

## 뿌리의 공간분포를 고려한 수목 뿌리의 토양보강 효과에 대한 분석\*

김동엽<sup>1)</sup> · 이상호<sup>1),2)</sup> · 임상준<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 산림과학부 · <sup>2)</sup> 특수법인 사방협회

### Analysis of the Effect of Tree Roots on Soil Reinforcement Considering Its Spatial Distribution\*

**Kim, Dongyeob<sup>1)</sup> · Lee, Sang Ho<sup>1),2)</sup> and Im, Sangjun<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup> Department of Forest Sciences, Seoul National University,

<sup>2)</sup> Special Cooperation Korean Association of Soil and Water Conservation.

#### ABSTRACT

Tree roots can enhance soil shear strength and slope stability. However, there has been a limited study about root reinforcement of major tree species in Korea because of some experimental difficulties. Thus, this study was conducted to analyze the performance of Japanese larch (*Larix kaempferi*) and Korean pine (*Pinus koraiensis*) which are two common plantation species in Korea. Profile wall method was used to measure the spatial distribution of root system and its diameter within 15 soil walls of Japanese larch stand and 13 soil walls of Korean pine stand in Taehwa University Forest, Seoul National University, Korea. Root tensile properties of each species were assessed in the laboratory, and root reinforcements were estimated by Wu model. The study observed that the number and cross-sectional area (CSA) of root in both species could tend to decrease with soil depth. Especially, CSA were well-fitted to exponential functions of soil depth. Mean root area ratios (RAR) were 0.03% and 0.10% for Japanese larch and Korean pine, respectively. Estimated root reinforcement from Wu

---

\* 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(KRF-2008-313-D01354).

**First author** : Kim, Dongyeob, Dept. of Forest Sciences, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea,

Tel : +82-2-880-4768, E-mail : hendrix7@snu.ac.kr

**Corresponding author** : Im, Sangjun, Dept. of Forest Sciences, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea,

Tel : +82-2-880-4759, E-mail : junie@snu.ac.kr

**Received** : 27 May, 2011. **Revised** : 25 July, 2011. **Accepted** : 8 August, 2011.

model were, on the average, 4.04 kPa for Japanese larch and 12.26 kPa for Korean pine. Overall, it was concluded that root reinforcement increased the factor of safety (Fs) of slope for small-scale landslide as the result of two-dimensional (2-D) infinite slope stability analysis considering vegetation effects.

Key Words : *Root reinforcement, Root distribution, Root cohesion, Wu model, RAR*

## I. 서 론

수목의 뿌리는 지상부를 지지하고 양분과 물을 흡수하는 기능 이외에도 토양 침식이나 사면 붕괴를 방지하는 기능을 가지고 있다(Abe and Ziemer, 1991; Gray and Sotir, 1996). 특히, 우리나라와 같이 산지사면의 토심이 얇고, 표토층에서 산사태가 많이 발생하는 지역(이상희, 2005; 마호섭 · 정원옥, 2007; 박종민 등, 2010)에서는 수목 뿌리에 의한 토양보강 효과가 더욱 뚜렷하게 나타난다(Roering et al., 2003). 수목 뿌리에 의한 사면보강 효과, 즉 뿌리보강 효과는 뿌리의 인장저항에 의해 토양의 전단저항력이 증가되는 것을 말한다. 뿌리에 의해 증가된 전단저항력은 일반적으로 토양이 가지고 있는 고유의 점착력(soil cohesion)과 비교하여 뿌리 점착력(root cohesion)이라고 한다(Norris et al., 2008).

뿌리에 의한 토양보강 효과는 식생의 종류에 따라 다르다. 이는 식생종에 따라 뿌리의 토양층 내 공간적 분포(Schmid and Kazda, 2005; Reubens et al., 2007; Achat et al., 2008)와 뿌리의 저항력(Ziemer and Swanston, 1977; Gray and Sotir, 1996)이 서로 다르기 때문이다. 그러므로 뿌리보강 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 먼저 수종별 뿌리의 공간분포와 역학적 성질에 관한 조사가 선행되어야 한다. 하지만, 현장에서 뿌리의 특성을 조사하는 것은 쉬운 일이 아니다. 그 이유는 뿌리 조사를 위해서는 토양층의 교란과 뿌리의 파괴가 뒤따르는 한편, 같은 수종이라 할지라도 기후, 토양 등의 주변 환경에 따라 뿌리의 공간적 분포가 달라지고, 공학적 특성치가 다

르기 때문이다(Pollen and Simon, 2005; Schwarz et al., 2010).

이에 따라 뿌리의 인장강도 등과 같이 비교적 측정이 용이한 역학변수를 이용하여 뿌리보강 효과를 간접적으로 추정하는 뿌리보강모형에 관한 연구가 많이 진행되어왔다(Waldron, 1977; Wu et al., 1979; Gray and Ohashi, 1983; Maher and Gray, 1990; Shewbridge and Sitar, 1990; Abe and Ziemer, 1991; Pollen and Simon, 2005). Wu 모형(Wu et al., 1979)은 토양 전단면에 수직으로 위치한 뿌리의 역학적 평형관계를 이용하여 뿌리보강 효과를 추정하는 개념적 모형이다. Wu 모형은 토양의 전단 파괴 시에 전단파괴면에 위치하는 모든 뿌리가 동시에 끊어지는 것으로 가정하기 때문에 뿌리의 효과를 과대하게 평가하는 경향(Pollen and Simon, 2005)이 있지만, 개념적으로 간단하고 비교적 현장 적용이 쉽기 때문에 현재 까지도 많이 이용되고 있다(Gray and Sotir, 1996; Wu, 2007). 최근에는 감소율(reduction factor) 개념을 적용하여 Wu 모형의 현장 적용성을 개선하는 연구도 진행되고 있다(De Baets et al., 2008; Bischetti et al., 2009).

국내에서는 잣나무(조주형 · 이종성, 2000; 차두송 · 지병윤, 2003), 소나무(차두송 등, 2002), 밤나무(이인모 등, 1991) 등의 교목과 일부 관목(조주형 · 안봉원, 1998)의 뿌리보강 효과에 대한 연구가 진행되었다. 또한, 뿌리 인장강도 특성(지병윤 등, 2004; 차두송 등, 2008), 뿌리를 포함한 토양의 전단 특성(차두송 · 오재현, 2005) 및 단순전단시험에 의한 대체근계를 포함한 표준사의 전단 특성(이창우, 2004; 이창우 등, 2006)에 관

한 연구 등이 수행되었다. 그러나 수목 뿌리의 공간적 분포를 고려하여 사면안정에 미치는 뿌리보강 효과나 뿌리보강모형의 적용에 관한 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 Wu 뿌리보강모형을 이용하여 우리나라의 주요 조림수종인 낙엽송과 잣나무의 뿌리에 의한 토양보강 효과를 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여 수종별로 뿌리의 공간적인 분포를 조사하고, 뿌리의 인장강도를 측정하여 최종적으로 뿌리에 의한 토양보강 효과를 추정하였다. 또한, 뿌리보강 효과를 산사태 예측 및 사면안정해석에 반영하는 방법을 제안하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지 개황

이 연구는 경기도 광주군 도척면 상림리 일대에 소재하고 있는 서울대학교 농업생명과학대학 부속 태화산 학술림에서 실시되었다. 이 지역의 연평균 기온은 약 11.5℃이고, 1981년부터 측정된 연강수량의 30년 평년값은 1,371mm이다. 태화산은 주봉이 해발 약 600m 정도로 완만한 산세를 형성하고 있으며, 임지의 대부분은 화강암 지대에 위치하고 있다(서울대학교 태화산학술림, 2009).

이 연구에서는 단목 수준이 아닌 임분 수준에서 수목의 뿌리보강 효과를 평가하기 위하여 식

재밀도가 동일하고 토양 특성이 동질한 임분을 연구대상지로 선정하였다. 낙엽송 조사 지역인 태화산 학술림 1임분 하소반(37°18'3"N, 127°19'3"E)의 임령은 42년(식재년도 1969년), 평균 흉고직경(DBH)는 약 21cm이고, 평균 수고는 약 25m이다. 반면, 잣나무는 1임분 차소반(37°18'11"N, 127°19'6"E)에서 조사하였으며, 임령은 48년(식재년도 1963년), 평균 DBH는 약 21cm이고, 평균 수고는 약 20m이다. 두 임분 모두 초기 식재밀도 3,000본/ha의 인공조림지이고, 하층식생은 거의 발달되지 않았다.

현장 채취한 토양시료를 분석한 결과, 두 임분 모두 깊이별로 토양 특성의 뚜렷한 변화는 없었으며, 토성은 국제토양학회법에 따르면 낙엽송 임분 토양(sand 44%, silt 37%, clay 19%)과 잣나

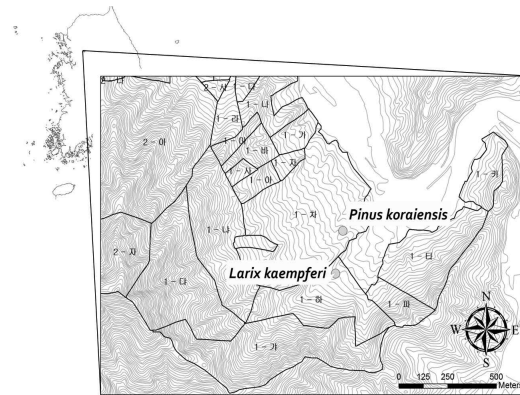


Figure 1. Location of the study sites.

Table 1. Site characteristics of *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* stands.

Parameter	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Pinus koraiensis</i>
Stand age (year)	42	48
Stand density (tree/ha)	3,000	3,000
DBH (cm)	21	21
Height (m)	25	20
Slope aspect	SW	SW
Slope angle (°)	5	15
Soil texture (by ISSS)	Loam	Loam
Soil unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	1.269	1.235

무 임분 토양(sand 42%, silt 37%, clay 21%)에서 모두 양토(loam)로 나타났다. 낙엽송 임분 토양의 단위중량은  $1.269\text{g/cm}^3$ , 잣나무 임분 토양은  $1.235\text{g/cm}^3$ 로 서로 비슷하였다.

## 2. Wu 뿌리보강모형

Wu 뿌리보강모형은 수목의 뿌리가 토양의 전 단면에 대하여 수직으로 위치하는 것으로 가정하여 뿌리보강 효과를 추정한다. Wu 모형에서는 토양이 외부의 힘에 의해 전단파괴될 때, 토양층 내의 뿌리 변형에 의해 발생하는 인장저항력으로부터 뿌리보강 효과가 발생하는 것으로 해석한다. 이 모형에서는 아래의 식 (1)과 같이 외력에 대항하여 뿌리가 끊어지지 않고 최대한으로 버틸 수 있는 저항력, 즉 인장강도를 이용하여 뿌리의 토양보강력을 표시한다.

$$C_r = T_r(A_r/A)(\cos\theta \tan\phi + \sin\theta) \quad (1)$$

여기서,  $C_r$  = 뿌리에 의한 토양보강력(kPa),  $T_r$  = 뿌리의 평균 인장강도(kPa),  $A_r/A$  = 뿌리 단면적 비율(root area ratio, %),  $\phi$  = 토양 내부 마찰각( $^\circ$ ),  $\theta$  = 토양 전단 비틀림각( $^\circ$ )이다. 한편, 뿌리 단면적 비율(RAR)은 식 (2)를 이용하여 토양 내의 뿌리 직경에 따른 계급별 평균 단면적과 계급별 뿌리의 개수로부터 구할 수 있다.

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum n_i a_i}{A} \quad (2)$$

여기서,  $n_i$  = 직경 계급  $i$  뿌리의 개수,  $a_i$  = 직경 계급  $i$  뿌리의 평균 단면적,  $A_r$  = 토양 내 뿌리 단면적 총합,  $A$  = 토양 단면적이다. 뿌리의 직경별 평균 인장강도( $T_r$ )은 다음의 식 (3)과 같이 구한다.

$$T_r = \frac{\sum T_i n_i a_i}{\sum n_i a_i} \quad (3)$$

여기서,  $T_i$  = 직경 계급  $i$  뿌리 인장강도이다.

한편, 식 (1)의 우항에 있는  $(\cos\theta \tan\phi + \sin\theta)$ 에 대하여, Wu et al.(1979)은 민감도 분석을 통하여 그 값은 1.0-1.3의 범위에 분포하고 있으며, 평균 값인 1.2를 상수(constant)로서 제시하였다. 이로부터 식 (1)은

$$C_r = 1.2T_r(A_r/A) \quad (4)$$

로 간단하게 표현된다. 그러므로 식 (4)로부터 뿌리의 평균 인장강도와 RAR를 이용하여 뿌리에 의한 토양보강력을 구할 수 있다.

## 3. 뿌리 특성 조사

뿌리의 공간적인 분포를 조사하기 위하여 토양단면법(profile wall method; Böhm, 1979)을 이용하였다. 토양단면법은 사면 방향에 수직으로 토양 단면을 형성하고, 이 단면에 접하고 있는 뿌리의 공간적 위치와 직경을 조사하는 방법이다. 이 방법은 땅을 파야 하므로 토양을 교란하게 되고, 전체 대상 뿌리 중에서 일부 제한적인 대상에 대해 조사한다는 단점이 있지만, 비교적 쉽게 뿌리의 공간분포를 파악할 수 있다는 장점이 있다 (Van Noordwijk et al., 2000). 한편, 이 연구에서는 토양단면에 나타나는 뿌리를 조사하여 RAR을 구하였다.

뿌리의 공간적 분포를 조사하기 위하여 먼저  $1\text{m} \times 1\text{m}$  크기의 투명한 연결 PVC판에 10cm 간격으로 격자(grid)를 표시하고, 이를 토양 단면에 부착시켜 나타나는 뿌리에 대해 위치와 크기를 구별하여 표시하였으며, 실내 작업을 통해 뿌리의 공간적 분포를 분석하였다(그림 2). 이 때, 뿌리의 계급구분은 직경의 크기에 따라 6계급으로 구분하여 조사하였으며, 20mm 이상의 뿌리는 분석에서 제외하였다(Abernethy and Rutherford, 2001). 단목에 대해서 약 50cm 이상의 간격을 유지하고 연속적으로 토양단면을 형성하여 조사하였으며, 이를 통하여 낙엽송의 경우에 15개 토양 단면, 잣나무는 13개의 단면을 각각 조사하였다.

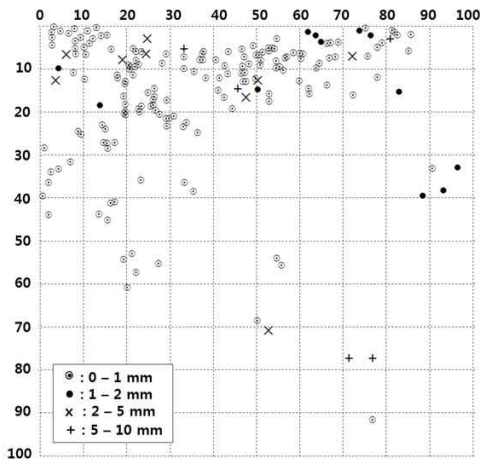


Figure 2. An example of root spatial distribution classified by its diameter.

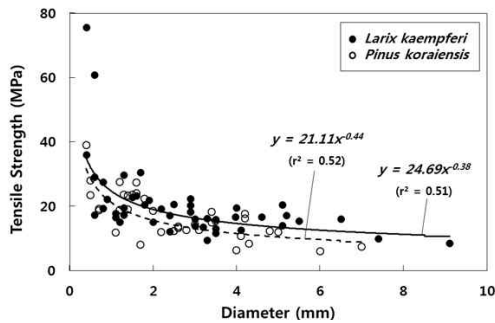


Figure 3. Relationships between root diameter and its tensile strength of *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* (adapted from Kim et al., 2010b).

한편, 조사 수종의 뿌리 인장강도를 알아보기

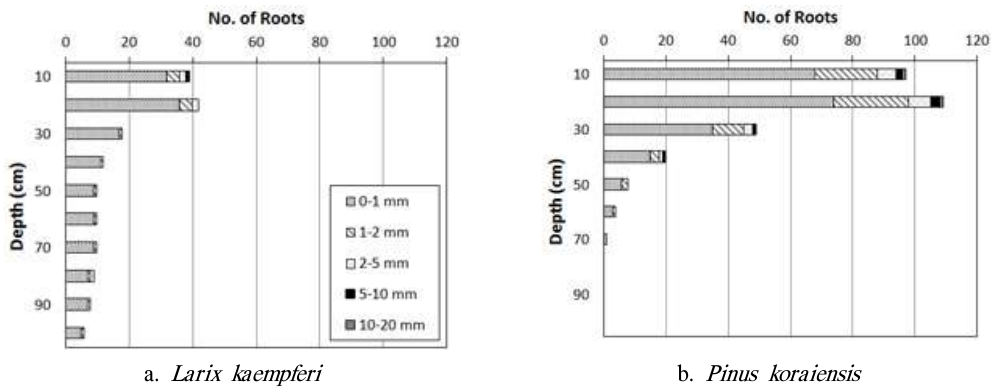
위하여 현장에서 채취한 뿌리 시료에 대하여 인장실험을 실시하였다(Kim et al., 2010b). 인장실험 결과에 의하면 뿌리 인장강도와 뿌리 직경은 멱급수 함수(power law function)의 관계를 보이며, 낙엽송은  $y = 24.69x^{-0.38}$  ( $r^2 = 0.51$ ), 잣나무는  $y = 21.11x^{-0.44}$  ( $r^2 = 0.52$ )의 식으로 나타났다. 여기서  $y$  = 뿌리 인장강도(MPa),  $x$  = 뿌리 직경(mm)이다(그림 3).

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 뿌리의 공간적 분포

##### 1) 뿌리 개수(출현빈도), 단면적 및 RAR

낙엽송 임분의 15개 토양 단면에서 조사된 전체 뿌리 개수는 2,467개였으며, 잣나무 임분의 13개의 토양 단면에서는 모두 3,771개의 뿌리가 조사되었다. 특히, 잣나무의 경우에 토양층 깊이 70cm 이하에는 뿌리가 거의 발견되지 않았다. 각 토양단면에 출현한 뿌리의 평균 개수를 직경 계급별로 나타내면 그림 4와 같다. 낙엽송의 경우, 직경 2mm 이하의 세근(fine root)이 전체의 95% 이상을 차지하고 있었다. 토양 깊이별 분포에 있어서는 깊이 30cm 내에서 전체 뿌리 개수의 약 70%가 발견되었다. 잣나무의 경우에도 낙엽송과 비슷한 경향을 나타내어 전체 뿌리 중 90% 이상이 직경 2mm 이하 세근이었고, 전체 뿌리의



a. *Larix kaempferi*

b. *Pinus koraiensis*

Figure 4. The number of root with soil depth classified by root diameter.

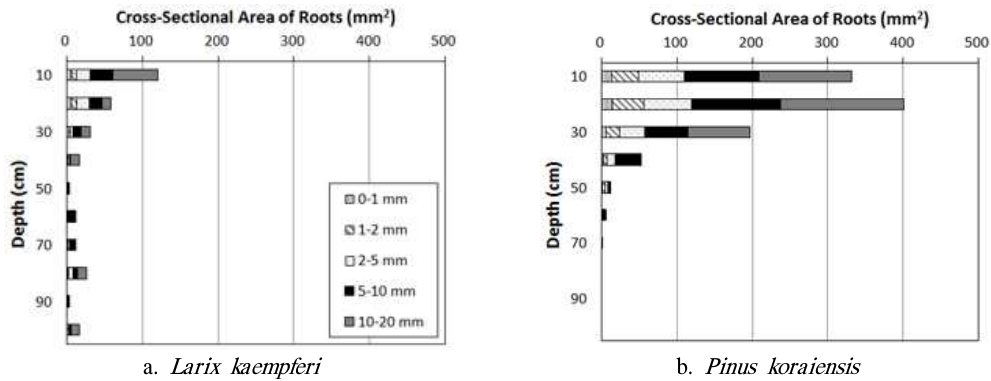


Figure 5. Cross-sectional area of roots with soil depth classified by root diameter.

85% 이상이 토양층 깊이 30cm 내에 분포하고 있었다. 또한, 두 수종 모두 뿌리 개수가 전반적으로 토양 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였다.

그림 5는 토양 깊이별로 뿌리의 직경에 따라 나타나는 뿌리의 단면적을 표시한 것이다. 뿌리 단면적에서 각 직경 계급이 차지하는 비율은 뿌리 개수와는 다르게 나타났다. 낙엽송과 잣나무 모두 직경 5mm 이상의 뿌리가 전체 뿌리 단면적의 약 70%를 차지하는 것으로 조사되었다. 토양 깊이별 분포에 있어서는 뿌리 개수와 마찬가지로 두 수종 모두 전반적으로 깊이에 따라 뿌리 단면적이 감소하는 경향을 나타내었다.

낙엽송과 잣나무의 평균 RAR을 깊이별로 나타낸 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서와 같이 전체 토양깊이에 대한 평균 RAR은 잣나무(=0.10%)가 낙엽송(=0.03%) 보다 크게 나타났지만, 토양층 깊이 50cm 이상에서는 낙엽송의 RAR 값이 잣나무의 경우보다 오히려 크게 나타났다. 이러한 조사 결과는 낙엽송은 천근성 수종이라는 일반적인 통념과는 상반되는 것으로서, 그 이유는 뿌리 분포가 단지 유전적 형질만이 아닌 토양 및 기후 등 외부의 복합적인 요인들에 의해 결정되기 때문이다(Bischetti et al., 2005; Stokes et al., 2008). 한편, 토양깊이에 따른 RAR의 분포는 두 수종 모두 선행연구 결과(Nilaweera, 1994; Bischetti et al., 2009)와 같이 토양 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 나타내었다.

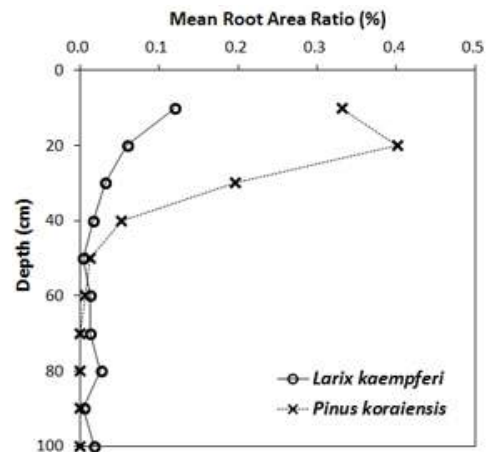


Figure 6. Vertical distribution of measured RAR.

## 2) 뿌리 분포 모형의 적용

토양 깊이에 따른 뿌리 단면적의 공간적 분포는 뿌리보강모형의 주요한 인자이지만, 직접 현장조사하기 어렵기 때문에 분포모형을 적용하여 간접적으로 추정하는 방법을 많이 이용한다. 일반적으로 뿌리 단면적은 토양 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다(Mattia et al., 2005; Kokutse et al., 2006; Tosi, 2007; Preti et al., 2010). Abdi et al.(2010)은 이란 북부 지방의 Perisan Ironwood(*Parrotia persica* (DC.) C.A. Mey) 뿌리의 깊이별 RAR을 조사한 결과, 뿌리의 분포는 지수함수 모형을 이용하여 가장 잘 나타낼 수 있다고 하였으며, 이 연구에서도 동일한 결과를 얻었다.

토양깊이별 낙엽송과 잣나무 뿌리의 단면적 분포를 지수함수를 이용하여 추정한 결과는 표 2와 같다. 각 토양 단면별로 지수함수를 적용하였을 경우 결정계수( $r^2$ )가 토양 단면에 따라 많은 차이를 보였지만, 수종별로 토양 단면의 평균값을 이용하여 지수함수 모형을 추정한 결과는 아래와 같이 비교적 결정계수가 높게 나타났다.

$$CSA_{Larix} = 218.7e^{-0.06185x} \quad (r^2 = 0.90)$$

$$CSA_{Pinus} = 635.3e^{-0.04488x} \quad (r^2 = 0.83)$$

여기서, CSA = 뿌리 단면적( $mm^2$ ), x = 토양 깊이(cm)이다. 그림 7은 각 수종의 뿌리 단면적 평균값과 추정된 지수함수 모형을 함께 나타낸 것이다.

**Table 2.** Proposed exponential models for estimating cross-sectional area with soil depth ( $y = ae^{bx}$ , where  $y$  = cross-sectional area of roots,  $x$  = soil depth, and  $a$  and  $b$  = constants).

Species	Soil profile no.	a	b	$r^2$	RMSE
<i>Larix kaempferi</i>	1	60.17	-0.0634	0.85	4.38
	2	111.6	-0.04285	0.80	13.03
	3	184.8	-0.1188	0.85	6.978
	4	1615	-0.1366	0.55	102.2
	5	242.7	-0.2278	0.98	1.245
	6	4590	-0.2969	1.00	3.575
	7	124.6	-0.0131	0.07	97.41
	8	60.36	-0.0152	0.19	25.21
	9	3.784	0.01689	0.13	15.9
	10	261.1	-0.07494	0.90	14.11
	11	932.2	-0.08505	0.95	30.55
	12	31.78	-0.04922	0.89	2.096
	13	37.44	-0.00907	0.02	58.28
	14	351.2	-0.08866	0.95	10.23
	15	274.2	-0.05129	0.59	38.7
	Mean	218.7	-0.06185	0.90	12.04
<i>Pinus koraiensis</i>	1	2123	-0.1367	0.97	33.41
	2	2044	-0.06707	0.85	153.1
	3	294.4	-0.0505	0.82	30.41
	4	-	-	-0.31	-
	5	688.8	-0.08076	0.98	16.05
	6	445.7	-0.03934	0.45	126.3
	7	1384	-0.05452	0.89	103.3
	8	788.9	-0.033	0.25	379.9
	9	684.7	-0.06373	0.77	70.09
	10	286	-0.04024	0.53	65.95
	11	309.2	-0.02909	0.63	65.56
	12	739.9	-0.03491	0.58	167.3
	13	412.2	-0.03018	0.39	145.1
		Mean	635.3	-0.04488	0.83

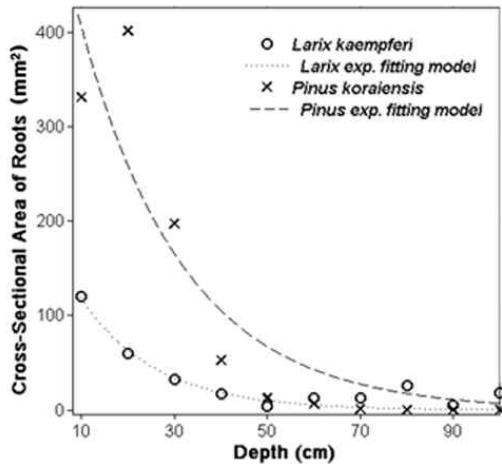


Figure 7. Exponential model fit of cross-sectional area of roots with soil depth.

2. 뿌리에 의한 토양보강력 추정

토양단면별 뿌리의 RAR와 뿌리 인장강도를 Wu 모형에 적용하여 각 토양 단면별 뿌리보강 효과를 계산한 결과는 표 3과 같다. 낙엽송 뿌리

에 의한 토양보강력은 최소 0.81kPa부터 최대 8.41kPa의 범위를 보였으며, 평균 4.04kPa이었다. 잣나무의 뿌리 보강력은 평균 15.65kPa이었으며, 그 범위는 7.53-28.03kPa이었다. Kim et al. (2010a)에서 제시한 Wu 모형의 감소율(reduction factor)인 0.57을 적용하였을 경우의 뿌리에 의한 토양보강력은 낙엽송이 2.30kPa, 잣나무는 8.92kPa로 나타났다.

그림 8은 각 수종별 RAR 평균을 이용하여 계산한 뿌리보강 효과를 토양 깊이별 그리고 뿌리 직경별로 나타낸 것이다. RAR 평균값을 이용한 낙엽송의 뿌리보강력은 4.04kPa이었으며, 잣나무의 뿌리에 의한 토양보강력은 12.26kPa으로 나타났다. 토양 깊이별로 낙엽송과 잣나무의 토양보강효과는 전체적으로 토양 깊이에 따라 뿌리보강력이 감소하는 경향을 보였다. 뿌리 직경별 보강력의 크기는 두 수종 모두 RAR 결과와 유사하게 나타났다.

Table 3. Estimated soil reinforcement by tree roots.

Species	No.	RAR (%)	Estimated root reinforcement (kPa)	Revised value by the reduction factor (=0.57)
<i>Larix kaempferi</i>	1	0.01	1.49	0.85
	2	0.02	2.77	1.58
	3	0.01	1.88	1.07
	4	0.09	8.41	4.79
	5	0.00	0.81	0.46
	6	0.03	3.26	1.86
	7	0.07	7.24	4.13
	8	0.03	4.85	2.76
	9	0.01	1.84	1.05
	10	0.02	3.71	2.11
	11	0.07	7.04	4.01
	12	0.01	1.48	0.84
	13	0.02	2.96	1.69
	14	0.03	5.38	3.07
	15	0.05	7.46	4.25
	Avg.	0.03	4.04	2.30
	Min.	0.00	0.81	0.46
	Max.	0.09	8.41	4.79



Table 3. Continued.

Species	No.	RAR (%)	Estimated root reinforcement (kPa)	Revised value by the reduction factor (=0.57)
<i>Pinus koraiensis</i>	1	0.08	12.81	7.30
	2	0.21	28.03	15.98
	3	0.04	8.48	4.83
	4	0.04	7.53	4.29
	5	0.06	9.57	5.45
	6	0.08	11.17	6.37
	7	0.17	27.99	15.95
	8	0.17	23.88	13.61
	9	0.07	10.61	6.05
	10	0.05	9.37	5.34
	11	0.08	14.51	8.27
	12	0.15	23.44	13.36
	13	0.10	16.02	9.13
	Avg.	0.10	15.65	8.92
	Min.	0.04	7.53	4.29
Max.	0.21	28.03	15.98	

3. 뿌리보강효과를 고려한 무한사면해석모형의 수정

뿌리의 토양보강력은 산지사면의 산사태 발생 예측이나 사면안정해석에 이용되어 보다 정확한 분석결과를 얻는데 기여할 수 있다. 현재 주로 이용되는 산사태 발생 예측모형 및 사면안정해석모형은 이러한 뿌리보강 효과를 무시하거나 단순하게 처리하여 식생의 종류나 분포 등에 따른 효과를 잘 반영하지 못한다(Bathurst et al., 2007; Van

de Wiel et al., 2007). 이 연구에서는 산사태 발생 예측에 많이 이용되는 무한사면안정해석에서 뿌리보강 효과를 접목하는 방법을 고찰하였다.

이 연구에서 산정한 뿌리보강 효과는 사면 방향으로 뻗은 뿌리의 보강력인 ‘측면 뿌리 보강력 (lateral root reinforcement)’으로 사면 경사방향에 수직으로 위치한 뿌리에 의해 발생하는 ‘기저 뿌리 보강력(basal root reinforcement)’과는 작용방향과 크기가 서로 다르다. 측면 뿌리 보강력은

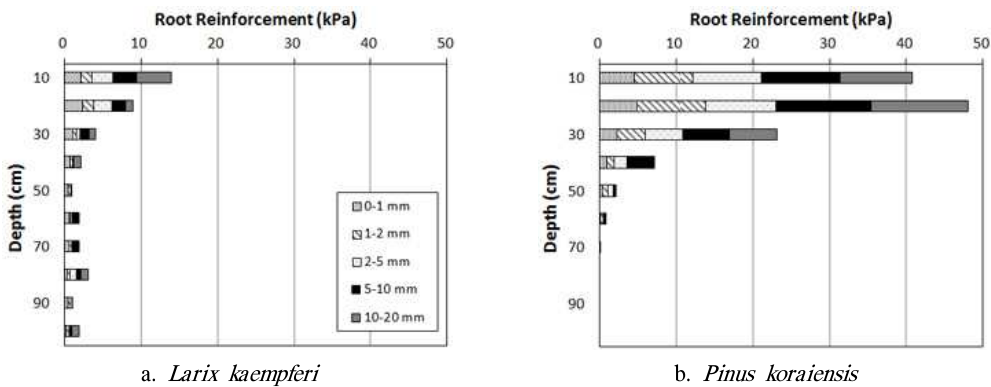


Figure 8. Estimated root reinforcement by Wu model.

Schmidt et al.(2001)가 미국 오레곤(Oregon) 주 해안가의 산사태 발생 현장을 대상으로 실시한 뿌리 보강력 연구에서 도입한 개념으로서, 조립질의 토양 지역의 천층 산사태 모델링에서는 측면 뿌리보강 효과가 특히 중요한 부분을 차지하게 된다(Casadei et al., 2003). 토심이 얇은 산지 지역에서는 뿌리의 대부분이 지표면으로부터 깊이 50cm 내에 존재하지만 실제 산사태 발생지점, 즉 파괴전단면은 보다 깊은 곳에 위치하는 경우가 많으므로 사면안정 기여에 있어서는 측면 뿌리보강 효과만을 고려한다(Schwarz et al., 2010).

Schwarz et al.(2010)은 3차원 무한사면안정해석에서 식생의 자체하중과 측면 뿌리보강 효과를 고려하여 식 (5)와 같이 사면안전율을 계산하였다. 측면 뿌리보강 효과는 뿌리 점착력의 형태로 사면안정해석에 고려될 수 있다.

$$F_S = \frac{A\tau_{bas.} + F_{lat.veg.}}{F_{par.}} = \frac{[A\{c_{soil} + c_{bas.veg.} + (\sigma - u) \tan \phi\}] + \{(A_{lat.}/2)c_{lat.veg.}\}}{(Ah_{\gamma_{sat}}g \sin \beta) + (Am_{veg.}g \sin \beta)} \quad (5)$$

여기서,  $A$  = 산사태 면적( $m^2$ ),  $\tau_{bas.}$  = 전단강도(kPa),  $F_{lat.veg.}$  = 뿌리에 의한 측면 보강력(kN),  $F_{par.}$  = 전단응력(driving force, kN),  $C_{soil}$  = (잔류) 토양 점착력(kPa),  $C_{bas.veg.}$  = 기저 뿌리 보강력(kPa),  $\sigma$  = 수직전응력(kPa),  $u$  = 간극수압(kPa),  $\phi$  = 잔류 토양 마찰각( $^\circ$ ),  $A_{lat.}$  = 산사태 측면 면적(Scar area,  $m^2$ ),  $C_{lat.veg.}$  = 측면 뿌리 보강력(kPa),  $h$  = 사면에 수직방향 토심(m),  $\gamma_{sat}$  = 토양 포화단위질량( $t/m^3$ ),  $g$  = 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\beta$  = 사면경사( $^\circ$ ),  $m_{veg.}$  = 단위면적당 수목 질량( $t/m^2$ )이다. 같은 방식으로 2차원 무한사면모형에서 안전율은 다음의 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_S = \frac{I\tau_{bas.} + F_{lat.veg.}}{F_{par.}} = \frac{[I\{c_{soil} + c_{bas.veg.} + (\sigma - u) \tan \phi\}] + (Ihc_{lat.veg.})}{(Ih_{\gamma_{sat}}g \sin \beta) + (Im_{veg.}g \sin \beta)} \quad (6)$$

여기서,  $I$  = 사면방향의 산사태 길이(m)이다. 식 (6)은 실제 산사태 발생 현장에 대한 수목 뿌리보강 효과를 역해석(back analysis)하는데 이용되거나 사면 안전율에 대한 뿌리보강 효과를 해

석하는데 이용될 수 있다.

실제 뿌리보강 효과가 사면 안전율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 식 (6)을 이용하여 잣나무 현장조사지를 대상으로 사면안정해석을 실시하였다. 토양 붕괴 전단면은 사면에 수직방향으로 토심 1m를 기준으로 하였으며, 붕괴초기의 수분조건은 포화된 것으로 가정하였고, 토양 내부 마찰각은 분석대상지의 토성과 붕괴현황을 고려하여  $35^\circ$ 로 설정하고 사면안전율을 계산하였다. 그림 9는 전술한 조건(표 4)으로 산사태 발생 크기(길이)에 대한 사면안전율을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 실선은 수목의 존재를 고려한 결과이고, 점선은 수목의 영향을 고려하지 않고 사면안전율을 구한 결과이다. 그림 9와 같이 수목이 있는 경우가 수목이 없는 조건보다 사면안전율이 높게 나왔다. 또한, 규모가 작은 산사태에서 수목

의 영향력이 보다 크게 작용하여 더 높은 사면안전율을 나타냈다. 이러한 결과를 통해서 규모가 작은 산사태에서는 뿌리보강 효과가 실제 사면의 안전율을 높이는데 큰 영향을 미친다고 판단된다.

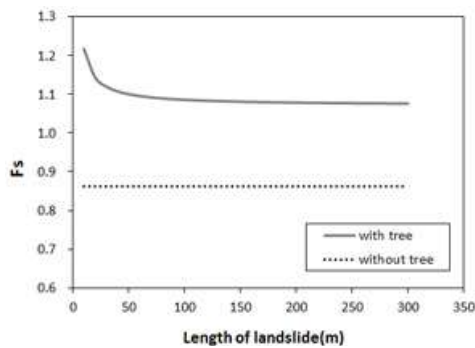
#### IV. 결 론

이 연구에서는 수목 뿌리의 토양보강 효과를 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 낙엽송과 잣나무 뿌리의 공간적 분포와 인장특성을 조사하고, Wu 뿌리보강모형을 이용하여 뿌리에 의한

토양보강력을 구하였다. 낙엽송과 잣나무 뿌리의 개수와 단면적은 토양 깊이에 따라 감소하였으며, 특히 뿌리 단면적은 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하였다.  $1m \times 1m$  크기의 토양 단면에서

**Table 4.** Parameters for sensitivity analysis of slide length.

Parameter	Value	Description
Soil cohesion ( $C_{soil}$ )	0	granular sandy soil
Basal root cohesion ( $C_{bas.veg.}$ )	0	
Total normal force ( $\sigma$ )	20kPa	
Pore water pressure ( $\mu$ )	9.8kPa	Saturated condition
Residual soil frictional angle ( $\phi'$ )	35°	
Depth of landslide ( $h$ )	1m	
Saturated soil unit weight ( $\gamma_{sat}$ )	2t/m <sup>3</sup>	
Gravitational acceleration ( $g$ )	9.8m/s <sup>2</sup>	
Unit vegetation weight ( $m_{veg.}$ )	0.3t/m <sup>2</sup>	
Slope angle ( $\beta$ )	25°	
Later root cohesion ( $C_{lat.veg.}$ )	12.26kPa	The estimated value of <i>Pinus koraiensis</i> by Wu model in the current study



**Figure 9.** Factor of safety (Fs) of ‘with tree’ and ‘without tree’ across landslide length.

구한 RAR은 평균적으로 낙엽송이 0.03%, 잣나무는 0.10%으로 각각 나타났다. Wu 모형을 이용하여 수종별 뿌리보강 효과를 임분 규모에서 추정된 결과, 낙엽송의 뿌리보강력은 4.04kPa이었으며, 잣나무의 뿌리에 의한 토양보강력은 12.26kPa이었고, 전반적으로 토양 깊이에 따라 감소하는 추세를 보였다.

뿌리보강 효과는 사면안정해석에서 측면 방향의 뿌리 보강력으로 수목의 자체중량과 함께 식생의 영향으로 고려될 수 있는 부분이며, 이러한 수목의 효과를 사면안정해석에 반영함으로써 산지사면에서 보다 정확한 붕괴 예측을 할 수 있을

것으로 판단되었다. 특히, 수목을 고려한 무한사면안정해석에서 산사태 발생 길이에 대하여 민감도 분석을 실시한 결과, 뿌리보강 효과는 규모가 작은 산사태에서 보다 큰 영향력을 나타내는 것으로 나타났다. 그러므로 우리나라와 같이 소규모의 산사태가 주로 발생하는 지역에서는 산사태 발생의 위험도를 낮추는데 수목이 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단되었다. 이러한 측면에서 앞으로 보다 다양한 수종의 뿌리 분포와 뿌리보강 효과에 관한 연구가 요구된다.

### 인 용 문 헌

마호섭 · 정원옥. 2007. 우리나라 국립공원지역의 산사태 발생특성 분석. 한국임학회지 96 (6) : 611-619.

박종민 · 마호섭 · 강원석 · 오경원 · 박성학 · 이성재. 2010. 전라북도 지역의 산사태발생 특성분석. 경상대학교 농업생명과학연구 44 (4) : 9-20.

서울대학교 태화산학술팀. 2009. 태화산학술팀 현황. 서울대학교 태화산학술팀 내부보고문서.

이상희. 2005. GIS를 이용한 천층산사태 발생 예

- 측을 위한 수문물리모형의 적용. 충북대학교 대학원 박사학위논문.
- 이인모 · 정상규 · 임충모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험 연구. 대한토질공학회지 7(2) : 51-66.
- 이창우. 2004. 대나무(대체근계)의 토질강도보강효과에 대한 실험적 연구. -토양수분제어하의 단순전단시험에 의한 해석-. 한국환경복원녹화기술학회지 7(2) : 46-51.
- 이창우 · 윤호중 · 정용호. 2006. Nylon Net(대체근계)의 토질강도보강효과에 대한 실험적 연구. -토양수분제어하의 단순전단시험에 의한 해석-. 한국환경복원녹화기술학회지 9(3) : 76-81.
- 조주형 · 안봉원. 1998. 식생뿌리에 의한 비탈면 안정과 보강에 관한 실험적 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 1(1) : 54-62.
- 조주형 · 이종성. 2000. 식생뿌리의 전단강도 보강에 의한 사면안전을 해석. -잣나무 뿌리를 중심으로-. 한국조경학회지 27(5) : 80-93.
- 지병윤 · 오재현 · 최병구 · 전근우 · 차두송. 2004. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(4). -잣나무 뿌리의 인장특성-. 한국임학회지 93(1) : 103-107.
- 차두송 · 지병윤. 2003. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(2). -잣나무 뿌리의 공간분포-. 한국임학회지 92(1) : 33-41.
- 차두송 · 오재현. 2005. 일면전단시험에 의한 수목뿌리의 토양보강효과 평가. 한국임학회지 94(4) : 281-286.
- 차두송 · 오재현 · 이정수. 2008. 산불피해지에 있어서 소나무 뿌리의 인장강도특성 변화. 한국임학회지 97(4) : 392-397.
- 차두송 · 오재현 · 지병윤 · 전근우. 2002. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(1). -소나무 뿌리의 공간분포과 물리적 특성-. 한국임학회지 91(1) : 71-78.
- Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M., and H. Rahimi. 2010. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study : hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran. Ecological Engineering 36(10) : 1409-1416.
- Abe, K., and R. R. Ziemer. 1991. Effect of tree roots on a shear zone : Modeling reinforced shear stress. Canadian Journal of Forest Research 21 : 1012-1019.
- Abernethy, B., and I. D. Rutherford. 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. Hydrological Process 15 : 63-79.
- Achat, D. L., Bakker, M. R., and P. Trichet. 2008. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. Journal of Forest Research 13 : 165-175.
- Bathurst, J. C., Moretti, G., El-Hames, A., Begueria, S., and J. M. Garcia-Ruiz. 2007. Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees. Hydrology and Earth System Sciences 11(1) : 569-583.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Epis, T., and E. Morlotti. 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. Plant and Soil 324 : 71-89.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., and A. Zocco. 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (northern Italy). Plant and Soil 278 : 11-22.
- Böhm, W. 1979. Methods of Studying Root System. Berlin : Springer-Verlag.
- Casadei, M., Dietrich, W. E., and N. L. Miller. 2003. Testing a model for predicting the

- timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 : 925-950.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., and B. Muys. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil* 305 : 207-226.
- Gray, D. H., and H. Ohashi. 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering* 109(3) : 335-353.
- Gray, D. H., and R. B. Sotir. 1996. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization : A Practical Guide for Erosion Control*. New York : John Wiley & Sons.
- Kokutse, N., Fourcaud, T., Kokou, K., Neglo, K., and P. Lac. 2006. 3D numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability. *Proceedings of the INTERPRAEVENT International Symposium Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*. Nigata, Japan : Japan Society of Erosion Control Engineering. pp. 561-567.
- Kim, D., Im, S., Lee, S. H., and Y. Hong. 2010a. Assessing root reinforcements on soils by *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* using two different root reinforcement model. *International Forestry Review* 12(5) : 162.
- Kim, D., Lee, S. H., Combalicer, E. A., Hong, Y., and S. Im. 2010b. Estimating soil reinforcement by tree roots using the perpendicular root reinforcement model. *International Journal of Erosion Control Engineering* 3(1) : 80-84.
- Maher, M. H., and D. H. Gray. 1990. Static response of sands reinforced with randomly disturbed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering* 116(11) : 1661-1677.
- Mattia, C., Bischetti, G. B., and F. Gentile. 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant and Soil* 278 : 23-32.
- Nilaweera, N. S. 1994. Effects of tree roots on slope stability : the case of Khao Luang mountain area, southern Thailand. Ph.D. dissertation, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Norris, J. E., Greenwood, J. R., Achim, A., Gardiner, B. A., Nicoll, B. C., Cammeraat, E., and S. B. Mickovski. 2008. Hazard assessment of vegetated slopes (In Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B. C., and A. Achim eds., "Slope Stability and Erosion Control : Ecotechnological Solutions"). Netherlands : Springer. pp. 119-166.
- Pollen, N., and A. Simon. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* 41, W07025, doi : 10.1029/2004WR003801.
- Preti, F., Dania, A., and F. Laio. 2010. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecological Engineering* 36 : 305-316.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., and B. Muys. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture : a review. *Trees* 21(4) : 385-402.
- Roering, J. J., Schmidt, K. M., Stock, J. D.,

- Dietrich, W. E., and D. R. Montgomery. 2003. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal* 40(2) : 237-253.
- Schmid, I., and M. Kazda. 2005. Clustered root distribution in mature stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Oecologia* 144(1) : 25-31.
- Schmidt, K. M., Roering, J. J., Stock, J. D., Dietrich, W. E., Montgomery, D. R., and T. Schaub. 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal* 38 : 995-1024.
- Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P., and D. Or. 2010. Quantifying the role of vegetation in slope stability : A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering* 36(3) : 285-291.
- Shewbridge, S. E., and N. Sitar. 1990. Deformation-based model for reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering* 116(7) : 1153-1170.
- Stokes, A., Norris, J. E., Van Beek, L. P. H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., Jenner, A., Di Iorio, A., and T. Fourcaud. 2008. How vegetation reinforces soil on slopes (In Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B. C., and A. Achim eds., "Slope Stability and Erosion Control : Ecotechnological Solutions"). Netherlands : Springer. pp. 65-118.
- Tosi, M. 2007. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the northern Apennines (Italy). *Geomorphology* 87 : 268-283.
- Van de Wiel, M. J., and S. E. Darby. 2007. A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 32(14) : 2185-2198.
- Van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., Do Rosário G. Oliveira, M., and A. G. Bengough. 2000. Trench profile techniques and core break methods (In Smit, A. L., Bengough, A. G., Engels, C., Van Noordwijk, M., Pellerin, S., and S. C. Van de Geijn eds., "Root Methods : A Handbook"). Berlin : Springer-Verlag. pp. 211-271.
- Waldron, L. J. 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal* 41 (5) : 843-849.
- Wu, T. H. 2007. Root reinforcement : Analysis and experiments (In Stokes, A., Spanos, I., Norris, J. E., and E. Cammeraat. eds., "Eco- and Ground Bio-Engineering : The Use of Vegetation to Improve Slope Stability"). Netherlands : Springer. pp. 13-20.
- Wu, T. H., McKinnell III, W. P., and D. N. Swanston. 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* 16 : 19-33.
- Ziemer, R. R., and D. N. Swanston. 1977. Root strength changes after logging in southeast Alaska. U.S. Dept. Agric., Forest Service, Research Note PNW-306, Portland, Oregon.