

산불피해지에 식재 조림된 소나무임분의 시비처리에 따른 소나무 묘목의 생장, 토양특성 및 하층식생 구조의 변화

원형규¹ · 이윤영^{1*} · 정진현¹ · 구교상¹ · 이충화¹ · 이승우¹ · 정용호¹ · 김춘식² · 김형호³

¹국립산림과학원 산림환경부, ²진주산업대학교 산림자원학과,

³국립산림과학원 산림경영부

Fertilization Effects on Soil Properties, Understory Vegetation Structure and Growth of *Pinus densiflora* Seedlings Planted after Forest Fires

Hyung-kyu Won¹, Yoon Young Lee^{1*}, Jin-Hyun Jeong¹, Kyo-Sang Koo¹, Choong-Hwa Lee¹, Seung-Woo Lee¹, Yong-Ho Jeong¹, Choonsig Kim² and Hyungho Kim³

^{1,3}Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Department of Forest Resources, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

요 약: 본 연구는 강원도 고성지역의 산불피해지에 소나무묘목 식재 후 시비처리 [무시비구(대조구), CF처리(Combination Fertilizer; 복합비료), UF처리(Urea Formaldehyde Fertilizer; 산림용고형복합비료)]에 의한 식재묘목의 생장반응 및 토양 특성과 하층식생의 변화를 조사하였다. 식재된 소나무묘목은 시비처리 후 4년간 수고와 근원경의 상대생장에 있어서 식재초기에 비해 무시비구, CF처리구, UF처리구가 각각 264%, 404%, 388%와 339%, 454%, 427% 증가하여 무시비 구에 비해 시비처리구의 생장이 높았다($p < 0.05$). 4년간 시비처리에 의한 토양 이화학적 특성 변화는 시비성분에 포 함된 원소 가운데 질소와 칼륨은 모든 시비구에서 거의 변화가 없어 시비처리에 영향을 받지 않았으나 유효인산은 무시비구보다 시비처리구에서 증가하였다. 또한 유기물은 소나무식재묘가 양호한 생장을 보인 CF처리구와 UF처리 구가 증가하였으나, 무시비구에서는 감소하였으며, 나트륨은 모든 처리구에서 감소하였다. 토양 pH, 양이온치환 용량, 칼슘, 마그네슘 함량은 4년의 조사기간 동안 뚜렷한 변화가 없었으며 처리구간 차이도 없었다. 3년간의 시비 처리에 의한 하층식생의 구조는 종다양성과 종풍부도에서 큰 변화가 없었으나 하층식생의 피도와 유기물층의 피도 는 현저히 증가하여 토양 안정화에 크게 기여한 것으로 나타났다. 따라서 향후 산불피해지의 신속한 산림생태계 회복을 위해서는 산지시비 같은 산림관리기술의 도입이 필수적인 것으로 사료된다.

Abstract: This study was to investigate the growth of planted red pine (*Pinus densiflora* S. et. Z.) seedling, soil properties and understory vegetation structure after fertilizer treatments [unfertilized plot (control), CF plot (Combination Fertilizer), UF plot (Urea Formaldehyde Fertilizer)] in a *Pinus densiflora* stand planted after the forest fires in Gosung, Gangwon province. The height growth rates of seedlings in four years were 264% in unfertilized, 404% in CF, and 388% in UF plots, respectively. The root collar diameters were increased 340% in unfertilized, 454% in CF, and 427% in UF plots, respectively. No significant changes occurred in soil total nitrogen and potassium ion (K^+) with the fertilization. However, available P_2O_5 content in the soil surface (0-15 cm) increased with the fertilizer application. Soil organic matter increased significantly with fertilizer treatments, while gradual decrease occurred in unfertilized plots. Sodium ion (Na^+) decreased in all sites. Soil pH, CEC, calcium ion (Ca^{2+}) and magnesium ion (Mg^{2+}) contents were not significantly different among treatments. Although Shannon's species diversity index and species richness in understory vegetation did not change with fertilizer treatments, vegetation cover rates in forest floor increased significantly with the fertilization. These results suggest that the increase of pine seedling growth and vegetation cover rates with fertilization could enhance soil stabilization in forest fire areas.

Key words : fertilization, forest fire, soil properties, species diversity, *Pinus densiflora*

*Corresponding author
E-mail: calanthe@empal.com

서 론

산불은 산림생태계의 식생, 동물상, 토양미생물상, 토양 성질 등 생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치며, 이들 영향의 정도와 기간은 산불 강도, 온도, 산불 빈도, 토양형, 수분, 식생의 종류나 양, 지형, 산불 기간, 산불 전 후의 기상조건 등에 따라서 달라진다(김종갑과 오기철, 2001; Doerr와 Cerda, 2005; Giacomo, 2005). 특히 산불은 토양입자 결합력의 안정성, 공극의 크기와 분포, 수분반발력과 표면 유출수 반응 같은 토양의 물리적인 성질이나, 양분 유효도와 무기화율, 토양 pH, 토양 C:N비율 등과 같은 토양 화학적 성질, 생산력, 미생물 구성원과 탄소흡수 등 토양 생물학적 성질에 다양한 변화를 일으킬 수 있으며(Certini, 2005; Doerr와 Cerda, 2005), 식물생육을 위한 필수 원소가 산화 또는 휘산될 수 있기 때문에 토양의 생산력이나 계류수질을 악화시킬 수 있다(DeBano 등, 1998; Belinlla와 Feller, 1998). 또한 산불은 지구온난화의 주 원인 물질인 이산화탄소의 배출원으로 작용할 수 있어, 최근에는 산불방지나 산불피해지의 탄소 흡수원 증진 등에 대한 관심과 함께 피해지의 신속한 회복을 통한 탄소 흡수원 확충에 노력을 기울이고 있다. 산불은 생태계의 모든 구성요소를 다양하게 변화시키지만 이러한 특성들의 변화가 산불 이전으로 회복되기 위해서 무엇보다도 중요한 것은 식생에 의한 임지의 신속한 피복과 그로인한 지표의 안정화이다(Giacomo, 2005).

우리나라의 산불 빈도와 피해 면적은 1980년대 2,118건(10,880 ha), 1990년대 3,362건(13,975 ha), 2000년대 2,384건(31,516 ha)으로 발생 빈도와 면적이 지속적으로 증가하고 있으며, 산불 건당 피해면적도 점차 대형화되고 있는 추세이다(산림청, 2000). 이 가운데서도 강원도 동해안 지역은 1996년과 2000년에 발생한 대형 산불로 인하여 많은 면적의 산림이 피해를 입었으며, 2차례의 대형 태풍(2001년 루사, 2002년 매미)에 의하여 산사태 피해를 받아 식생의 회복이 현저히 지연되고 있는 상태이다. 현재 강원도 산불피해지는 산불 피해 후 2차 피해를 줄이고 신속한 복원을 위해 넓은 면적에서 인공조림이 실시되고 있는데, 대부분은 지역 특성상 송이생산을 위한 소나무조림 위주로 이루어지고 있다. 그러나 이 지역의 기후는 봄철 Föhn 현상과 해풍의 영향이 심하고 여름철에 집중강우가 내리기 때문에 조림목의 활착과 생장에 불리한 환경을 가지고 있어 신속한 임지회복을 위해서는 집중적인 산림사업관리가 이루어져야 한다. 일반적으로 유령림의 시비는 양분부족으로 묘목생장이 불량하거나 묘목의 초기생장이 급속히 요구되는 지역에 식재목의 활착을 촉진시키고 생장을 왕성하게 하여 표토의 침식이나 양분의 유실을 최소화하는데 목적이 있으며 산불피해지 같이 연약한 산림생

태계의 경우 식생 및 토양의 안정적인 회복을 위하여 산지시비 같은 토양 양분관리가 중요한 사항으로 인식되고 있다.

강원도 고성지역은 대형 산불 발생 이후 많은 연구자들의 관심이 집중되어 다양한 연구가 수행되었으나 대부분 산불피해에 대한 단기간의 영향에 국한되고 있다(문형태와 정연숙, 1996; 이원규 등, 1997; Kim 등, 1999; 이창우 등, 2004). 또한 산불피해 후 토양특성이나 식생구조의 변화(우보명 등, 1983; 우보명 등, 1985; 우보명과 이현호, 1989; 심학보와 김원, 1998; Trammell 등, 2004)에 대한 많은 국·내외 연구가 있으나 산불피해지에서 조립 후 시비처리에 의한 조림목의 생장 반응, 토양특성 변화, 식생구조 변화에 대한 다년간의 연구 결과가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 강원도 고성산불피해지내 소나무 인공조림지의 식생회복 및 조림목의 생장촉진 그리고 지표안정화를 위한 시비 후 소나무의 생장반응, 토양특성 그리고 하층식생의 변화를 알아보기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

1. 조사지개황

연구 대상지는 강원도 고성군 죽왕면 구성리(N: 38° 19' 27.6", E: 128° 29' 38.7")에 위치하고 있다. 이 지역의 최근 30년간(1971-2000년) 년평균 기온은 12.1°C, 강수량은 1342.4 mm이며(기상청, 2005), 연구기간이 포함되는 2001-2004년의 년평균 기온은 12.3°C, 평균 강수량은 1549.9 mm로 최근 30년 동안의 기온보다 약간 높고 많은 강수량을 보였는데, 이는 최근 고온현상 및 지역적인 집중강우와 같은 기후변화의 영향으로 판단된다. 연구대상지의 지형은 해발고 35-40 m, 경사 10-15°, 완구릉지의 능선과 인접한 남서사면에 위치하고 있다. 이 지역은 1996년과 2000년 실화에 의한 대형 산불이 발생하여 피해 면적이 1996년과 1997년에 각각 3,762 ha, 2,696 ha로서(산림청 2000) 2차례에 걸쳐 발생한 산불피해로 대부분의 식생과 유기물층이 파괴된 상태이며, 일부는 강우에 의하여 토양침식이 발생하고 있다. 연구지의 식생은 산불 이전에는 소나무순림으로 구성되어 있었으며 2차례의 산불피해 후인 2000년 4월에 소나무용기묘 4년생을 약 6,000본/ha의 밀도로 식재한 상태이다.

2. 조사방법

1) 조사구 설치 및 시비처리

시비처리에 따른 임목생장 반응, 토양특성 변화, 식생구조의 변화 등을 조사하기 위하여 소나무 용기묘식재지 내에 총 9개의 조사구(10 m×10 m)를 설치하고 시비처리를 실시하였다. 시험구는 3개의 block을 가지는 난괴법

(Completely Randomized Block Design)으로 배치하였으며, 각 block은 무시비구(대조구), CF처리구(Combination Fertilizer; 복합비료), UF(Urea Formaldehyde Fertilizer; 산림용고형복합비료)처리구를 포함하도록 하였다. 시험구는 맹아생장이 왕성하여 맹아제거 및 임내정리를 실시하고 각 시험구로부터 임의로 20본(총 180본)의 묘목을 선발하여 근원경 및 수고를 측정하였다. 시비량은 N:P:K=30:40:10 kg/ha으로 잣나무 성숙목에 대한 시비기준량인 N:P:K=90:120:30 kg/ha의 1/3수준에 해당하며(산림청 2001), 시험구내에는 요소(Urea) 652 g/100 m², 용과린(Fused superphosphate) 2,000 g/100 m², 황산칼륨(K₂SO₄) 200 g/100 m²을 손으로 골고루 표면살포 하였으며, UF처리구(N:P:K=12:16:4)는 시험구당 2,500 g/100 m²을 살포하였다. 시비처리는 2001년부터 2003년까지 매년 4월에 같은 양을 3년 연속으로 처리하였으며, 2004년부터는 시비처리를 수행하지 않았다.

2) 소나무묘목의 성장반응 조사

소나무묘목의 수고측정과 근원경 측정은 2001년부터 2005년까지 매년 5월 초에 실시하였다. 수고측정은 막대자를 이용하여 1 cm단위까지 그리고 근원경측정은 버니어캘리퍼스를 사용하여 0.1 mm단위까지 측정하였다.

3) 토양이화학성 분석

토양의 이화학성 분석을 위한 시료는 시비처리 전인 2001년 5월과 매년 시비처리 직전에 채취하였으며, 각 조사구 내에서 토양 0-15 cm깊이까지 3개의 시료(총 27점)를 채취하여 음건 후 토성, 유기물, 전질소, 유효인산, 양이온치환용량, 치환성양이온 등의 분석에 이용하였다. 토성은 비중계법, pH는 pH meter(Orion 720A)를 이용하여 1:5중류수법으로 측정하였으며, 전질소 함량은 Kjeldahl법, 유기물함량은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 측정하였다. 양이온치환용량은 Brown법으로 측정하였으며, 치환성양이온인 칼슘과 마그네슘은 EDTA법 그리고 나트륨과 칼륨은 flame photometer를 이용하여 측정하였다(농업기술연구소, 1988).

4) 하층식생 구조

시비처리에 대한 하층식생의 구조를 조사하기 위해 2005년 8월중 초본층의 종풍부도, 종다양성, 식생피도, 유기물층의 피도를 조사하였다. 종풍부도와 종다양성지수는 출현 종수와 Shannon's 지수를 사용하여 정량화하였으며(Nagaike, 2002; Swindel 등, 1986), Sannon's 다양성지수는 Ludwig와 Reynolds(1988)의 방정식을 이용하여 계산하였다. 초본층의 종풍부도와 종다양성지수 조사를 위하여 각 조사구 내에 대각선 방향으로 2 m×2 m의 소방형

구를 2 m간격으로 3개씩 설치하고(총 27개 소방형구) 초본층에 출현하는 모든 식물종과 개체수를 기록하였으며, 모든 식물의 동정은 대한식물도감(이창복, 1982)에 따랐다. 식생피도 조사는 전체 수관이 소방형구에서 지면을 덮고 있는 면적을 비율로 산출하였으며, 유기물층의 피도는 소방형구 내에 유기물층이 2cm 이상의 두께로 지표층을 덮고 있는 면적을 비율로 산출하였다.

5) 통계처리

소나무 용기묘의 각 연도별 수고 및 근원경 생장, 종풍부도, 종다양성, 하층식생 피도, 유기물층의 피도 등의 처리별 차이는 SAS의 ANOVA를 이용하여 분석하였다(SAS, 1988).

결과 및 고찰

1. 시비처리에 의한 소나무용기묘의 생장반응

시비처리에 의한 4년생(2000년) 소나무용기묘의 수고 및 근원경생장 변화는 Figure 1과 같다. 소나무의 수고생장은 시비처리 1년 후까지는 무시비구와 큰 차이를 보이지 않았으나 시간이 경과함에 따라 빠른 생장 반응을 보였다. 초기값에 대한 연도별 상대수고생장은 무시비구의 경우 4년 후에 264% 성장하였으나 CF와 UF의 경우에는 각각 404%, 388%가 증가하여 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 시비처리 1년 후에 무시비구와 시비처리구 간에 수고에 차이가 크지 않았던 것은 소나무의 생리적 특성상 줄기생장의 경우 고정생장을 하기 때문으로 판단된다.

소나무의 근원경생장은 수고생장과 비슷한 경향을 나타내 시비 후 1년차에는 무시비구와 처리구 간에 큰 차이를 보이지 않았으나 이후 현저한 차이를 나타냈다. 초기값에 대한 처리구별 상대생장은 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 340%, 454%, 427%로 나타나 CF, UF, 무시비구의 순으로 높았으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 소나무 식재묘의 근원경생장은 시비 2년차부터는 무시비구와 처리구 간에 차이가 현저하였으며, 시비처리구 간에도 CF처리구가 UF처리구보다 유의적으로 높은 근원경 생장을 보였으며 이는 속효성 비료의 특성을 가지는 CF처리구가 완효성인 UF처리구보다는 식재묘의 성장반응에 영향을 크게 미치기 때문으로 사료된다.

산불피해지에 식재된 소나무는 시비처리에 대해 빠른 성장반응을 보이는 것으로 나타났다. 이는 연구대상지가 해안가에 바로 인접하여 바람의 영향을 많이 받고 토양 수분 및 양분의 보유능력이 현저히 떨어지는 조립질 화강암 모재의 사양토가 주를 이루기 때문으로 사료된다. 일반적으로 시비처리에 대한 반응은 비옥한 임지보다도 척

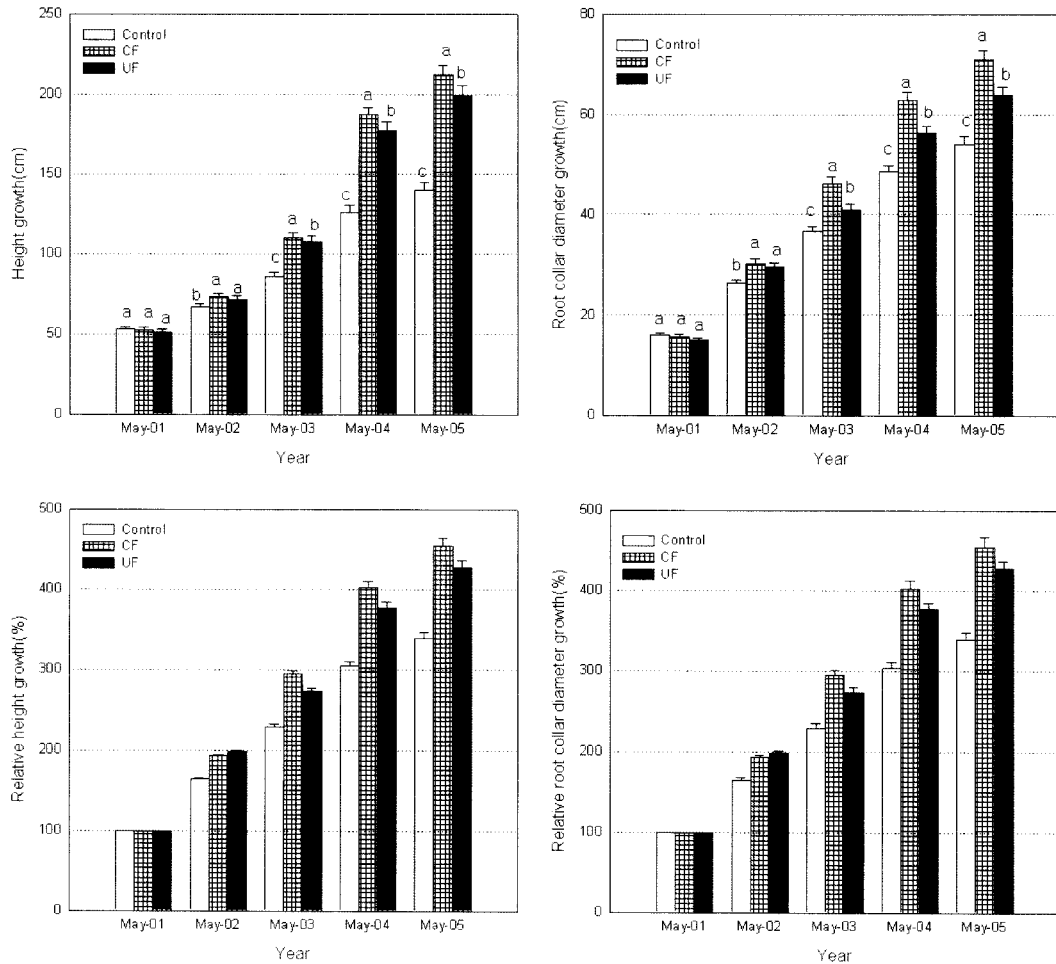


Figure 1. Growth of height and root collar diameter of red pine seedlings following fertilization treatments with different fertilizer types (Control : Unfertilized treatment, CF: Combination Fertilizer treatment, UF: Urea Formaldehyde Fertilizer treatment). Vertical bars represent standard errors. Same small letters do not differ among treatments within fertilizer types ($p < 0.05$).

박한 임지에서 현저하며, 성숙목보다는 유령목에서 효과가 크게 나타난다. 본 연구와 유사한 결과로서 Meyer 등 (2004)은 산불피해지에서 유기질 퇴비(Biosolid)를 5-80 t/ha를 시비처리하고 몇 가지 화분과 식물의 종자를 처리한 결과 가장 많은 유기질퇴비의 처리구에서 높은 건물생산량을 나타낸다고 보고한바 있다. 또한 황정옥 등(2003)은 소나무 묘목에 대한 포트시비 실험에서 비료의 종류와 양을 달리한 결과 시비처리구 간에는 유의한 차이가 없었지만 무시비구에 비해 생체량, 엽면적지수, 엽록소함량 등에서 현저한 차이를 보인다고 하였다. 본 연구 결과는 상대적으로 척박한 산불피해지에서 시비처리가 조립목의 성장을 현저히 증가시키는데 유용한 수단임을 시사한다.

2. 시비처리에 의한 토양 특성 변화

산불발생 임지의 시비처리에 따른 토양특성의 변화는 (Table 1) 시비처리 전인 2001년에 조사한 토양의 입경분포 및 토성의 경우 처리구별로 약간의 차이는 있지만 모래 함량 78.5-86.2%, 미사 함량 6.6-11.2%, 점토 함량

7.2-8.3%인 사양토(Sand Loam)로 나타났다. 처리구별 토양입경의 분포는 무시비구의 경우 시간이 경과함에 따라 모래 함량은 큰 변화가 없었으나 점토 함량은 약간 증가하고 미사함량은 약간 감소한 것으로 나타났다. 그러나 CF와 UF처리구의 경우는 시간이 경과함에 따라 모래 함량은 현저히 감소하였으며, 점토와 미사는 약간 증가한 것으로 나타났다. 이러한 변화는 산불발생 초기단계에 토양이 불안정한 상태였으나 시비처리를 수행한 CF나 UF처리구의 경우 조립목의 빠른 성장과 함께 점차 안정화 단계에 들어선 것으로 사료된다. 이창우(2005)는 고성 산불피해지에서 토사유출량을 조사한 결과 산불피해 후 2년까지 토사유출이 매우 심하며 식생의 피도가 증가함에 따라 3년차부터 점차 안정화 된다고 하였다.

토양 pH는 시험 초기에 무시비구가 시비처리구보다 약간 높았으나 이는 국소적인 지형차이에 의한 장소적 변이로 사료된다. 시간의 경과에 따른 pH의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 이원규 등(1997)은 1996년 고성 산불피해지에서 산불피해지와 비산불피해지의 토양 pH를 분석

Table. 1. Changes of soil properties following fertilization treatments with different fertilizer types.

Treatment	Year	Particle size distribution(%)			pH (1:5)	O.M. (%)	T.N. (%)	Avail. P ₂ O ₅ (ppm)	CEC	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		Sand	Silt	Clay									
Control	2001	78.5ab (1.3)	11.2a (1.0)	10.3a (0.7)	5.44a (0.04)	1.49a (0.18)	0.06a (0.01)	3.39a (0.44)	6.38b (0.55)	0.27a (0.02)	0.15a (0.01)	0.75a (0.08)	0.55b (0.06)
	2002	79.5a (2.3)	14.1a (1.9)	6.4b (0.4)	5.75a (0.00)	0.89a (0.01)	0.06a (0.01)	2.68a (0.10)	6.80a (0.13)	0.34a (0.03)	0.16b (0.00)	0.74a (0.05)	0.78a (0.08)
	2003	-	-	-	5.43a (0.06)	1.21b (0.03)	0.06a (0.00)	7.40a (1.51)	6.60a (0.25)	0.30a (0.02)	0.14a (0.03)	0.44a (0.04)	0.64a (0.07)
	2004	72.3ab (1.2)	18.3a (1.8)	9.4a (0.8)	5.08a (0.02)	0.53a (0.32)	0.07a (0.01)	0.47b (0.25)	5.87a (0.65)	0.29c (0.00)	0.11b (0.00)	0.63a (0.05)	0.39b (0.03)
	2005	75.3a (1.4)	15.3a (1.6)	9.4a (0.2)	5.36a (0.01)	0.73b (0.06)	0.07a (0.01)	1.49b (0.32)	7.33b (0.45)	0.34a (0.01)	0.05a (0.02)	0.72a (0.08)	0.53a (0.10)
CF	2001	86.2a (2.6)	6.6b (1.8)	7.2b (1.0)	5.31b (0.02)	1.28a (0.08)	0.06a (0.01)	2.97a (0.47)	8.73a (0.70)	0.30a (0.00)	0.15a (0.00)	0.55b (0.02)	0.92ab (0.14)
	2002	72.7a (5.1)	18.9a (4.9)	8.5ab (1.0)	5.58b (0.07)	1.16a (0.22)	0.10a (0.04)	2.87a (0.30)	7.77a (0.65)	0.35a (0.04)	0.17ab (0.01)	0.84a (0.14)	0.75a (0.05)
	2003	-	-	-	5.34a (0.08)	2.30a (0.52)	0.07a (0.03)	10.18a (1.86)	7.48a (0.34)	0.41a (0.04)	0.12a (0.01)	0.75a (0.25)	0.76a (0.18)
	2004	75.7a (0.3)	15.7a (0.6)	8.7a (0.7)	5.11a (0.11)	1.08a (0.41)	0.05a (0.01)	13.52a (4.35)	5.79a (0.60)	0.38a (0.01)	0.12ab (0.00)	0.88a (0.17)	0.30b (0.03)
	2005	72.8a (2.1)	17.9a (0.9)	9.3a (1.2)	5.25ab (0.06)	1.46a (0.19)	0.09a (0.01)	7.45ab (1.69)	8.36ab (0.46)	0.41a (0.04)	0.10a (0.01)	0.86a (0.15)	0.68a (0.18)
UF	2001	81.0a (1.2)	10.9a (0.6)	8.1ab (0.8)	5.27b (0.02)	1.17a (0.08)	0.05a (0.00)	4.10a (0.79)	10.49a (0.32)	0.30a (0.01)	0.16a (0.00)	0.49b (0.04)	1.11a (0.20)
	2002	68.4a (2.9)	21.0a (1.7)	10.6a (1.4)	5.34c (0.03)	0.97a (0.11)	0.05a (0.01)	11.32a (5.14)	7.55a (0.19)	0.36a (0.05)	0.19a (0.00)	0.79a (0.05)	0.68a (0.17)
	2003	-	-	-	5.33a (0.10)	1.48ab (0.05)	0.02a (0.00)	12.34a (2.99)	8.21a (0.92)	0.34a (0.05)	0.13a (0.02)	0.61a (0.14)	1.02a (0.27)
	2004	70.7b (1.2)	19.7a (1.3)	9.6a (1.00)	5.16a (0.04)	0.61a (0.17)	0.07a (0.00)	11.39ab (3.50)	5.65a (0.70)	0.32b (0.01)	0.12a (0.00)	0.83a (0.04)	0.96a (0.15)
	2005	74.7a (2.5)	17.1a (1.6)	8.3a (0.8)	5.12b (0.08)	1.96a (0.30)	0.08a (0.01)	17.50a (4.87)	9.24a (0.13)	0.40a (0.06)	0.08a (0.01)	1.03a (0.26)	0.55a (0.11)

The values in parentheses are standard errors. Means followed by the same letter in a given year do not differ at p=0.05. Control : Unfertilized treatment, CF: Combination Fertilizer treatment, UF: Urea Formaldehyde Fertilizer treatment

한 결과 토양 0-5 cm 깊이에서 각각 5.8과 5.2로 보고한 바 있는데, 본 연구결과에서 나타난 5.12-5.44와 비교해 보면 산불발생 초기에 비해 현저히 감소하였으며, 일부는 산불피해 이전의 수준과 유사하였다.

치환성 양이온의 흡착에 중요한 역할을 하며 토양의 생산력을 평가하는 유용한 지표로서 사용되기도 하는 유기물 함량은 초기에 무시비구가 시비처리구보다 약간 높았으나, 무시비구의 유기물 함량은 시간이 경과할수록 지속적으로 감소하는 경향이었으며, 시비처리구에서는 초기에는 약간 감소하다가 식생의 회복과 함께 점차 증가하는 경향이였다. 일반적으로 산불피해 후의 유기물 함량은 재의 첨가, 고사한 뿌리의 분해, 지상부 낙엽·낙지 유입에 의해서 증가하거나 지상부 식생에 의한 낙엽·낙지의 지속적인 유입이 없을 경우 감소의 경향을 나타낸다 (Covington과 Sackett, 1984). 또한 유기물의 연소상태, 재생되는 식생의 회복속도, 토성 등과 같은 토양 요인 등에 의해서 유기물 상태가 좌우되기도 한다(우보명 1985). 본

연구에서 나타난 무시비구의 유기물 함량 감소는 상대적으로 식생의 성장속도가 느리고 침식이 쉽게 일어나는 토양조건이 주된 원인으로 판단된다.

산불발생 직후 토양의 전질소 함량은 유입된 재의 영향으로 크게 증가하였다가 이후 지속적으로 감소하는 경향을 보이며(우보명 1983), 이는 재생되는 식생의 질소 흡수 그리고 용탈이나 탈질화반응에 의한 질소 유출이 원인이다(문형태와 정연숙, 1996). 연구 결과 토양의 전질소 함량은 무시비구와 처리구 간에 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 각 처리별 시간의 경과에 따른 전질소 함량의 변화도 크지 않은 것으로 나타났다. 지속적으로 시비처리를 한 CF와 UF처리구에서도 시비처리에 의해 전질소 함량이 증가하지 않았는데, 이는 비료내 함유된 질소의 경우 대부분 암모니아태질소나 질산태질소 같은 무기질소의 형태로서 시비처리 후 식생에 의하여 흡수 되거나 강우에 의한 용탈, 탈질화반응 등에 의해 쉽게 손실이 발생하기 때문으로 사료된다.

토양중의 유효인산 함량은 시비처리 전에 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 3.39, 2.97, 4.10 ppm으로 연도별 함량 변화는 시비처리구에서 약간 증가하는 경향을 보였으며, 시비처리구 중에서도 CF보다 UF에서 높은 증가율을 보였다. 그러나 무시비구에서는 반대로 감소하는 경향이 있었다. 일반적으로 인은 토양 중에서 쉽게 용탈되지 않는 특성을 보이기 때문에(Kim 등, 1997) 다른 성분에 비하여 시비처리 지역에 식생흡수 후 토양 내 잔존량이 많은 것으로 판단된다.

양이온치환용량은 조사기간 동안 무시비구와 CF, UF처리구에서 각각 6.38-7.33 cmolc/kg, 5.79-8.73 cmolc/kg, 5.65-10.49 cmolc/kg의 범위를 보였으며, 모든 처리구에서 초기에는 점차 감소하다가 4년이 경과한 후에는 약간 증가하거나 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 전 기간 동안 처리별 차이는 CF와 UF처리구에서 높았으나 처리간 유의적인 차이는 없었다($p>0.05$). 그러나 양이온치환용량에 밀접한 상관을 가지는 유기물 함량이 시비처리구에서 지속적인 증가 경향을 보이므로 향후 이들 시비처리구에서 양이온치환용량이 증가할 것으로 사료된다.

치환성양이온 가운데 칼륨은 모든 조사구에서 초기보다 약간 증가하였으나 시기별로는 처리간 차이에 유의성이 없었다($p>0.05$). 토양의 칼륨 함량은 질소와 유사하게 시비처리에 의해 영향을 받지 않는 것으로 나타났는데, 이는 칼륨이 식생에 의해 대부분 흡수되었거나 일부는 강우에 의해 유출되었기 때문으로 판단된다. 나트륨은 무시비구와 처리구에서 전 기간동안 지속적으로 감소하였으며, 토양침식이 많은 대조구에서 감소 경향이 뚜렷하였다. 그러나 연구 4년차에 조사한 나트륨 함량은 처리구간에 차이가 없는 것으로 나타났다. 칼슘은 무시비구의 경우 초기에는 감소하다가 점차 증가하는 경향을 보였으며, 시비처리구는 초기에 비해 증가하는 경향을 보였다. 그러나 4년차에서는 처리구간에 차이가 없는 것으로 나타났다($p>0.05$). 마그네슘은 나트륨과 마찬가지로 모든 조사구에서 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈으나 역시 시기별 처리구 간에 차이는 통계적으로 유의성이 없었다($p>0.05$). 일반적으로 치환성양이온은 높은 온도에 의해서 휘산되지 않기 때문에 산불 피해 후 대부분이 토양 표층에 잔존하지만 이후 바람이나 강우에 의해서 유출되어 급속히 감소하는 경향을 보이는데(우보명, 1989; Meyer 등, 2004), 본 연구에서도 일부 치환성양이온은 시험초기에 비해 계속적으로 감소하는 경향을 보이거나 일부는 약간 증가하는 경향을 보여 원소별로 차이를 나타냈다. 그러나 결과적으로 4년이 경과한 후에 처리별로 큰 차이가 없는 것으로 나타나 시비처리에 의해 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

산불피해 후 토양 특성의 변화는 그 지역의 기후, 지형,

식생의 재생속도, 토양조건 등에 의해서 현저히 달라질 수 있으며, 여러 가지 특성을 종합해 볼 때 일반적인 결론을 내리기가 어렵다. 그러나 재생되는 식생의 발달이 늦고 토양 수분조건이 열악할 경우 산불 직후 유입된 재에 의하여 증가하였던 양분은 용탈현상, 표면 유출수에 의한 침식 등에 의해서 지속적으로 감소하여 식생의 회복을 저해할 수 있다(우보명, 1983; 김종갑과 오기철, 2001; Fisher와 Binkley, 2000; Meyer 등, 2004). 따라서 산불피해지의 신속한 식생회복을 위해서는 시비처리를 통하여 토양 비옥도를 증가시키는 것이 가장 효과적인 것으로 사료된다.

3. 시비처리에 의한 하층식생의 구조 변화

산불은 나지를 형성하여 광 조건이 풍부해지며, 산불에 의해서 유도된 매토종자의 발아로 인하여 종다양성이 증가한다(문형태, 2001; Boerner, 1983). 산불피해지의 신속한 복원을 위해서는 무엇보다도 식생회복을 통한 토양 안정화가 우선으로 식생의 재생속도가 빠를수록 토양침식을 줄이는 효과가 크고 식생에 의한 양분흡수량이 증가하기 때문에 양분 유실을 최소화 할 수 있다(Certini, 2005).

연구 초기의 식생은 열악한 토양조건으로 인하여 매우 빈약한 상태였으며 모든 초본층의 피도는 10% 미만의 대부분 나지상태였다. 자연적으로 출현하는 식생은 상층에서 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*), 굴참나무(*Quercus valvabilis*), 졸참나무(*Quercus serrata*), 물오리나무(*Alnus hirsuta*), 철쭉꽃(*Rhododendron schlippenbachii*), 진달래(*Rhododendron mucronulatum*), 싸리(*Lespedeza bicolor*) 등의 맹아가 주를 이루었으며, 초본층에는 솔새(*Themeda triandra* var. *japonica*), 큰기름새(*Spodiopogon sibiricus*), 애기며느리밥풀(*Melampyrum setaceum*), 애기풀(*Polygala japonica*), 그늘사초(*Carex lanceolata*), 잔대(*Adenophora triphylla* var. *japonica*) 등이 출현하였다.

2005년에 연구대상지에 출현한 하층식생은 총 26종이었으며, 이 가운데 목본은 12종, 초본은 14종으로 나타났다. 처리구별 출현종은 대조구에서 총 17종이 출현하였으며, 이 가운데 교목이 3종, 관목이 2종, 초본이 12종으로 대부분 초본으로 이루어져 있다. CF처리구와 UF처리구에 출현한 총 종수와 교목, 목본, 초본의 수는 각각 11, 2, 0, 9와 12, 2, 1, 9로 나타나 상대적으로 대조구의 종수가 많았다. 조사구에서 출현한 종들은 처리에 관계없이 목본종에는 주로 싸리, 땅비싸리, 철쭉꽃, 진달래, 굴참나무, 아까시나무, 신갈나무(*Q. mongolica*), 소나무(*P. densiflora*)치수 등이 출현하였으며, 초본종에는 솔새, 큰기름새, 역새, 애기며느리밥풀, 애기풀, 그늘사초 등이 출현하였다. 재생되는 하층식생의 대부분은 산불피해지에서 흔히 발견되는 종들로 구성되어 있었으며, 연구초기와 비교해볼 때 구성 종에 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 문형태(2001),

Table 2. Characteristics of vegetation structure following fertilization treatments with different fertilizer types in 2005.

Characteristics	Control	CF	UF
Herb layer species richness			
Number of species	4.6a (0.9)	4.3a (0.7)	5.3a (1.2)
Species diversity index			
Shannon's diversity index	1.03a (0.13)	1.15a (0.17)	1.34a (0.25)
Total vegetation coverage(%)			
	56.1b (3.5)	79.4a (2.8)	82.1a (2.9)
Overstory coverage(%)			
	51.7b (4.0)	70.0a (3.0)	75.7a (2.8)
Understory coverage(%)			
	16.3a (3.6)	27.8a (6.9)	19.3a (2.3)
Organic layer coverage(%)			
	42.2b (5.2)	72.2a (2.5)	76.1a (2.3)

The values in parentheses are standard errors. Means followed by the same letter in a given column do not differ at $p=0.05$. Control : Unfertilized treatment, CF: Combination Fertilizer treatment, UF: Urea Formaldehyde Fertilizer treatment.

심학보와 김원(1993)은 산불피해지에서 싸리류와 솔새, 억새 등 화본과식물의 중요치가 현저히 증가함을 보고한바 있으며, 본 연구에서도 싸리류와 큰기름새, 솔새와 같은 화본과 식물이 모든 조사구에서 높은 밀도로 출현하여 비슷한 경향을 보였는데, 솔새는 전체 출현 개체수에 대한 상대 밀도가 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 26%, 29%, 27%로 나타났다. 한편, 토양조건 등이 유사한 지역에서 수행된 우보명과 이현호(1989)의 연구결과에 의하면 산불발생 후 5년이 경과한 지역의 출현종수는 모두 37종(목본 23종, 초본 14종)으로 보고하여 본 연구의 출현종수 보다는 높게 나타났으며, 이는 산불 발생 전 식생의 구성상태, 지역적인 기후인자의 차이에 의한 것으로 사료된다.

단위면적(4 m²) 당 출현한 평균 총 종수(종풍부도)는 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 4.6, 4.3, 5.3으로 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p>0.05$). Shannon's 종다양성지수는 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 1.03, 1.15, 1.34로 나타나 시비처리구에서 종다양성지수가 약간 높았으나 역시 유의한 차이는 없었다($p>0.05$). 전반적으로 산불피해지내 소나무 조림지의 하층식생은 4년이 경과한 후에 종풍부도와 종다양성이 시비처리에 의하여 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

산불피해지내 대조구와 시비구의 출현종수나 단위면적당 종풍부도의 경우 유의적인 차이가 없었으나, 식생의 전체 피도는 무시비구, CF처리구, UF처리구에서 각각 56.1%, 79.4%, 82.1%로 나타나 시비처리에 의해 현저히 증가하였다. 그러나 CF처리구와 UF처리구 간에는 유의한 차이는 없었다($p>0.05$). 수관층의 피도는 전체피도와 유사한 경향을 보였으며, 초본층의 경우는 시비처리 간에도 차

이를 보여 CF처리구에서 가장 높았다. 낙엽이나 낙지 등 지상부 잔존물의 퇴적에 의해 생성된 유기물층의 피도는 무시비구, CF, UF처리구에서 각각 42.2%, 72.2%, 76.1%로 나타나 무시비구는 절반 이상의 면적이 나지 상태로 존재하는 반면 시비처리구는 70%이상 낙엽 낙지 등과 같은 유기물로 피복되어 있었다. Meyer 등(2004)은 산불피해지 내 시비처리는 식생 피도의 현저한 증가와 지표가 노출된 나지의 비율(대조구 : 36-57%, 처리구: 3-30%)이 감소하여 지표가 빠르게 안정화된다고 보고한 바 있다.

결론 및 제언

산불피해지의 신속한 복원을 위해서는 무엇보다도 식생회복을 통한 토양 안정화가 우선으로 식생의 재생속도가 빠를수록 토양침식 및 양분유실을 줄이는 효과가 크고 식생에 의한 양분흡수량이 증가하기 때문에 산림생태계로부터 양분손실을 최소화 할 수 있다. 그러므로 산불피해지 내 조림지의 경우 식재목의 관리뿐만 아니라 하층식생의 적절한 관리를 병행하여 산림생태계의 신속한 회복과 지표면의 안정화를 도모해야 한다. 강원도 고성지역 산불피해 소나무임분을 대상으로 소나무 용기묘를 식재한 후 요소, 용과린, 황산칼륨을 혼합한 복합비료(CF처리)와 산림용고형복합비료(UF처리)를 3년 연속 시비한 결과 식재된 묘목은 뚜렷한 근원경 및 수고성장 촉진 반응을 보였으며, 비료의 종류별로는 CF처리가 UF처리에 비해 식재묘의 생장에 효과적이었다. 또한 지표면의 안정화와 밀접한 관련을 가지는 식생피도의 경우 무시비구에 비해 23-26%정도 피도가 높아 시비처리는 산불발생으로부터 노출된 나지를 신속하게 피복하여 강우발생시 토사나 양분유실을 억제 할 수 있는 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 3년간의 연속시비처리에 대한 토양특성의 경우 뚜렷한 토양양분 함량의 증가는 관찰되지 않았다. 결과적으로 산불피해지의 소나무묘목 식재지에 대한 3년간의 시비처리는 직접적으로는 조림목의 성장 및 하층식생피도 증가 등 식생의 성장반응에 기여를 하였으나, 토양의 비옥도 개선에는 큰 영향을 미치지 못했다. 산불발생으로 양분손실이 발생한 고성 산불피해지의 시비처리는 조림목의 빠른 성장을 유도하고 하층식생 발달을 촉진하여 지표면이 빠르게 안정화되는 것으로 나타났으며, 이는 향후 산불피해지의 신속한 산림생태계 회복을 위해서는 산지시비 같은 산림관리기술의 도입이 필수적임을 시사한다.

인용문헌

1. 기상청. 2005. 기후정보. http://www.kma.go.kr/weather/climate/summ/sum_year_frame.html.

2. 김종갑, 오기철. 2001. 침엽수와 활엽수 산림에서 산불 후 토양화학적 및 토양미생물학적 특성 변화. 한국생태학회지 24: 1-7.
3. 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법(토양, 식물체, 토양미생물). 농촌진흥청. 농업기술연구소. pp. 450.
4. 문형태. 2001. 산불이 곰솔림 산화지의 하층식생 구성과 쌀새(*Melica onoei* Fr.)의 종자발아에 미치는 영향. 한국생태학회지 24: 131-136.
5. 문형태, 정연숙. 1996. 강원도 고성지역에서 산불이 소나무림 토양의 영양염류에 미치는 영향. 한국생태학회지 19: 375-383.
6. 산림청. 2000. 동해안 산불지역 정밀조사 보고서 1. pp. 533.
7. 심학보, 김 원. 1998. 팔공산에서 식생과 토양에 미치는 산불의 영향. 한국생태학회지 21: 465-473.
8. 우보명, 권태호. 1983. 황폐산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(I) -관악산 뱀골계곡에서의 초기연구-. 한국임학회지 62: 43-52.
9. 우보명, 권태호, 마호섭, 이현호, 이종학. 1985. 황폐산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(II). 한국임학회지 68: 37-45.
10. 우보명, 이현호. 1989. 황폐산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(IV). 한국임학회지 78: 302-313.
11. 이원규, 김춘식, 차순형, 김영걸, 변재경, 구교상, 박재욱. 1997. 산불이 산림토양의 이화학적 성질에 미치는 영향. 한국생태학회지 20: 157-162.
12. 이원규, 최 경, 오민영. 1988. 산화에 의한 토양 및 식생의 변화. 임연연보 37: 35-49.
13. 이창복. 1993. 대한식물도감. 향문사. 서울. pp. 990.
14. 이창우, 이천용, 김재현, 윤호중, 최 경. 2004. 고성 산불피해지의 토사유출 특성. 한국임학회지 93: 198-204.
15. 황정옥, 손요환, 이명중, 변재경, 정진현, 이천용. 2003. 비료의 성분 및 종류와 묘목과의 관계 연구. I. 생체량, SLA 및 엽록소 함량에 미치는 영향. 임산에너지 22: 44-53.
16. Beliaals, C. and Feller, M. 1998. Relationships between fire severity and atmospheric and leaching nutrient losses in British Columbia's coastal western hemlock zone forest. International Journal of Wildland Fire 8: 87-101.
17. Boerner, R.E.J. 1983. Nutrient dynamics of vegetation and detritus following two intensities of fire in the New Jersey Pine Barrens. Oecologia 59: 129-134.
18. Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. Oecologia 143: 1-10.
19. Covington, W.W. and Sackett, S.S. 1984. The effects of a prescribed burn in southwestern ponderosa pine on organic matter and nutrients in woody debris and forest floor. Forest Science 30: 183-192.
20. DeBano, L., Neary, D. and Ffolliott, P. 1998. Fire's effects on ecosystems. John Wiley & Sons, New York. pp. 333.
21. Doerr, S.H. and Cerda, A. 2005. Fire effects on soil system functioning: new insight and future challenges. International Journal of Wildland Fire 14: 339-342.
22. Fisher, R.F. and Binkley, D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3rd edition. John Wiley & Sons, New York. pp. 489.
23. Kim, C., Lee, W.K., Byun, J.K., Kim, Y.K. and Jeong, J.H. 1999. Short-term effects of fire on soil properties in *Pinus densiflora* stands. Journal of Forest Research 4: 23-25.
24. Ludwig, J.A. and Reynolds, J.F. 1988. Statistical ecology. Wiley Interscience, New York. pp. 337.
25. Meyer, V.F., Redente, E.F., Barbarick, K.A., Brobst, R.B., Paschke, M.W. and Miller, A.L. 2004. Plant and soil responses to biosolids application following forest fire. Journal of Environmental Quality 33: 873-881.
26. Nagaike, T. 2002. Differences in plant species diversity between conifer(*Larix kaempferi*) plantations and broad-leaved(*Quercus crispula*) secondary forests in central Japan. Forest Ecology and Management 168: 111-123.
27. SAS. 1988. SAS/STAT User's Guide. Ed. 6.03. SAS Institute, Cary, NC. pp. 549.
28. Swindel, B.F., Conde, L.F. and Smith, J.E. 1986. Successional changes in *Pinus elliotii* plantations following two regeneration treatments. Canadian Journal of Forest Research 16: 630-636.
29. Trammell, T.L.E., Rhoades, C.C. and Bukaveckas, P.A. 2004. Effects of prescribed fire on nutrient pools and losses from glades occurring within oak-hickory forest of central Kentucky. Restoration Ecology 12: 597-604.

(2006년 3월 8일 접수; 2006년 4월 20일 채택)