

산화적지에서 지상부 식생구조와 표토에 분포하는 세근의 관계

이 규 송* · 박 상 덕¹강릉대학교 생물학과, ¹강릉대학교 토목공학과

Relationship between the Aboveground Vegetation Structure and Fine Roots of the Topsoil in the Burnt Forest Areas, Korea

Lee, Kyu Song* and Sang Deog Park¹

Department of Biology, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea

¹Department of Civil Engineering, Kangnung National University, Gangneung, 210-702, Korea

ABSTRACT: This study was conducted to elucidate the relationship between the aboveground vegetation structure and fine roots of the topsoil (<15 cm), and thereafter to obtain the regression models for the estimation of the fine roots of the topsoil using the aboveground vegetation values in the burned forest areas, Korea. The FRT (fine roots of the top soil) as well as the aboveground vegetation structure showed spatial variation in the earlier successional stages after forest fire. The fine roots (<2 mm) of the topsoil in the earlier successional stages than the first 3 year after forest fire showed the range from 3 to 166 g DM/m². The FRT in the naturally regenerated sites and planted sites after forest fire was closely correlated with the vegetation indices, especially *Ivc*, representing the development status of the aboveground vegetation. The FRT in the terrace seeding work sites after forest fire was closely correlated with year elapsed after terrace seeding work. The FRT in the terrace seeding work sites showed the much higher values because of the vigorous growth of grass species than the other sites. In the naturally regenerated sites, the FRT showed the parabola form according to the increment of aboveground vegetation value (*Ivc*). Although the aboveground vegetation value (*Ivc*) showed a tendency to increase logarithmically during the secondary succession after forest fire, the estimated fine roots of the topsoil was depicted the parabola form showing the gradual increment until the first 15 years and slight decrease thereafter. Decrease of FRT in the later successional stage showing the high vegetation value may be caused by increment of the woody species contribution to the vegetation value (*Ivc*). Our results represented that the aboveground vegetation value (*Ivc*) can be used to the estimation of the fine roots of the topsoil in burned forest areas.

Key words: Erosion, Fine roots, Fire, Succession, Topsoil, Vegetation structure, Vegetation value

서 론

산불 피해지에서 특히 우려되는 것은 식생의 파괴로 인하여 발생하는 토사 유실이나 홍수 피해와 같은 2차 재해의 위험성이다. 2002년의 태풍 루사와 2003년의 태풍 매미로 인하여 동해안 산불 피해지에서 발생한 산 사태와 홍수 피해는 훼손된 산림지역에서 토사 유실이나 강우 유출로 인한 2차 재해의 위험성에 대한 평가와 진단 기법 개발의 중요성을 잘 말해 주고 있다(김 2003, 행정자치부 국립방재연구소 2003, 소방방재청 국립방재연구소 2004, Choung *et al.* 2004). 산림지역에서 발생하는 토사 유실이나 강우 유출 피해는 전 세계적으로 발생하는 문제이기 때문에 다양한 토사 유출 예측 모형들이 개발되어 이용되고 있다

(행정자치부 국립방재연구소 2001, Morgan 1996, Schmidt 2000, Toy *et al.* 2002). 토사 유출이나 강우 유출을 예측하기 위해 개발된 많은 모형들은 예측과 진단을 위한 매개변수로서 강우의 특성, 토양의 저항력과 관계된 구조적 특성, 지형 특성 및 식생 요인을 이용하고 있다(소방방재청 국립방재연구소 2004, Morgan 1996, Schmidt 2000). 매개 변수로서 이용되는 여러 요인 중 토사 유출에 보다 강한 영향을 미치는 요인은 강우 요인과 식생 요인인데, 토양 침식을 억제하는 데 있어서 강우 요인은 인위적으로 조절할 수 있는 요인이 아니므로 식생 요인을 통한 조절이 매우 중요하다고 할 수 있다(소방방재청 국립방재연구소 2004).

강우 유출과 토양 침식의 제어인자로서 식생은 크게 줄기와 잎으로 대표되는 지상부 식생인자와 뿌리로 대표되는 지하부 식생인자로 구분할 수 있다. 지상부 식생의 경우 땅으로 떨어

* Corresponding author; Phone: +82-33-640-2311, e-mail: leeks84@kangnung.ac.kr

지는 강우의 낙하 에너지를 감소시키고, 지하부 식생의 경우 표면유출 및 침식을 직접적으로 억제하는 역할을 한다(박 등 2005). Lane 등(2001)은 토양 침식의 조절에 있어서 지상부 식생보다 지표면이나 지하부 식생인자의 영향이 크다고 보고하였다. 그러나 토사 유출이나 강우 유출에 미치는 식생의 영향을 평가한 많은 보고들은 지상부 식생의 효과에 집중되어 있고, 지하부 식생의 효과에 대한 분석 결과는 매우 적다(Gyssels and Poesen 2003). 그 이유는 지하부 식생을 눈으로 직접 식별하기 어렵고, 정량화를 위한 표본의 채취가 어려우며, 연구에 많은 시간과 노력이 필요하기 때문이다(Jackson *et al.* 1997).

강우 유출로 인한 표토의 침식에 미치는 지하부 식생의 영향에 대한 정량적인 연구는 매우 드물지만 산 사태와 관련한 사면 안정성에 미치는 지하부 식생의 영향에 대한 연구를 통하여 표토의 안정에 대한 지하부 식생의 역할을 파악해 볼 수 있다(이 등 1991, 조와 이 2000, 차와 지 2003, Gyssels and Poesen 2003). 사면 안정성에 대한 뿌리의 효과에 대한 연구들은 역학적인 보강에 의한 토양 전단 응력의 증가에 대한 것으로 토양층에 존재하는 뿌리는 사면 안정성에 미치는 식생의 가장 큰 기여 중의 하나로 간주되고 있다(이 등 1991, 조와 이 2000, 차와 지 2003).

식물의 뿌리는 두 가지 방법으로 토양을 보강한다. 첫째 뿌리와 뿌리의 잔여물은 물리적으로 토양과 결합하여 토양과 물 흐름에 대한 기계적인 장벽을 형성하는데, 뿌리의 기계적인 장벽의 영향을 조절하는 매개인자는 직경, 분지 정도, 뿌리털의 존재, 뿌리와 토양간의 마찰, 뿌리 네트워크의 분포 등이다. 특히 표토에 밀집하여 분포하는 뿌리(세근)는 토양 결합력을 제공하여 강우 유출로 인한 토양 침식을 완화시킨다. 또한 뿌리는 살아 있는 공극(biopore)을 형성하여 지표면 아래로 물 흐름의 경로를 제공함으로써 표면 유출 수량을 감소시킨다. 둘째, 뿌리와 뿌리 잔여물은 결합인자를 배출하고, 다른 유기물 결합물을 생성하는 토양미생물에게 먹이를 제공함으로써 토양 결합력을 증가시킨다. 안정적으로 결합된 토양 덩어리의 증가는 토양 침식능을 감소시킨다(Gyssels and Poesen 2003). 산불 피해지와 같이 훼손된 생태계에서 천이 초기 단계에 정착하는 식물의 생장으로 인한 토양 표면의 보호는 강우 유출로 인한 토양 침식물의 완화에 결정적인 역할을 한다. 따라서 천이 초기 단계의 식물이 표토에 뿌리밀도를 증가시켜 토양 침식을 조절하는 것은 생존을 위한 하나의 전략이 될 수 있다.

산림 생태계에서 2 mm 이하의 세근은 주로 표토(30 cm 이내)에 분포하고 있다(차와 지 2003, Kwak and Kim 1994, Jackson *et al.*, 1997). 표토에 밀집하여 분포하는 세근은 강우 유출 및 토양 침식 과정에서 매우 중요한 역할을 수행하기 때문에 토사 유출이나 강우 유출의 예측 모형을 개발할 때 주요 매개 변수로 다루어질 필요가 있다. 또한 산림 생태계에서 세근은 물과 양분 흡수의 통로, 순일차 생산물의 저장소로서 물질 순환에서 주도적인 역할을 담당하고 있기 때문에 산림생태계의 기능을 다루는 모델에서도 주요 매개 변수로 다루어져야 한다(Jackson *et al.* 2003). 산림 생태계에서 연중 세근으로부터 토양에 이입되는 탄

소와 양분의 양은 낙엽으로부터 토양에 이입되는 양과 같거나 더 많다(Jackson *et al.* 2003). 그럼에도 불구하고 정량화의 어려움 때문에 범지구적 생태계 모델이나 토사 유출 예측 모형에서 주요 매개 변수로 이용되어온 지상부 식생에 비해 덜 중요하게 다루어져 왔다(Jackson *et al.* 1997, Gyssels and Poesen 2003). 따라서 지하부 식생(특히 세근의 분포)을 생태계내 물질 순환, 강우 유출 및 토양 침식과 관련된 예측 모형의 매개 변수로 활용하기 위해서는 보다 쉽고 정량적으로 세근 양을 파악할 수 있는 모형이 필요하다. 일반적으로 지상부 식생의 종류와 특성은 지하부식생과 밀접한 관련을 가지고 있으므로 쉽게 파악할 수 있는 지상부 식생을 매개 변수로 활용하여 지하부 식생의 양을 예측하는 것이 편리하다(이 2001).

본 연구에서는 산불 피해지에서 토사 유출과 강우 유출 예측 모형 개발에 필요한 매개 변수로서 지상부 식생과 지하부 식생(표토의 세근)을 함께 고려한 식생지수의 개발을 위한 기초 연구로서 지상부 식생의 발달과 표토에 분포하는 세근의 관계를 밝히고자 한다.

연구방법

본 연구는 2000년에 대형 산불 피해를 입은 강원도 강릉시 사천면 일대와 강원도 삼척시 원덕읍 일대, 1996년에 산불 피해를 입은 강원도 고성군 죽왕면 일대 그리고 1972년에 산불 피해를 입은 강원도 양양군 현북면 일대에서 식생이 안정화되는 시기인 2003년 7월과 8월에 수행되었다. 산불 피해지에서 일반적으로 관찰할 수 있는 자연 복원지, 화재목 벌목 후 조림을 한 후 1년에 두 차례씩 하에작업을 수행하는 벌목 조림지 그리고 토사 유출 억제를 위하여 화재목을 벌목하고 지표면을 정리한 다음 종자를 뿌려서 녹화한 녹화사방지의 3가지 식생 유형으로 구분하여 조사하였다. 각각의 식생 유형별로 지상부 식생의 발달에 따른 세근의 분포를 파악하기 위하여 상관상으로 지상부 식생의 발달이 미약한 곳에서부터 발달상태가 양호한 곳까지 구배를 이루도록 조사지점을 설정하였다. 자연 복원지의 조사 지점은 2000년 산불 피해를 입은 삼척시 원덕읍 임원리에서 열 지소, 1996년 산불 피해를 입은 고성군 죽왕면 두 지소, 1972년 산불 피해를 입은 양양군 현북면 한 지소로 총 13 지소이었다. 벌목 조림지의 조사지점은 2000년 산불 피해를 입은 강릉시 사천면 두 지소와 원덕읍 임원리 여섯 지소로 총 9 지소이었고, 녹화사방지의 조사지점은 강릉시 사천면의 7 지소이었다.

선정된 각 조사지점별로 식생의 균질성을 고려하여 5 m × 5 m 방형구를 설치하고, 방형구안의 식생 구조를 파악하였다. 식생의 발달 상태를 나타내는 식생 구조는 전체 지상부 식피율을 파악하고, 교목층, 아교목층, 관목층 및 초본층으로 구분하여 각 층별 식생의 키와 식피율을 조사하였다. 관목층의 경우 2m 이하의 모든 목본을 관목층으로 구분하였고, 초본층의 경우 초본만을 대상으로 하였다. 예를 들어 벌목 조림지의 경우 하에작업으로 인하여 초본과 목본의 키가 모두 0.4 m로 같을 경우, 목본 구

성 종은 관목층으로 초본 종은 초본층으로 구분하여 조사하였다. 조사한 식생 구조를 이용하여 하나의 값으로 나타낼 수 있는 다음의 식생치로 환산하였다(이 등 2004).

$$\begin{aligned} \text{식생치 } (V_c) &= \text{지표면에 식생을 투영했을 때의 전체 식피율 } (\%) \\ \text{식생치 } (I_{vc}) &= \sum V_{cl} / 100 \\ \text{식생치 } (H_{cl}) &= \sum (H_l \times V_{cl}) \end{aligned}$$

위의 식생치에서 V_{cl} 은 l 층의 식피율 (%)을, 그리고 H_l 은 l 층의 식생의 키(m)를 나타낸다.

방형구안의 식생 구조를 파악한 후, 방형구의 중앙 부근에서 그 조사지점의 식생을 대표할 수 있는 세근 조사지점을 선정하였다. 세근의 조사지점을 선정할 때에는 가급적 커다란 목본의 밑둥이 포함되지 않도록 하였다. 세근의 조사지점에 줄자를 이용하여 1 m × 1 m 방형구를 설치하고, 지표면으로부터 15 cm 깊이 까지 뿌리를 포함한 모든 토양을 들어내어 그 속에 들어 있는 모든 뿌리를 현장에서 골라내어 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반한 뿌리는 흐르는 맑은 물로 깨끗하게 세척한 다음, 육안으로 죽은 뿌리를 골라내었다. 뿌리는 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 직경 5 mm 이상(medium and coarse roots), 2~5 mm (larger fine roots), 2 mm이하 (smaller fine roots)의 등급으로 구분하였다(Curt and Prevosto 2003). 구분한 뿌리를 80℃ 건조기에서 항량이 될 때까지 말려서 건조량을 측정하였다. 5 mm 이상의 뿌리는 본 연구에서 사용한 1 m × 1 m 방형구로는 그 지소를 대표할 수 없는 값으로 인정하기 어려울 정도로 편차가 심했고, 15 cm 이상의 깊이 까지 분포하고 있어서 정량적인 조사가 어려웠다. 그러나 5 mm 이하의 뿌리는 비교적 균질하게 분포하고 15 cm 이내의 토양층에 대부분 분포하고 있었다. 또한 본 연구의 목적이 굵은 뿌리보다는 표토의 세근에 의해 영향을 많이 받는 토사 유출이나 강우 유출의 예측 모형과 관련된 매개 변수의 개발과 관련이 있기 때문에 본 연구에서는 5 mm 이하와 2 mm 이하의 직경을 갖는 세근과 지상부 식생 구조의 발달과의 관계를 분석하였다.

결과 및 논의

자연 방치지에서 식생치와 세근 사이의 관계

Fig. 1은 산불 후 자연 방치된 지소에서 세 가지 지상부 식생치와 단위면적당 세근 건조량의 관계를 나타낸 것이다. 대체적으로 식생치와 세근의 양은 매우 밀접한 관계를 나타내었다. 지상부 전체 식피율인 V_c 의 증가에 따라 세근의 양은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 직경 2 mm 이하의 세근의 경우, V_c 가 40% 미만인 지소에서는 50 g DM/m²이하를 나타내었고, 80% 이상인 곳에서는 100 g DM/m²이상을 나타내었다. 그러나 V_c 가 높은 곳에서는 세근의 양이 많은 편차를 나타내었다. 식생치 I_{vc} 와 세근의 관계는 I_{vc} 가 1.5정도까지 증가할 동안 세근의 양이 증가하여 정점을 이룬 뒤 I_{vc} 가 그 이상 증가할 경우 감소하는 경향을 나타내었다. 직경 2 mm 이하의 세근은 I_{vc} 가 0.5이

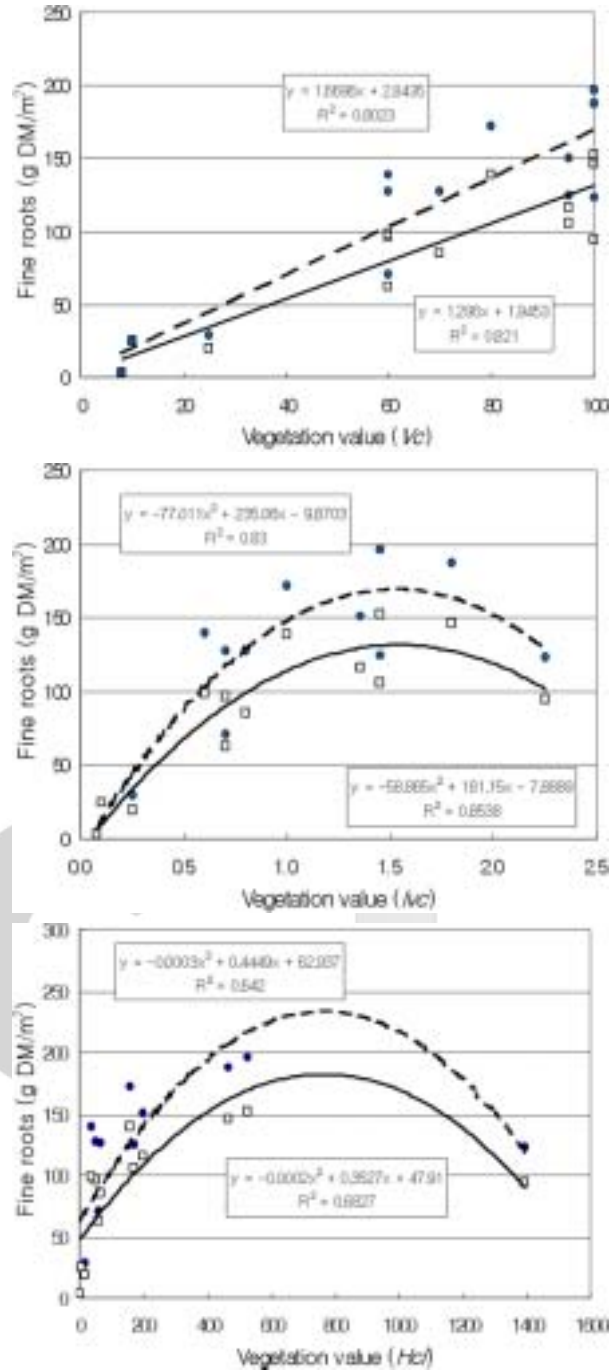


Fig. 1. Relationships between the vegetation values and the fine roots of the topsoil (< 15 cm) in the naturally regenerated sites after forest fire (n = 13, ● fine roots (< 5 mm), □ smaller fine roots (< 2 mm).

하인 곳에서는 50 g DM/m² 이하를 나타내었고, I_{vc} 가 0.5~1.0인 곳에서는 50~100 g DM/m²을 나타내었으며, I_{vc} 가 1.5 부근에서 150 g DM/m² 내외로 정점을 이룬 뒤 I_{vc} 2.0 이상에서 100 g DM/m² 내외로 감소하였다. 식생치 H_{cl} 과 세근의 관계는 I_{vc} 와 세근의 관계와 비슷한 패턴을 나타내었다. 식생 발달의 초기에

는 *Hcl*이 증가함에 따라 세근의 양이 증가하지만 *Hcl*이 800이상이면 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 종합하면 산불 후 식생이 발달하는 지역에서 세근의 발달 정도를 예측할 수 있는 가장 좋은 식생치는 *Ivc*라고 할 수 있다.

산불 후 경과 년 수에 따른 세근량의 변화

Fig. 2는 Fig. 1에서 제시된 식생치 *Ivc*와 세근의 관계식을 이등(2004)이 제시한 시간 경과에 따른 *Ivc*의 변화 모형에 적용하여 산불 후 방치된 지역에서 예상되는 산불 후 경과 년 수에 따른 세근량의 변화를 추정한 것이다. 대체적으로 식생 발달의 초기 단계에서는 식생의 발달과 더불어 세근의 양이 증가하지만 일정 시점이 지나면 세근의 양이 감소하는 경향이 있었다. 이와 같이 식생발달의 초기 단계에서 식생의 발달에 따라 세근의 양이 증가하고 후기단계에서 세근의 양이 감소하는 이유는 식생의 발달과정에서 식생치에 미치는 초본과 목본의 기여도가 달라지기 때문이다. Fig. 3은 동해안 산불 피해지에서 식생치

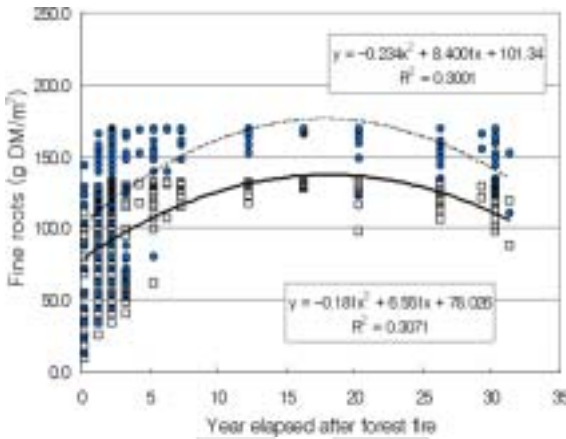


Fig. 2. Change of fine roots (g DM/m²) of the topsoil (< 15 cm) in the naturally regenerated sites after forest fire (n = 267, ● below than 5 mm, □ below than 2 mm).

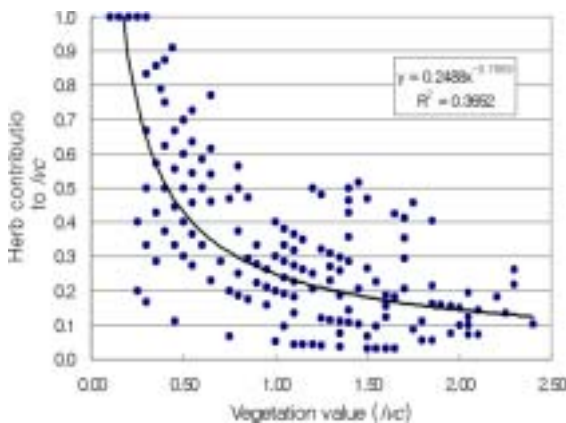


Fig. 3. Relationship between the vegetation value (*Ivc*) and ratio of herb contribution to the vegetation index (*Ivc*) in the naturally regenerated sites after forest fire.

*Ivc*의 발달에 따른 식생치 *Ivc*에 대한 초본의 기여 비율을 살펴본 것이다. 일반적으로 식생 발달의 초기 단계에서는 빛 자원이 풍부하기 때문에 초본이 발달하거나 초본과 목본이 동반하여 발달하게 되고, 후기 단계에서는 아교목층과 교목층으로 성장한 목본에 의해서 지표면에서 이용할 수 있는 빛의 양이 감소하기 때문에 초본의 발달이 저해를 받고 목본의 성장에 의해 식생 지수에 대한 기여도에서 목본이 압도적으로 커지게 된다(이 1995, Tilman 1988, Lee and Kim 1995a, b).

식생 발달에 따른 식생치에 대한 초본 기여율의 변화

Fig. 4는 동해안 산불 피해 지역의 자연 방치지에서 산불 후 시간 경과에 따른 식생치 *Ivc*에 대한 초본 기여도의 변화를 나타낸 것이다. 식생치 *Ivc*에 대한 초본의 기여도는 목본층의 생장이 두드러지는 5~10년 사이에 급속하게 감소하는 경향이 있다. 이는 이 등 (2004)이 산불 후 시간 경과에 따른 식생 구조의 발달에서 산불 경과 후 10년이 경과하면 초본층의 발달이 현저히 둔화된다는 보고와 일치되는 것이다. 산불피해지역에서 특히 지상부의 발달에 비해 세근에 대한 기여도가 큰 식물들은 새, 참억새, 큰기름새, 그늘사초 등의 화본과와 사초과 식물들인데, 이들은 대체적으로 빛 자원이 풍부한 곳에서 왕성한 생장력을 나타낸다(이 1995, 이 2003, Lee and Kim 1995a). 결론적으로 식생치에 대한 목본의 기여도가 커지는 아교목층의 분화 시점까지는 식생의 발달에 따라 세근의 양이 증가하고 그 이후부터는 식생치에 대한 목본의 기여도 증가와 더불어 세근 발달이 왕성한 식물들의 쇠퇴로 인하여 세근의 양이 줄어든다고 할 수 있다. Fig. 2~4의 결과는 산불 피해 지역의 식생 발달 과정에서 특히 산불 초기에 세근 발달의 이질성이 매우 크고 이러한 이질성의 원인을 밝히는 것이 중요하다는 것을 보여 준다(이 등 2004). 산불 피해 지역에서 세근 분포의 이질성은 지형, 토질, 미기후 등의 영향으로 각 미소지소마다 식생 재생의 정도와 속도에서 차이가 나고, 또한 지상부 식생이 같은 식피율로 회복된다고 하더라도 초본과 목본의 재생 기여도가 미소지소에 따라 큰 차이

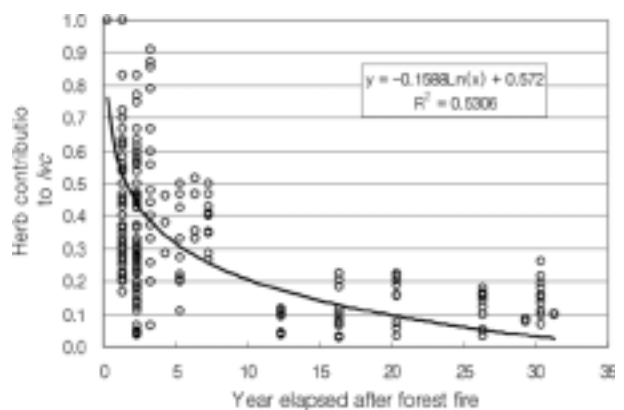


Fig. 4. Change of the ratio of herb contribution to vegetation value (*Ivc*) in the naturally regenerated sites after forest fire (n = 267).

를 나타내고 있기 때문이다.

벌목조림 후 인위적으로 관리되는 지소에서 식생치와 세근 사이의 관계

Fig. 5는 산불 피해 후 화재목을 벌목하고 소나무를 식재한 다음 1년에 두 차례씩 하에작업을 수행하는 벌목 조림지에서 세 가지 식생치에 따른 세근의 변화를 나타낸 것이다. 모든 식생치와 세근의 관계는 식생의 발달에 따른 세근의 직선적인 증가

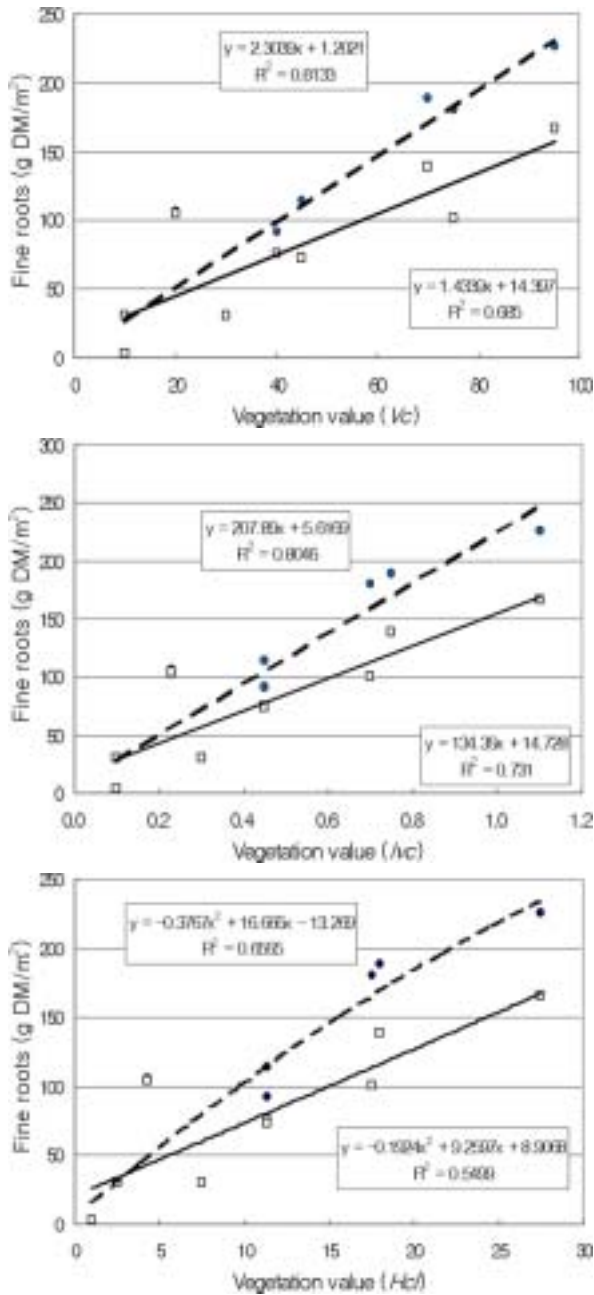


Fig. 5. Relationships between vegetation values and the fine roots of the topsoil in the planted sites after forest fire (n = 9, ● fine roots (< 5 mm), □ smaller fine roots (< 2 mm)).

경향을 나타냈는데, 자연 방치지에서와 마찬가지로 식생치 Ivc와 세근의 관계가 가장 밀접한 관계를 가지고 있었다. 따라서 산불 피해 지역에서 세근의 분포를 예측하는 데 가장 적합한 식생치는 Ivc라고 할 수 있다. Table 1은 Fig. 1과 Fig. 5에서 제시된 식생치 Ivc와 세근과의 관계식을 이용하여 산불 피해 초기의 자연 방치지와 벌목 조림지에서 식생치 Ivc에 따른 세근의 발달 상태를 예측한 것이다. 일반적으로 산불 후 경과 년 수가 같다면 인위적으로 지상부 식생(혹은 임상식생)이 주기적으로 제거되는 벌목 조림지보다 자연 방치지에서 지상부 식생 구조의 발달 상태가 양호하다. 즉, 산불 후 경과 년 수가 같고 입지 조건이 비슷하다면 자연 방치지의 식생치 Ivc가 벌목 조림지의 그것보다 크다 (환경부 2002, 김 2003, 이 2003, 행정자치부 국립방재연구소 2003, 소방방재청 국립방재연구소 2004). 따라서 산불 후 경과 년 수가 같고 입지조건이 비슷하다면 자연 방치지의 세근이 벌목 조림지의 그것보다 더 많이 분포하게 된다. 이(2003)는 강원도 강릉시 사천면의 동일 유역에서 산불 발생 2년이 경과한 시점에서 자연 방치지와 벌목 조림지의 식생치 Ivc를 비교하였는데, 자연방치지와 벌목조림지의 Ivc의 평균값이 각각 0.99 ± 0.25 와 0.46 ± 0.22 이었다. 이를 기준으로 산불 피해 후 2년이 경과한 시점에서 자연 방치지와 벌목 조림지의 2 mm 이하의 세근량을 추정해 보면 각각 113.8 g/m^2 과 76.5 g/m^2 이 된다. 벌목 조림지의 지상부 식생 구조의 발달 상태를 나타내는 식생치 Ivc는 자연 방치지의 0.45배인데 반해 지하부 식생의 상태를 나타내는 세근량은 자연 방치지의 0.67배이다. 즉, 자연 방치지와 벌목 조림지의 지하부 식생은 지상부 식생보다 차이가 적다. 그 이유는 벌목 조림지에서 주기적으로 행해지는 하에작업은 지상부 식생만을 제거하고 지상부 식생의 제거는 지표면으로의 빛을 유입시켜 세근에 대한 기여도가 높은 초본의 성장을 촉진시키기 때문으로 풀이된다(이 2003). 주기적인 하에작업이 진행되는 벌목 조림지의 식생치 Ivc가 자연 방치지의 그것과 같다면 지표면의 빛조건이 상대적으로 유리하여 초본의 침투가 용이한 벌목 조림지의 세근량이 자연 복원지의 세근량보다

Table 1. Comparison of fine roots (g DM/m²) in the naturally regenerated sites (BN) and in the planted sites (BP) according to the vegetation development after forest fire

Vegetation value (Ivc)	Fine roots (below than 5 mm)		Fine roots (below than 2 mm)	
	BN	BP	BN	BP
0.2	34.1	47.2	26.0	41.6
0.4	71.8	88.8	55.2	68.5
0.6	103.4	130.4	79.6	95.4
0.8	128.9	171.9	99.4	122.2
1.0	148.2	213.5	114.4	149.1
1.2	161.3	255.1	124.7	176.0

많아진다 (Table 1).

녹화 사방지에서 식생치와 세근 사이의 관계

산불 피해 지역에서 화재목과 재생하는 모든 식생을 제거하고 세근 발달이 왕성한 새를 중심으로 한 화분과 식물과 질소 고정 식물인 물오리나무의 종자를 파종한 녹화 사방지에서 식생치 Vc 와 Ivc 는 세근과의 상관이 매우 낮았다. Fig. 6은 녹화 사방지에서 식생치 Hcl 과 세근량의 관계를 나타낸 것으로 식생 발달의 초기 단계에서는 Hcl 의 증가에 따라 세근량이 증가하다가 식생치 Hcl 에 대한 목본층의 기여도가 커짐에 따라 다소 세근량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 녹화 사방지에서는 자연 방치지와 벌목 조림지와는 달리 대부분의 뿌리가 2 mm 이하이었기 때문에 5 mm 이하의 세근량과 2 mm 이하의 세근량의 차이가 없었다. 이 것은 가는 세근을 주로 발달시키는 새 등의 화분과 식물이 녹화 사방지의 세근 발달에 대한 기여도가 매우 크기 때문이다. Fig. 7은 녹화 사방을 시행한 시기에 따른 세근의 발달을 나타낸 것으로 녹화 사방을 한 다음해에는 약 200 g DM/m²의 2 mm 이하의 세근량이 그리고 2년이 경과하면 약 800 g DM/m²의 세근량이 분포하게 된다. 앞서 살펴본 자연 방치지와 벌목 조림지에서 2 mm 이하 세근량의 최대값이 150 g DM/m² 내외라는 점을 생각해 보면 녹화 사방지의 세근량의 발달이 매우 빠르고 크다는 것을 알 수 있다. 녹화 사방지에서 2년이 경과한 시점에서 확인할 수 있는 800 g DM/m²의 세근량은 지표면으로부터 약 10 cm 깊이까지 2 mm이하의 세근이 매트를 이룰 수 있는 양이다(현장관찰). 따라서 산불 피해 지역에서 행해지는 녹화 사방 사업은 지상부 식생의 발달과 더불어 지하부 식생의 빠른 회복을 통하여 토양 안정성을 회복시키는 작업이라고 할 수 있다(행정자치부 국립방재연구소 2001).

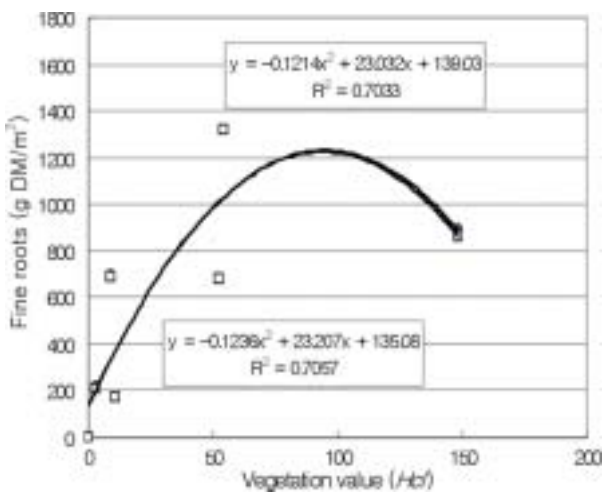


Fig. 6. Relationship between vegetation value and fine roots of the topsoil in the terrace seeding work sites after forest fire (n = 7, ● fine roots (< 5 mm), □ smaller fine roots (< 2 mm).

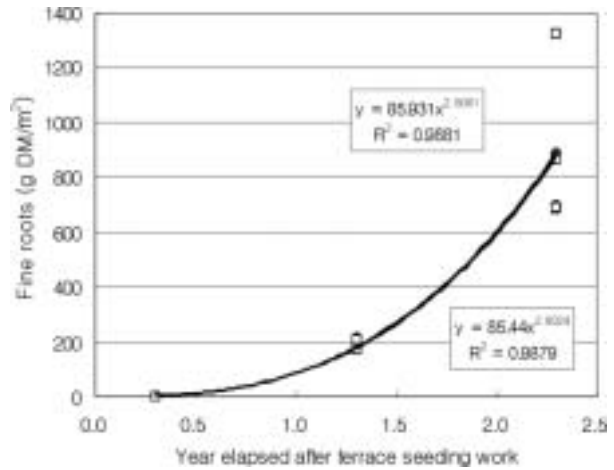


Fig. 7. Relationship between years elapsed after terrace seeding work and fine roots of the topsoil in the terrace seeding work sites after forest fire (n = 7, ● fine roots (< 5 mm), □ smaller fine roots (< 2 mm).

종합 논의

산불 피해 후 2~3년이 경과한 동해안 산불 피해 지역의 자연 복원지와 벌목 조림지에서 지표면으로부터 15cm 이내에 분포하는 5 mm 이하인 세근의 양은 3~226 g DM/m²의 범위를 그리고 2 mm 이하인 세근의 양은 3~166 g DM/m²의 범위를 나타내어 매우 큰 공간적 이질성을 나타내고 있었다(Fig. 1과 Fig. 5). 이러한 세근 분포의 공간적 이질성은 산불 후 재생되는 지상부 식생의 이질적인 공간 분포와 매우 밀접한 관련을 나타내었다. 또한 녹화 사방 후 2년이 경과한 시점에서 녹화 사방지의 표토 15 cm 이내에 분포하는 2 mm 이하인 세근의 양은 680~1,320 g DM/m²의 범위를 나타내었다(Fig. 7). Jackson 등(1997)은 전 세계에 분포하는 주요 10개 군계에서 2 mm 이하의 세근량을 조사하였는데, 온대 산림지역에서 2 mm 이하의 세근량은 440~500 g DM/m²의 범위를 나타내고 표토 30 cm 이내에 분포하는 세근의 비율이 45~63%에 이른다고 하였다. 또한 온대 초원지역에서 2 mm 이하의 세근량은 950 g DM/m² 내외이고, 표토 30 cm 이내에 분포하는 세근의 비율이 83%에 이른다고 하였다. 이를 근거로 온대 산림지역의 표토 30 cm 이내에 분포하는 2 mm 이하의 세근의 양을 추정하면 225~280 g DM/m²의 범위를 나타내고, 온대 초원지대의 그것은 789 g DM/m² 내외라고 할 수 있다. Kwak과 Kim(1994)은 서울 근교의 신갈나무와 상수리나무 숲에서 2 mm 이하 세근의 공간 분포 조사를 통하여 신갈나무와 상수리나무 숲의 총 세근의 양이 각각 447 g DM/m²과 654 g DM/m²이었으며, 표토로부터 20 cm 이내에 분포하는 세근의 양이 각각 270 (73%)과 313 g DM/m² (55%)이라고 하였다. 또한 Kwak과 Kim (1994)은 세근량이 지상부 식생이 활발하게 자라는 시기인 6월에 최고치를 보인 후 지상부 식생의 발달이 안정화되는 시기인 7월과 8월에 감소하고, 그러한 변화 경향은 토양의 무기질소량과 함수량의 변화와 관련이 있다고 하였다. 이러한 결과와 본

연구 조사지의 결과를 비교하면, 산불 피해 초기의 자연 복원지와 벌목 조림지에서 2 mm 이하인 세근의 양은 성숙한 참나무 숲에서 분포하는 세근량의 50% 내외에서 지상부 식생의 발달 정도에 따라 공간적으로 매우 다양하게 분포하고, 녹화 사방지의 세근의 분포는 성숙한 온대 초원의 그 것보다 다소 많은 양이 분포한다고 할 수 있다.

결론적으로 토사 유출이나 강우 유출의 위험성이 큰 산불 천이 초기 단계에 있는 산불 피해 지역의 지하부 식생은 지상부 식생과 마찬가지로 산불 전 식생의 종류, 산불의 피해 강도, 산불 후 재생의 속도, 재생하는 식물의 종류, 산불 이후의 복구 및 관리방법, 미지형, 토양 등에 따라 공간적으로 이질적인 분포 패턴을 나타내고 있다고 할 수 있다(이 등 2004). 또한 산불 피해 지역에서 지하부 식생(세근 양의 분포)은 산불 이후 재생하는 지상부 식생의 발달상태와 밀접한 연관성을 나타내므로 자연 방치지와 벌목 조림지에서는 지상부 식생의 발달상태를 나타내는 식생치 I_{vc} 를 이용하여 그리고 녹화 사방지에서는 녹화 사방을 한 시점으로부터 경과한 시간을 이용하여 표토에 분포하는 세근량의 추정이 가능하다고 할 수 있다.

적 요

산불 피해지에서 지상부 식생 구조와 표토층(< 15 cm)에 분포하는 세근의 관계를 분석하여 지상부 식생 구조를 이용한 표토층 세근의 예측 모형을 구하였다. 산불 피해지의 산불 초기에 지상부 식생과 마찬가지로 표토층에 분포하는 세근량(FRT)도 공간적 이질성을 나타내고 있었다. 산불 후 초기 3년차 이내의 표토층에 분포하는 2 mm 이하의 세근량은 3~166 g DM/m²을 나타내었다. 산불 피해 후 자연 복원지와 벌목 조림지 모두에서 FRT는 지상부 식생 구조를 나타내는 식생치(특히 I_{vc})와 매우 밀접한 관련성을 보여주었다. 산불피해 후 녹화사방한 지소의 FRT는 녹화 사방한 해로부터의 경과 년 수와 매우 밀접한 관련성을 나타내었다. 녹화 사방지의 FRT는 자연 복원지나 벌목 조림지에 비해 훨씬 많았는데, 그 이유는 뿌리의 발달이 왕성한 협엽성 초본의 왕성한 성장 때문이었다. 자연 복원지에서 지상부 식생지수(I_{vc})의 증가에 따른 FRT의 변화는 I_{vc} 의 증가에 따라 포물선의 형태로 증가하는 2차 함수식으로 나타낼 수 있었다. 산불피해지에서 지상부 식생 지수(I_{vc})는 시간 경과에 따라 로그 함수적으로 증가하지만, FRT는 산불 피해 후 초기 15년차까지는 증가하지만 그 이후에는 다소 감소할 것으로 예측되었다. 지상부 식생구조가 발달한 산불 피해지의 천이 후기 단계에서 FRT의 감소는 식생지수(I_{vc})에 대한 목본종의 기여도가 뿌리의 발달에 기여도가 큰 초본의 기여도보다 커지기 때문이다. 결론적으로 산불 피해지에서 FRT의 예측에 지상부 식생치(I_{vc})를 이용할 수 있다.

감사의 글

본 연구를 위하여 연구비를 지원해준 소방방재청 국립방재

연구소와 한국환경기술진흥원에 깊은 감사를 드립니다. 또한 현장조사를 수집하고 정리하는데 도움을 주신 강릉대 생물학과 생태학실원들께도 깊은 감사를 드립니다.

인용문헌

- 김석철. 2003. 산불피해지역에서 재생된 식생이 토사유출에 미치는 영향. 강릉대학교 이학석사학위논문. 66 p.
- 박상덕, 신승숙, 이규송. 2005. 산불지역의 유출 및 토양침식 민감도 한국수자원학회논문집 38: 59-71.
- 소방방재청 국립방재연구소. 2004. '04년도 산지시험유역 운영을 통한 토사재해 저감효과 분석. 143 p.
- 이규송, 정연숙, 김석철, 신승숙, 노찬호, 박상덕. 2004. 동해안 산불 피해지에서 산불 후 경과 년 수에 따른 식생 구조의 발달. 한국생태학회지 27: 99-106.
- 이규송. 1995. 진부(강원도 평창군) 일대 화전 후 목밭의 식생 천이 기구. 서울대학교 이학박사 학위논문. 237 p.
- 이도형. 2001. 독일가문비(*Picea abies* L.)의 지상부와 지하부 생체량에 관한 연구: 흉고직경에 의한 뿌리생체량 추정. 한국임학회지 90: 338-345.
- 이성학. 2003. 산불 피해 지역에서 산불 후 관리방법이 식물군집의 재생에 미치는 영향. 강릉대학교 교육대학원 교육학석사학위논문. 41 p.
- 이인모, 성상규, 임충모. 1991. 뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구. 대한토질공학회지 7: 51-66.
- 조주형, 이종성. 2000. 식생뿌리의 전단강도 보강에 의한 사면안전을 해석: 잣나무뿌리를 중심으로. 한국조경학회지 27: 80-93.
- 차두송, 지병운. 2003. 수목의 근계구성에 따른 사면의 붕괴방지효과에 관한 연구(III): 잣나무뿌리의 공간분포. 한국임학회지 92: 33-41.
- 행정자치부 국립방재연구소. 2001. 강원도 산불지역 재해의 저감대책 수립. 343 p.
- 행정자치부 국립방재연구소. 2003. 산지지역 우수 및 토사유출량 관측 및 저감대책 수립. 173 p.
- 환경부. 2002. 동해안 산불지역 생태계 변화 및 복원기법 연구. 244 p.
- Choung, Y., B.C. Lee, J.H. Cho, K.S. Lee, I.S. Jang, S.H. Kim, S.K. Hong, H.C. Jung and H.L. Choung. 2004. Forest response to the large-scale east coast fires in Korea. Ecol. Res. 19: 43-54.
- Curt, T. and B. Prevosto. 2003. Rooting strategy of naturally regenerated beech in Silver birch and Scots pine woodlands. Plant Soil 255: 265-279.
- Gyssels, G. and J. Poesen. 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. Earth Surface Processes Landforms 28: 371-384.
- Jackson, R.B., H.A. Mooney and E.-D. Schulze. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 94: 7362-7366.
- Kwak, Y.S. and J.H. Kim. 1994. Spatial distribution of fine roots in *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima* stands. Korean J. Ecol. 17: 113-119.
- Lane, L.J., M.H. Nicholls, L.R. Levick and M.P. Kidwell. 2001. A simulation model for erosion and sediment yield at the hillslope scale. In: Haron, R. S., Doe, W.W. III, Landscape erosion and

- evolution modelling. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 201-237.
- Lee, K.S. and J.H. Kim. 1995a. Seral changes in floristic composition during abandoned field succession after shifting cultivation. Korean J. Ecol. 18:275-283.
- Lee, K.S. and J.H. Kim. 1995b. Seral changes in environmental factors and recovery of soil fertility during abandoned field succession after shifting cultivation. Korean J. Ecol. 18: 243-253.
- Morgan, R.P.C. 1996. Soil erosion and conservation. 2nd ed. Longman Group, London. 198 p.
- Schmidt, J. 2000. Soil erosion: Application of physically based models. Springer-Verlag, Berlin. 318 p.
- Tilman, D. 1988. Plant strategies and the dynamic and structure of plant communities. Princeton University Press, Princeton, N.J. 360 p.
- Toy, T.J., G.R. Forster and K.G. Renard. 2002. Soil erosion: Processes, prediction, measurement and control. John Wiley & Sons, Inc., New York. 338 p.
- (2005년 4월 15일 접수; 2005년 5월 30일 채택)

K C I