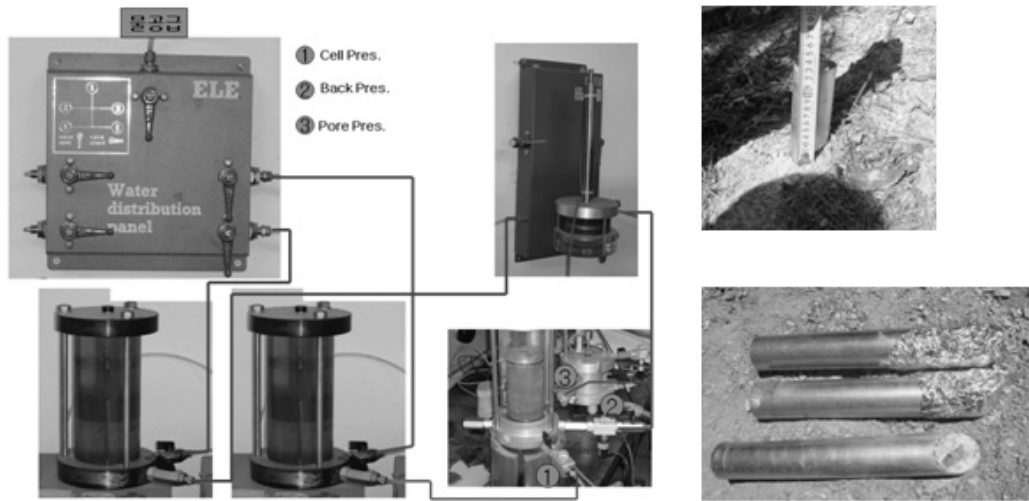


Fig. 4. Shear stress measurement of *Pinus densiflora* in damage slopes

Table 1. Soil particle distribution by screen

| Analysis of screen | | | | | | |
|--------------------|-----------|------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| No. | Size (mm) | Weight (g) | Amount of remain (g) | Rate of remain (%) | Accumulation rate of remain (%) | Accumulation rate of passage (%) |
| 4 | 4.76 | 531.04 | 69.09 | 11.95 | 11.95 | 88.05 |
| 10 | 2.00 | 479.06 | 153.35 | 26.52 | 38.46 | 61.54 |
| 20 | 0.84 | 436.27 | 184.83 | 31.96 | 70.42 | 29.58 |
| 40 | 0.42 | 376.36 | 79.52 | 13.75 | 84.17 | 15.83 |
| 60 | 0.25 | 372.96 | 36.97 | 6.39 | 90.56 | 9.44 |
| 100 | 0.15 | 360.09 | 24.21 | 4.19 | 94.75 | 5.25 |
| 200 | 0.07 | 342.83 | 18.29 | 3.16 | 97.91 | 2.09 |

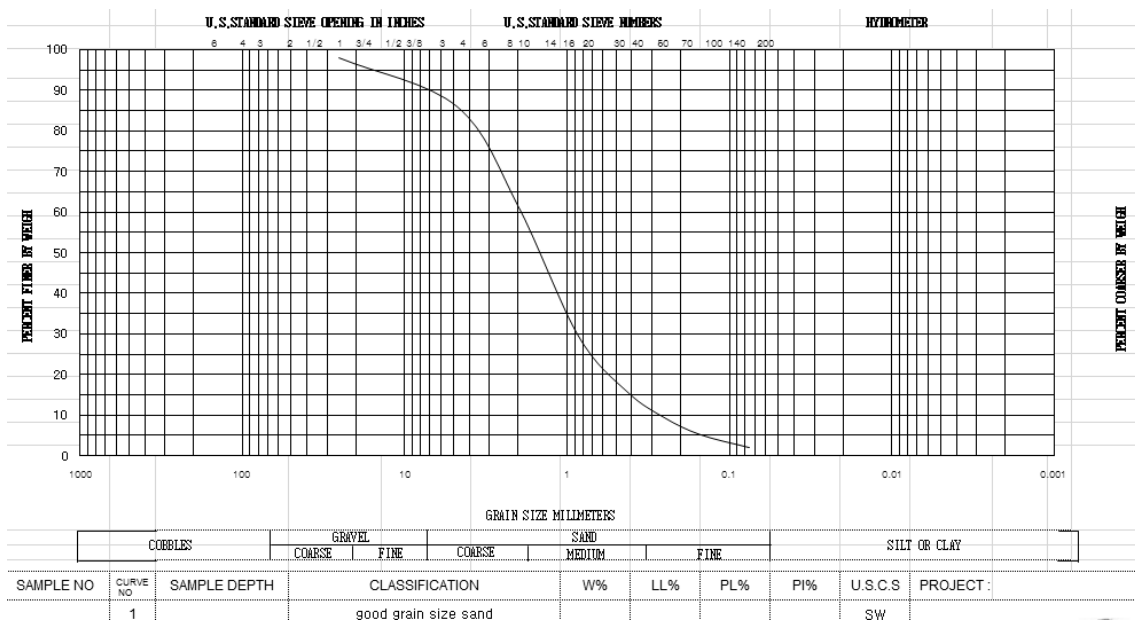


Fig. 5. Soil particle distribution

또한, 삼축압축강도 시험결과를 토대로 SLOPE/W 프로그램을 이용하여 정적하중과 지진하중의 사면안정성을 비교 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 연구대상지의 토양 특성

연구대상지의 토질을 분류한 결과, 토층에 상관없이 모두 사질토로 분류되었으며, 조사 당시의 토양 함수비는 약 7% 정도였다. 그리고 균등계수(Cu)는 7.17로 나타났으며, 곡률계수(Cg)는 1.43으로 양호한 결과를 얻었다. 통일 분류법(USCS)에 따라 분류한 토질은 SW로 나타났으며, 여기서 S는 모래(Sand)를 의미하고, W는 입도 분포가 좋다(Well graded)는 것을 의미한다(Table 1, Fig. 5).

2. 소나무 뿌리의 근계구조 특성

시험구 내의 소나무는 평균 수고가 약 1 m 정도이고 근원경은 약 25 cm 정도로 사면에 안정적으로 활착하고 있다(Table 2). 평균적으로 1년 가지와 1년 이상의 가지 비율이 1 : 1 정도로서 외형적으로 생육이 매우 양호한 상태인 것으로 나타났다. 또한 지하부의 경우에는 주근과 측근의 비율이 약 1 : 9 정도로 측근의 발달이 양호하며, T/R율이 7.3 정도로 지상부의 생육이 지하부의 생육에 비하여 높은 것으로 나타났다. 이러한 소나무의 지하근계의 구성은 전체무게 296 g 중 무게비율로 직경이 4-5 cm인 뿌리가 약 24%이며, 7-6 cm의 뿌리가 19%, 1-2 cm의 뿌리가 13% 정도로 구성되어 있는 것으로 나타났다(Table 3). 전체적으로 소나무의 뿌리는 토양 내 15 cm 이내에서 만 존재하며, 대부분의 뿌리가 토심 10 cm에서 지표면과 수평을 이루면서 중력 방향으로 존재하는 것으로 나타났다. 이는 선행연구에서 모든 뿌리는 토층 10-20 cm 내에서 가장 많이 존재하고, 뿌리

의 체적도 10-20 cm의 토층구간에 가장 많이 분포한다고 하였으며(Cha et. al., 2002), 또한 신장한계 부근으로 갈수록 뿌리의 분수는 약간의 증가 경향을 나타내는데, 이는 신장한계부근의 토양 경도를 가진 토층을 만나면 뿌리는 사면 방향으로 신장하게 되는 경향을 보인다고 발표한 연구보고 내용과 일치한다(塚本良則, 1986). 이 연구에서 훼손사면 내에서 생육하는 소나무는 경사면의 경사도 보다는 경사면 내의 토양의 경도에 따라 근계의 발달되는 토심이 결정되는 것으로 판단된다. 또한 뿌리의 생장은 산소결핍과 수분부족 등의 물리적 구조에 따라 답압 토양에서는 생육은 제한 받는다고 하였다(Theodore. et. al., 1979). 특히 경도가 높은 토양에서는 직근의 생장이 제한된다고 하였다. 일반적으로 뿌리의 신장과 토양의 매질간에 밀접한 관계가 있으며, 이는 뿌리의 신장력에 따라 결정된다고 하였다(Yoav and Uzi, 1991). 이는 본 연구에서와 같은 훼손된 사면환경에서는 소나무의 근계발달이 제한받게 되고 이러한 영향으로 T/R율이 다소 높게 나온 것으로 판단된다. 향후 소나무를 이용한 훼손지 복원에 있어서 소나무 근계발달에 필요한 유효 토심의 확보가 소나무를 이용한 사면안정화에 영향을 미칠 것으

Table 3. Root structure of *Pinus densiflora* in slopes

| Sample | Weight (g) | Structure rates (%) |
|----------|------------|---------------------|
| 0.1-1cm | 29 | 9.8 |
| 1-2cm | 40 | 13.5 |
| 2-3cm | 33 | 11.1 |
| 3-4cm | 39 | 13.2 |
| 4-5cm | 71 | 24.0 |
| 5-6cm | 24 | 8.1 |
| 6-7cm | 58 | 19.6 |
| Over 8cm | 2 | 0.8 |

Table 2. Tree and root structure of *Pinus densiflora* in slopes

| Sample | Hight (cm) | Diameter (cm) | Tree (kg) | | | Root (kg) | | | T/R |
|--------|------------|---------------|-----------|-------------|-------|-----------|---------|-------|------|
| | | | 1year | over 2years | total | main | lateral | total | |
| 1 | 100.2 | 23.9 | 0.55 | 0.56 | 1.01 | 0.01 | 0.14 | 0.15 | 6.73 |
| 2 | 85.3 | 22.7 | 0.40 | 0.33 | 0.73 | 0.01 | 0.09 | 0.10 | 7.30 |
| 3 | 139.4 | 38.2 | 1.19 | 1.15 | 2.34 | 0.03 | 0.26 | 0.29 | 8.07 |

로 판단되며, 이를 위한 사면 내 소나무의 생육을 위한 유효 토심에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 소나무 뿌리의 인장력 특성

시험구 내에서 채취한 소나무 뿌리의 직경별 인장력은 직경이 증가할수록 인장강도가 증가한 다는 것을 알 수 있었다(Fig. 6). 소나무 뿌리의 강도는 근경이 커질수록 비례하여 증가하며, 근경과 인장력의 상관계수는 0.92 정도로 나타났다. 일반적으로 산악지역의 봉락에는 수목의 뿌리가 지표고정의 직접적인 원인이며, 수목근계에 의한 사면 보강 효과는 근계자체의 인장력, 토양의 긴박력 그리고 이들간의 복합적인 작용에 의하여 사면안정을 유지하고 있다고 하였다(Cha et. al., 2002). 또한 산화적지의 소나무에서는 생립 목과 산화 후 2-4년이 경과된 소나무의 경우에도 뿌리의 인장력에 있어서는 직경이 증가할 수록 인장력은 직경의 누승 배로 증가하며, 이는 직경이 증가함에 따라 단면적, 즉 힘을 받는 면적이 누승배로 커지면서 영향을 받기 때문이라고 하였다(Cha et. al., 2008) 또한 실험하는 뿌리의 부위에 따른 옹이, 수지 등이 존재하기 때문에 인장력은 다르게 나타날 확률이 높으며(Mohsenim, 1970), 이는 토양의 깊이가 깊어 질수록 토압에 의한 토양밀도의 증가로 뿌리의 생장이 직선적이지 못하고 불규칙한 형태로 자란다는 것을 가정해 볼 때, 불규칙한 뿌리는 인장력을 받을때 구부러진 부분에 응력이 집중되어 다른 직선적인 뿌리재료에 비해 그 저항력이 약할 수 있다고 하였다(Ji et. al., 2004). 이 실험에서도 이러한 영향으로 표본당의 오차가 존재하였으나 평균적으로 뿌리의 직경과 인장력간에는 비례관계가 있는 것을 확인할 수 있었다.

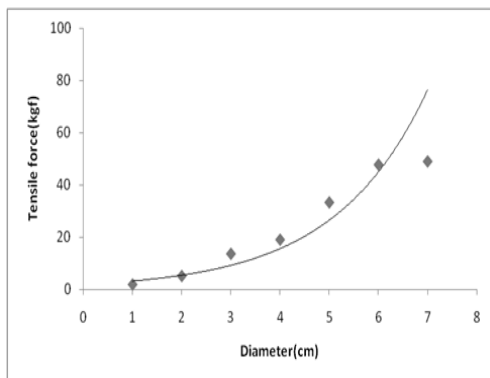


Fig. 6. Root tensile force of *Pinus densiflora* by mean diameter in slopes

그러나 소나무 뿌리의 단위면적당 인장강도는 근경이 커질수록 반비례하며 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 근경의 단위면적당 인장강도의 상관계수는 0.71 정도로 나타났으며, 이는 뿌리의 경우 직경이 크면서 오래된 조직보다는 직경이 작으면서 새로운 조직의 인장에 대한 저항력이 크다는 것을 나타낸다. 기존의 연구에서도 인장강도는 같은 재료의 특성상 일정한 값을 유지하는 것이 일반적이지만, 뿌리의 경우에는 직경이 큰 것보다는 작을수록 인장강도는 더 증가한다고 하였으며, 이는 목질과 같이 세포로 이루어진 재료는 수분함량과 조직의 상태에 따라 그 강도 특성이 다르게 나타난다고 하였다(Cha et. al., 2008). 또한 연성재료인 수목뿌리의 경우 나이테, 수피 및 수지 등이 혼합되어 있어 강도에 대한 변이가 상당히 큰 것으로 보였고, 이는 셀룰로오스와 리그닌의 조성이 다른 새로운 세포조직은 인장력에 대한 저항력이 더 강하다는 것을 의미 하였다(Ji et. al., 2004). 이를 통하여 이 실험에서는 훼손지 사면내의 소나무는 연령이 증가할수록 사면 보강력이 증가하며, 단위면적당 보강력을 강화하기 위해서는 측근의 발달을 통한 새로운 근계조직의 발달이 중요한 것으로 판단된다.

4. 소나무 뿌리의 전단강도 특성

삼축압축강도 시험기를 이용한 전단력의 실험을 통하여 소나무 뿌리의 보강력이 작용하지 않는 무처리구의 경우 내부마찰각이 20°이며, 전단강도는 측압이 3.0 kg/cm² 일 때 3.2 kg/cm²로 나타났고, 소나무 뿌리에 의한 보강력이 작용하는 처리구의 경우 내부마찰각이 23°이며, 전단강도는 측압이 3.0 kg/cm² 일 때 3.9 kg/cm²로 나타났다(Fig. 8, 9). 전반적으로 토양깊이가 증가할수록 잣나무 뿌리의 인장저

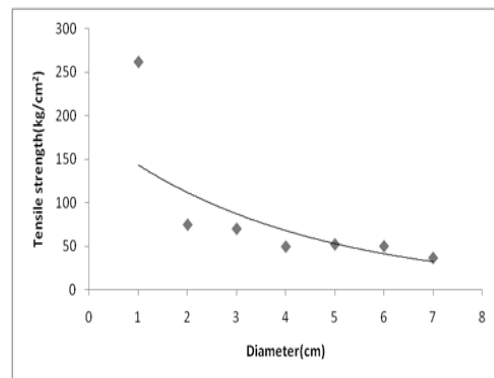


Fig. 7. Root tensile strength of *Pinus densiflora* by mean diameter in slopes

항력이 감소하는 것으로 나타나 뿌리에 의한 토양고정효과는 심층보다는 표층에서 큰 것으로 나타났으며, 이로 인해 인장저항력이 감소하는 30 cm 이하에서 토양붕괴의 발생 가능성이 높았다(Ji et. al., 2004). 소나무 뿌리의 경우 동일 사면에서 안정성에 영향을 줄 것으로 판단되는 10 mm 직경의 뿌리를 이용한 전단저항력과 인장저항력간의 비교에서 전단저항력이 약간 더 큰 값을 나타내고, 이를 통하여 사면의 토괴내에서 인장과 전단에 대한 외력이 뿌리에 복합적으로 작용했을 경우 뿌리는 전단에 의한 파괴보다 인장에 의한 파괴가 먼저 발생한다고 가정할 수 있다(Cha et. al., 2002). 실제로 사면파괴면을 살펴보면 뿌리는 대체적으로 파괴면과 옆면 윗부분에서 지표면에 거의 수평하게 나온 상태에서 끊어져 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 지표면에 수평으로 발달한 뿌리에 의해 사면파괴 시 보강효과가 유발된 단적인 예라고 할 수 있으며, 전단면에 분포하는 뿌리를 중

심으로 전단영역은 거의 10 cm 안팎이었다(Lee et. al., 1991). 이 실험에서도 근원부에서 5 cm 정도 떨어진 곳에서 표본을 채취하여 근계가 발달되지 않은 토괴와 전단력을 비교한 결과 소나무 뿌리가 토괴에 대한 전단에 있어서 보강효과가 있는 것으로 판단된다.

5. 정적하중에 의한 사면안정 해석

일반 절취사면에서 발생하는 표면파괴를 방지하기 위한 소나무 식생공법이 사면의 안정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 SLOPE/W 프로그램을 이용한 사면안정해석을 수행하였다.

소나무 식생 전 사면의 역학적 특성은 비교란 시료의 삼축압축시험을 통하여 내부마찰각 20°, 점착력 1 t/m²을 적용하였으며, 식생 후에는 내부마찰각 26°, 점착력 1 t/m²을

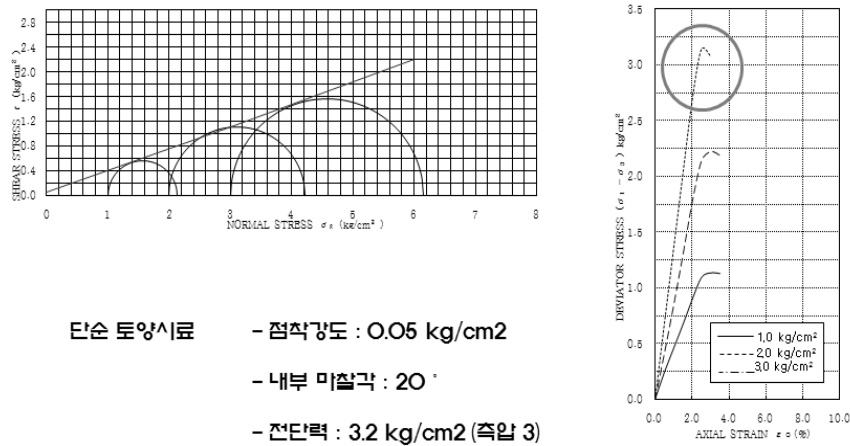


Fig. 8. Root shear stress of non-treatment slopes

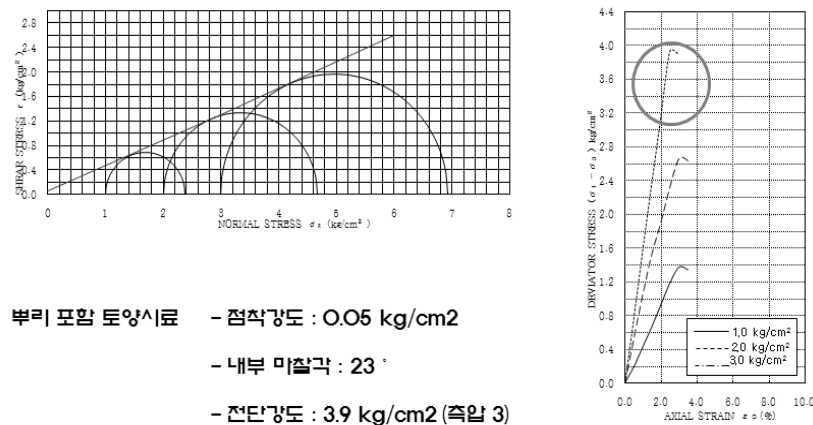


Fig. 9. Root shear stress of Pinus diensiflora treatment slopes

Table 4. The rate of slope stabilization

| Treatment | Ordinary | Janbu method | Bishop method | Average |
|-----------------|----------|--------------|---------------|---------|
| Non- vegetation | 1.128 | 1.121 | 1.143 | 1.131 |
| Re-vegetation | 1.351 | 1.344 | 1.373 | 1.356 |

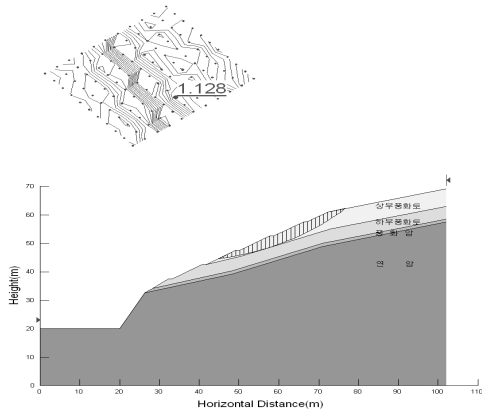


Fig. 10. The results of slope stabilization by non-vegetation (Ordinary)

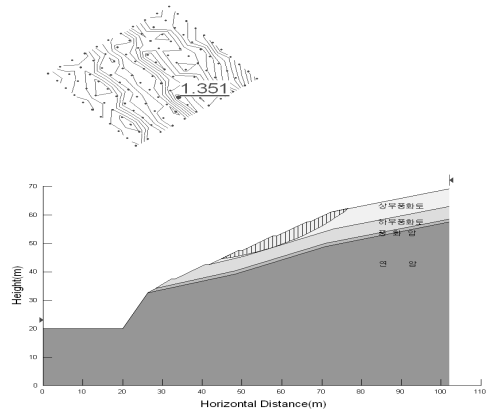


Fig. 13. The result of slope stabilization by revegetation (Ordinary)

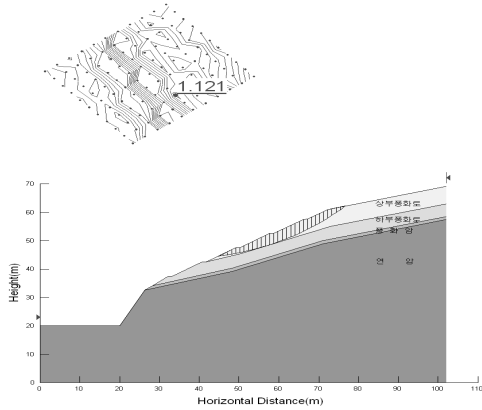


Fig. 11. The results of slope stabilization by non-vegetation (Janbu method)

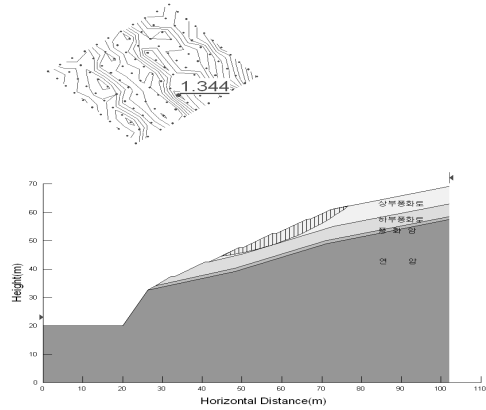


Fig. 14. The result of slope stabilization by revegetation (Janbu method)

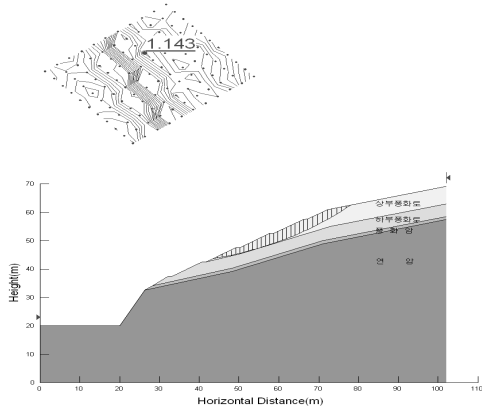


Fig. 12. The results of slope stabilization by non-vegetation (Bishop method)

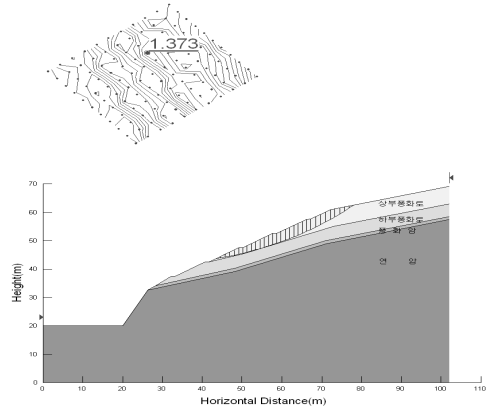


Fig. 15. The result of slope stabilization by revegetation (Bishop method)

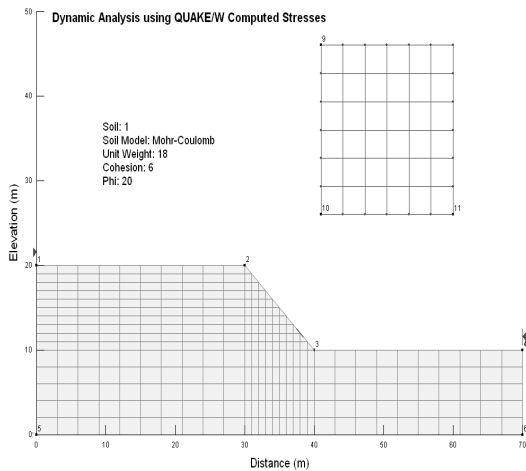


Fig. 16. Cross section diagram of slope stabilization by the seismic load

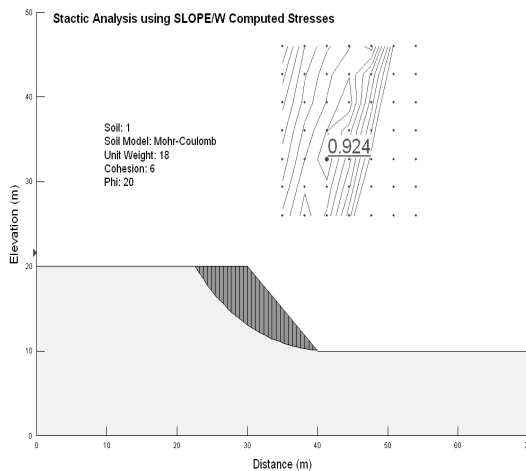


Fig. 17. Interpretation of slope stabilization by finite elements method in non-vegetation

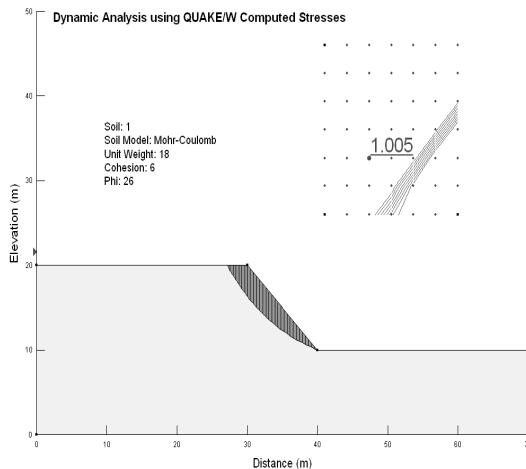


Fig. 18. Interpretation of slope stabilization by finite elements method in revegetation

적용하였다. 이는 지반의 상태를 다소 불리하게 적용한 것으로 소나무 식생 전과 후의 사면의 안전율을 비교 검토하기 위한 것이다. 해석결과, 소나무 식생 전 사면의 안전율은 1.128로 나타났으며 식생 후 안전율은 1.351로 증가하였다(Table 4).

또한 Fig. 10~15 에서와 같이 식생 전에 비해 식생 후 사면안전율이 평균 0.225 증가하는 것으로 나타났다.

6. 지진하중에 의한 사면안정해석

사면에 지진하중이 작용하는 경우를 가정하여 식생이 사면의 안정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사면안정 해석을 수행한 결과는 다음과 같다. Fig. 16은 유한요소 해석을 수행하기 위한 단면을 나타낸 그림이며, Fig. 17, 18과 같이 소나무 식생 후 안전율은 식생 전에 비해 약 0.08정도 증가하는 것으로 나타났다.

이상과 같이 소나무 식생 후 토양이 식생 전 토양에 비해 사면의 안전율이 평균 0.225 증가하였으며, 지진하중 작용시에도 안전율이 0.08 정도 증가하는 것으로 나타나 소나무 뿌리가 사면의 안전을 증진시키는데 효과가 있음을 구체적으로 알 수 있다.

결론

사면 복구에 사용되는 임목 중, 소나무 근계가 사면의 안정화에 기여하는 효과를 분석하기 위하여 훼손사면에 종자칩 녹화공법으로 파종된 5년생 소나무의 근계특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 소나무 근계의 구조적 특성을 분석한 결과, 사면 내 소나무의 근계형태는 주근의 길이와 비율이 낮고 측근의 비율이 1 : 9정도로 높은 것으로 나타났다.
2. 또한 뿌리의 인장 특성은 근경이 작으면 전체 인장력은 낮지만 단위면적당의 인장강도는 강한 것으로 나타나, 근경이 작지만 구성비가 월등히 높은 측근의 토양 보강 효과가 높았다.
3. 삼축압축강도시험기를 이용한 토양의 전단강도는 소나무 뿌리를 포함한 토양이 식생 전 토양에 비해 7 kg/cm^2 정도 높은 것으로 나타났고, 이는 소나무의 근계가 사면의 전단강도에 대해 보강 인자로 작용하는 것으로 입증되었다.

4. 소나무 식재 후 토양은 식재 전 토양에 비해 사면의 안전율이 평균 0.225 증가하였으며, 지진하중 작용 시에도 안전율이 0.08 정도 증가 하는 것으로 나타나 소나무 근계가 사면의 안정성을 증진시키는데 효과가 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 볼 때, 훼손사면의 안정을 위하여 소나무를 도입하는 것은 토양에 대한 근계의 전단강도 보강에 유리한 것으로 판단되었으며, 근계발달에 있어서 성장초기의 유근발달로 근계가 가지는 인장력 효과와 사면의 토양특성에 따른 근계발달의 형태를 고려할 때 파종방식의 소나무 도입이 더욱 유리할 것으로 판단된다.

또한, 향후 사면안정에 적합한 수종과 녹화방법, 그리고 적정 식재수량을 규명하기 위해 목본근계에 의한 토양의 전단강도 보강효과를 수종별, 토양 특성별로 구분한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

인용문헌

- Lee, I.M., S.G. Sung and Lim, C.M. 1991. An experimental study on the effect of vegetation roots on slope stability of hillside slopes. *International Journal of Geo-engineering* 7(2):51-66.
- Ji, B.Y., D.H. Jung, K.S. Chun and Kim, J.Y. 2006. Pull-out strength characteristics of revegetation species root used for forest road slope. *Journal of Korean Forest Society* 95(1): 45-49.
- Cha, D.S., J.H. Oh, B.Y. Ji and Chun, K.W. 2002. A study on slope stability effects by the tree root systems (1) - spatial distribution and physical properties of Red Pine tree roots. *Journal of Korean Forest Society* 91(1):71-78.
- Cha, D.S., J.H. Oh and Lee, J.S. 2008. Tensile strength changes of *Pinus densiflora* root in forest fire damaged area. *Journal of Korean Forest Society* 97(4):392-397.
- Korea Industry Standard. 2002. Test method of grain size (KS F 2302). 10.
- 塚本良則. 1987. 樹木根系の崩壊抑止効果に關する 研究. 東京農工大學 農學部 演習林 報告 23:65-123.
- Mohsenin, N.N. 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publisher, 742 pp.
- Theodroe, W.D., John, A.H., and Frederick, S.B., 1979. Principles of Silviculture. Second edition McGraw-Hill Book Co, 500 pp.
- Waldron, L.J. and Dakensian, S. 1982. Effect of grass legume, and tree roots on soil shearing resistance. *Soil Science Society of America Journal* 46:894-899.
- Waldron, L.J., S. Dakessian and Nemson, J.A. 1983. Shear resistance enhancement of 1.22 meter diameter soil cross section pine and alfalfa Roots. *Soil Science Society of America Journal* 49: 9-14.
- Yoav, W.A.E. and Uzi K. 1991. Plant Root. The hidden half. Marcel Dekker inc., 921pp.
- Zimmer, R.R. and D.N. Swanson. 1997. Root strength changes after logging in southeast Alaska. USDA Forest Service Research Note, PNW-306:1-10.
- Zimmer, R.R. 1981. Roots and stability of forested slopes erosion and sediment transport in Pacific Rim steepplands. *International Association of Hydrological Science* 132:343-361.

(Received December 12, 2010, Accepted December 28, 2010)