

산불이 산림토양의 영양염류의 동태에 미치는 영향

차 상 섭 · 심 재 국

중앙대학교 생명과학과

Effects of Forest Fire on Soil Nutrients Dynamics

CHA, Sangsub · Jae-Kuk SHIM

Department of Life Science, Chung-Ang University

ABSTRACT

Forest fires are major environmental disturbances, and can affect the physical, chemical, mineralogical, and biological properties of the soil. This study was carried out to determine the effects of forest fire disturbance on functions of the ecosystem. We examined the influence of fire on the chemical properties of soil in a recently burned pine forest in Seosan, Chungcheongnam-do Province in Korea. Immediately after a fire, we established four burned plots and control plots outside the margin of the fire. Soil organic matter, water content, and total nitrogen was slightly lower than those in the unburned sites. The soil pH, $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ contents of the burned site was significantly higher than those in the unburned site. The concentrations of calcium in the burned soil was approximately 1.1~1.5 times higher than that in the top-soil (0~5cm) of the unburned site during the experimental period. In contrast, the concentration of magnesium was lower than that in all soil layers in the unburned site. The concentration of phosphorus partially increased in the burned site (1.4 times), but rapidly decreased. The total nitrogen content decreased in all soil layers of the burned sites. The chemical properties of the top-soil of the burned site were observed to be restored within five months after the fire, but we believe that the restoration of soil layers below 5cm requires additional time.

Key words : pine forest, forest fire, mineral nutrients, nitrogen. soil

서 론

산불은 우리나라에서 발생하는 대표적인 산림훼손으로, 연평균('05~'14년) 384건의 화재가 발생하고, 이로 인하여 631ha에 달하는 임야가 피해를 입는다(산림청, 2015). 산불은 목재원이나 여러 산림자원의 손실을 가져올 뿐만 아니라, 홍수, 토사유출 및 어장의 피해와 같은 산불 후에 발생하는 2차 재해를 유발하기도 한다(Marques and Mora, 1998; 동해안 산불피해지 공동조사단, 2000). 산불은 숲의 구조와 그 종조성에 영향을 미치고(Gallant *et al.*, 2003) 토양의 이화학적 성질과 산림생태계의 물질순환에도 영향을 미치는데(Raison, 1979; Woodmansee and Wallach, 1981; Boerner, 1982; Chorover *et al.*, 1994; Beyers *et al.*, 2005), 그 영향은 산불의 강도와 지속기간, 토양의 수분함량, 산불이 발생하

는 시기, 산불 후 강우의 강도 등에 따라 많은 차이가 있다(Chandler *et al.*, 1983). 산불 발생으로 변화되는 산림토양의 화학적 성질 변화는 산불 후 2~3년 이내에 산불 이전의 상태로 회복되는 것으로 알려져 있다(우 등, 1985; 이 등, 1988; 우와 이, 1989).

산불 발생은 낙엽, 낙지 등의 유입량의 감소와 함께 질소, 인, 칼륨, 황 등과 같은 여러 가지 양분의 손실을 초래하지만(Kauffman *et al.*, 1993), 재의 양이나 토양 pH의 증가와 함께 임지의 양분수지와 양분 유효도에 영향을 주어 산화지에 재생되는 식물 생장에 영향을 미치게 된다(Khanna and Raison, 1986; Carballas *et al.*, 1993).

특히 질소는 다른 무기 영양분들과 달리, 대부분이 토양 생물의 작용에 의하여 얻어지며, 열에 의해 쉽게 휘발되기 때문에 산불이 지상부의 식물체와 임상의 유기물을 연소시키는 과정에서 많은 양이 소실될 뿐만 아니라, 질소 대사에 관련된 여러 토양미생물도 영향을 받는다(Grier, 1975; White *et al.*, 1973; Raison *et al.*, 1984; Caldwell *et al.*, 2002; Beyers *et al.*, 2005). 한편, 산불로 인하여 질소의 일부가 무기태질소의 형태로 토양에 침적되어 토양의 무기태질소 함량을 증기시키지만(Christensen and Muller, 1975; Stark, 1997), 용탈에 의해서 많은 양의 무기태질소가 유출되는 것으로 알려져 있다(Minshall *et al.*, 1997).

외국의 경우, 산불의 효과적인 이용은 산림경영적인 관점에서 대단히 중요한 것으로 알려져 있지만, 우리나라의 경우 산림경영적 측면보다는 자연자원의 파괴나 교란으로 여겨져 주목을 받지 못하고 있었다. 하지만 현재에 이르러서는 임목축적량의 계속적인 증가에 따라 대형 산불의 발생 가능성이 점차 커지고 있고, 이에 따라 산불에 대한 다양한 정보가 요구되고 있는 시점이다.

국내에서의 산불에 대한 연구는 주로 1980년대 이후부터로 산불이 일어난 후 그 지역의 2차 천이와 토양의 성질 변화에 대한 연구(강과 이, 1982; 김 외, 1983; 김, 1989; 심과 김, 1993; 우 외, 1985; 우와 이, 1989; 이 외, 1988; 이 외, 2004), 산불이 소나무림 토양의 영양염류에 미치는 영향(문과 정 1996), 산불이 토양 미생물 군집과 효소 활성에 미치는 영향(오 외, 2008) 등 지금까지 국내에서는 산불과 관련하여 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 그러나 이러한 대부분의 연구들이 산불 발생 후 꽤 시간이 경과한 어느 한 시점에서 비교 분석한 결과들에 편중되어 있는 상황으로 산불 직후 시간 경과에 따른 변화를 이해하는 데는 한계를 가지고 있다.

국내에서 주로 보고되고 있는 산불은 소나무 숲인데, 소나무는 한반도의 전역에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있는 한국의 대표수종 가운데 하나이다. 소나무는 조직과 함유물질의 특성상 불에 잘 타는 성질 때문에 특히 건조한 봄철에 소나무림에서의 산불이 빈번하게 발생하고, 산불에 의해 가장 많은 피해를 입는 종으로 알려져 있다(이와 이, 2006).

본 연구는 우리나라 중부지방의 전형적인 소나무 숲에서 발생한 산불 직후부터 시간 경과에 따른 산불지역과 비산불지역의 토양 특성을 비교함으로써 산불 발생 초기부터 산불지역의 토양이 회복되는 과정에 대한 정보를 제공하여 산불로 인한 교란의 피해에 대한 회복과 이후의 산림경영에 대한 자료를 제공하고자 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 연구 조사지 현황

본 연구는 충남 서산시 해미면 황락저수지 일대의 소나무림에서 2012년 5월 1일 산불이 발생하여 약 3 ha의 산림면적의 피해를 입은 곳에서 수행되었다. 산불 발생 1주일 후 피해가 큰 지역을 실험구로 선정하여 5m×5m 크기의 방형구 4개를 설치하였고, 각 4개의 실험방형구 인근의 산불지역과 환경조건이 비슷하지만, 불에 의해 피해를 받지 않은 지역 4곳을 각각 대조구로 선정하였다. 서산시의 연평균강수량은 1,285.7mm로이며, 여름철 강수량은 707.7mm로서 연평균 강수량의 55%가 여름철에 집중되어 있다. 연평균기온은 11.9℃로 내륙인 대전보다 조금 낮고, 가장 무더운 달인 8월 월평균기온은 25.1℃, 가장 추운 달인 1월의 월평균기온은 -2.0℃로 연교차는 27.1℃이다(기상청).

산불이 발생한 2012년도의 일평균 기온과 강수량은 Fig. 1과 같다. 본 지역은 소나무림으로 교목층에는 흉고 직경 10~20cm인 소나무가 우점하고 간혹 리기다소나무, 밤나무, 상수리나무 등이 있다. 아교목층의 출현종으로는 소나무, 밤나무, 졸참나무, 갈참나무 등이 주로 출현하며, 관목층에는 졸참

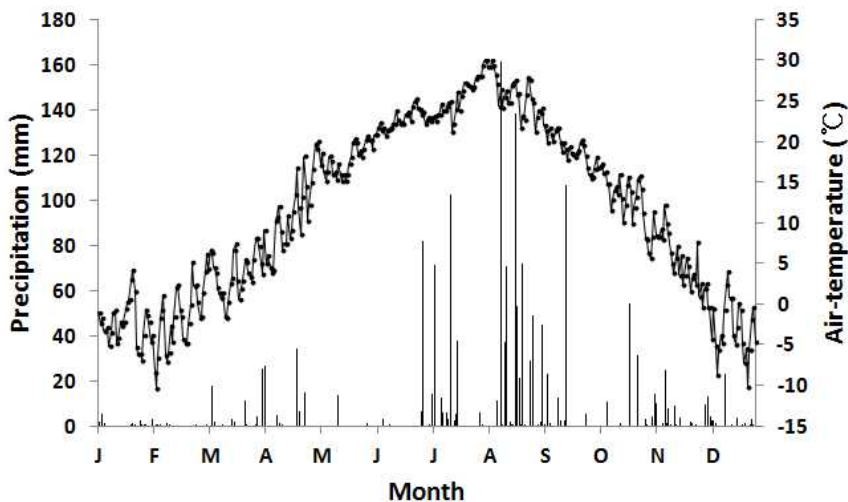


Fig. 1. Daily precipitation and mean air temperature of Seosan area in 2012 (from Seosan Meteorological station). The pine forest burned at March 30, 2012.



Fig. 2. Photographs show the forests after fire (right) and control forest near to burned site (left).

나무, 개암나무, 진달래, 생강나무, 비목, 밤나무, 노간주나무, 갈참나무, 팔배나무, 떡갈나무 등, 초본층에는 개암나무, 큰기름새, 땅비싸리, 산초나무, 청미래덩굴, 그늘사초, 고사리, 담쟁이덩굴, 작살나무, 선밀나물, 삼주, 주름조개풀 등이 출현하였다.

2. 토양의 분석

토양은 각 실험방형구와 대조구 방형구에서 0~5cm, 5~10cm, 10~20cm의 깊이별로 채취하였다. 채취한 토양은 풍건시켜 2mm 체로 친 후, pH, 유기물, 영양염류 등의 측정에 사용하였다. 토양 pH는 풍건한 토양과 증류수를 1:5의 비율로 하여 1시간 동안 진탕시킨 후 상등액의 pH를 pH meter(ORION 3 STAR, Thermo)로 측정하였고, 토양의 유기물 함량은 풍건후 105℃에서 건조시킨 토양을 550℃에서 4시간 동안 작열시킨 후 건조 토양 무게에 대한 작열 소실량을 백분율로 나타내었다. 질산태질소와 암모늄태질소는 일정량의 토양을 2M KCl로 추출한 뒤 자동분석기(QuickChem 8000)로 정량하였다.

토양의 영양염류는 건조한 토양 0.2g을 150mL 비이커에 넣고, 10mL의 HNO₃와 60%의 HClO₄를 가한 후 hot plate에서 1시간 동안은 저온에서 가열하다가 서서히 온도를 높여 거품이 사라질 때까지 가열하였다. HNO₃가 모두 증발되고, HClO₄의 흰색 연기가 발생할 때 각 비이커를 식히고, 10mL의 1D.W. : 1HCl를 가하고, 증류수로 총 시료의 양이 50mL가 되도록 하였다. 이를 여과하여 여과액 내 Ca, K, P, Na, Mg의 농도를 ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometry: ICPS-7510; Shimadzu)로 측정하였다(Helrich, 1990). 각 시료에 대한 측정은 4반복으로 측정되었으며, 그 함량은 평균값으로 표현하였다.

결과 및 고찰

1. 토양 수분, pH, 유기물 함량의 변화

본 조사지에서 산불 발생 직후인 산불 1주일 후에 대조구인 비산화지역의 토양 pH는 0~5cm 깊이의 토양에서 4.43, 5~10cm 깊이의 토양에서 4.53, 10~20cm 깊이의 토양에서 4.58로 나타났으나, 산화지역에서의 pH는 0~5cm 깊이에서 5.03, 5~10cm 깊이의 토양에서 4.92, 10~20cm 깊이의 토양에서 4.97로 나타났다. 산불 후 토양의 pH는 특히 표토 부근에서 급격한 상승을 보였다. 일반적으로 토양 pH는 식물체가 타고 남은 회분과 그 속에 포함된 양이온의 증가에서 비롯(Raison, 1979; Debano, 1991) 되는 것으로서 여러 연구(이 등, 1988; 우와 이 1989; 문과 정, 1996)에서도 같은 결과를 보였다. 더구나 토양의 pH는 상층토에서 하층토로 깊이에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다(신과 이, 1985; 이와 우, 1989; 허와 주, 2002).

토양의 pH는 주로 모암과 산림 식생으로부터 공급되는 유기물에 의하여 결정되고(Pritchett and Fisher, 1987), 모암의 종류와 깊이, 부식층의 발달, 식생의 유형, 양이온 흡수 그리고 환경오염 등에 의해 영향을 받는다(진 등, 1994; 이, 2000). 또한, 산림토양은 낙엽이 분해될 때 생성되는 유기산 또는 토양 내 CO₂가 물과 반응할 때 발생하는 탄산에 의하여 자연발생적으로 산성화가 진행되나, 산성 물질의 유입으로 인하여 토양 산성화의 가속화가 이루어지기도 한다(Kennedy, 1986; Pierzynski *et al.*, 1994; Brady and Weil, 2004). 이러한 일반적 현상에 비추어 보면 토양 pH가 낮아질수록 칼륨, 칼슘,

마그네슘 등의 염기성 이온이 수소이온과 치환되어 용탈되는 경향이 있는 것(조와 한, 1999)과는 달리 산불로 인하여 토양 pH의 증가는 토양미생물의 활동을 활발하게 하여 질소, 황, 인산, 칼륨 등 임목생장에 관계되는 여러 가지 양분의 유효도를 증가시키며(Reich *et al.*, 1990), 이로 인해 새로이 침입된 식생 및 재생된 임목의 성장과 활착에 상당한 도움을 줄 수 있다(오 등 2001).

식물에게 필요한 영양염류와 수분을 저장하고 공급하며(문과 정, 1996), 토양 미생물과 토양 동물의 활성에 영향을 미칠 뿐 아니라, 치환성 양이온 함량과 밀접한 관계가 있는(Joslin *et al.*, 1992) 토양 유기물은 산불에 의해 감소하거나(Convington and Sackett, 1984), 증가하는 것(우 등, 1985; 이 등, 1988)으로 알려져 있다. 감소의 주 원인은 단기적으로는 산불발생 후 지상부의 소실에 의하여 장기적으로는 낙엽, 낙지 등과 같은 유기물의 공급이 감소하기 때문이다. 그러나 산불 발생은 많은 양의 죽은 뿌리를 발생시키며, 그 결과로 산림 토양의 유기물이 증가하게 된다는 보고도 있다(이 등, 1997).

본 조사지에서의 토양 유기물 함량은 비산화지의 0~5cm 깊이의 토양에서 8.92% 그리고 산화지 0~5cm 깊이의 토양에서 7.34%를 나타내어 그 평균함량은 낮으나, 유의한 감소를 나타내지는 않았다. 이러한 결과는 O층의 유기물함량은 연소되어 현격히 줄었으나, 무기질 토양의 유기물이 연소될 정도의 강한 산불은 아니었기 때문으로 판단된다.

산화지의 0~5cm 깊이의 표층토에서 수분 함량은 13.2%로서 비산화지 토양의 수분함량 16.68%보다 낮은 값을 보였다. 산불 일주일 후 토양의 수분은 그 동안의 강수가 없는 조건을 고려하면 산불에 의한 수분증발과 산불로 인한 나지화의 결과, 임상으로 입사되는 일사량의 증가로 인하여 토양수분 함량이 줄어든 것으로 판단된다. 특히 O층의 낙엽과 유기물의 연소로 인한 제거가 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 한편, 산화지에서의 0~5cm 표층토에서 유기물량의 감소는 표층토의 유기물함량 저하와 연관이 있을 것으로 여겨진다(문과 정, 1996). 더구나 토양수분은 식물생장에 필요한 여러 가지 물질 중에서 가장 많은 양이 요구되며, 산림 내 식물 생장에 영향을 주는 요인 중 가장 부족하기 쉬운 요소(정과 신, 2003)로 산불 후 토양 수분의 감소는 산불 후 식생의 복원에 매우 중요한 인자로 볼 수 있다.

2. 토양의 질소 및 영양염류 함량의 변화

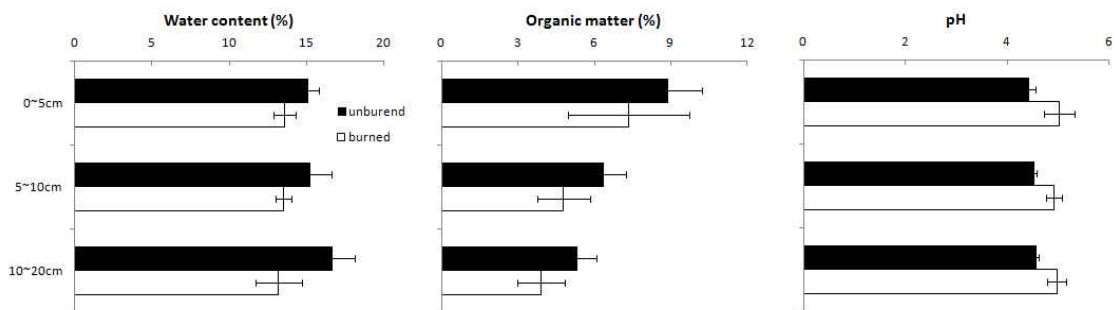


Fig. 3. Comparisons of soil water content, soil organic matter content, and soil pH at different soil depth between burned and unburned control sites after 1 week forest fire in pine forest in Seosan, Chungcheongnam-do.

본 연구에서 산불 후 토양에서의 총질소함량과 nitrate-N은 감소하였고, ammonium-N은 증가하였다. 특히 nitrate-N과 ammonium-N은 산화지와 대조구에서 매우 큰 차이를 보였다. 본 조사지의 총질소함량은 산화지의 0~5cm 깊이 토양에서 0.15%, 5~10cm 깊이 토양에서 0.07%, 10~20cm 깊이의 토양에서는 0.04%로 나타났고, 비산화지의 임상에서 0~5cm 깊이의 토양에서 0.18%, 5~10cm 깊이 토양에서 0.12%, 10~20cm 깊이 토양에서 0.09%로 산불에 의하여 모든 토양 깊이에서 총질소함량은 감소하였다. 질산태질소는 비산화지의 0~5cm 깊이의 토양에서 $9.16 \mu\text{g/g}$, 5~10cm 깊이 토양에서 $8.28 \mu\text{g/g}$, 10~20cm 깊이의 토양에서 $7.65 \mu\text{g/g}$ 으로 산화지의 각 깊이별 토양에서의 $2.99 \mu\text{g/g}$, $2.79 \mu\text{g/g}$, $2 \mu\text{g/g}$ 보다 현저히 높게 나타났다. 그러나 암모늄태질소는 산화지의 0~5cm 깊이 표층토양에서 $21.07 \mu\text{g/g}$ 으로 비산화지의 $5.29 \mu\text{g/g}$ 에 비해 월등히 높게 나타났으며, 깊이에 상관없이 산화지의 암모늄태질소가 더 높게 나타났다.

Wright and Bailey(1982)는 산불이 발생하면 산불의 강도와 존속 시간 등에 따라 토양 내 질소함량은 감소하거나, 큰 변화가 없거나 또는 유기층의 산화로 인한 재의 토양 내 유입으로 인해 증가한다고 보고하였으며 Mroz *et al.*(1980)은 산화지에서 총질소함량의 증가는 암모늄태질소와 같은 무기태 질소의 급격한 증가와 회분화된 유기물이 임상으로부터 표토층으로 이동하기 때문이라고 보고하였다. 사실 질소는 열에 의해 쉽게 휘발되기 때문에 500°C 이상의 온도에는 식물체와 낙엽에 들어있던 질소의 거의 100%가 소실된다(White *et al.*, 1973; Beyers *et al.*, 2005).

토양의 총질소함량도 산불에 의해 감소하지만, 그것은 산불의 온도에 따라 달라진다고 보고되어 있다(DeBano *et al.*, 1979). 토양의 무기질소는 보통 산불에 의해 증가되지만(Christensen and Muller, 1975; Stark, 1997), 연료물질의 화학적인 성질에 따라 그 경향성은 달라질 수 있다(Lewis, 1974). 산불에 의해 무기질소가 증가하는 원인은 낙엽의 무기화가 촉진되기 때문이다(Christensen and Muller, 1975; Stark, 1997).

본 조사지에서도 암모늄태질소의 증가가 현저하였는데, 이는 지상불의 식물과 임상의 낙엽이 연소되는 과정에서 발생한 무기질소들이 토양에 침적되어 나타난 결과로 판단되며, 이는 질소가 임목의 생장을 지배하는 가장 중요한 인자 중의 하나이므로(이 1993), 산불 후 식생 복원과는 밀접한 상관성이 있을 것이다.

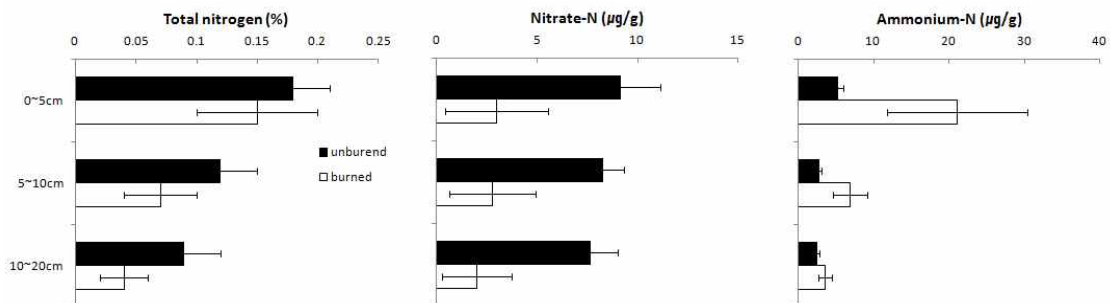


Fig. 4. Changes in content of total soil nitrogen, nitrate-N, and ammonium-N in different depth of soil after one week of pine forest fire at Seosan.

산불 후 토양에서 여러 무기영양염류는 증가하거나 또는 감소하였다. 산화지는 비산화지에 비해 표토층의 칼슘, 칼륨, 인의 뚜렷한 증가를 초래하였으며, 마그네슘은 산화지에서 더 낮은 것으로 나타났다. 나트륨은 유의한 차이는 아니지만 산화지에서 적은 함량을 보였다. 영양염류는 타 연구에서도 이미 보고된 바와 같이 낙엽이나 식물체가 연소된 회분을 통해 토양에 이입된 경우 증가하지만, 토양의 유실이나 용탈, 또는 식물의 흡수가 활발한 경우 그 양이 감소하는 것으로 알려져 있다 (Beyers *et al.*, 2005).

산불 후 토양의 칼슘 함량은 크게 증가하였다. 많은 사람들이 산불 후 토양의 칼슘과 마그네슘의 증가를 보고한 바 있다(Lewis, 1974; Scotter, 1963; Chandler *et al.*, 1983). 토양의 칼슘과 마그네슘은 일차적으로 광물질의 풍화에 의해 생성되지만(Kimmins, 1987), 유입되는 낙엽의 분해에 의해서도 영향을 받는다. 칼슘은 산화지역에서 0~5cm 1,588.3 $\mu\text{g/g}$, 5~10cm 1,111.4 $\mu\text{g/g}$, 10~20cm 1,011.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 비산화지역보다(0~5cm 1,101.3 $\mu\text{g/g}$, 5~10cm 981.6 $\mu\text{g/g}$, 10~20cm 908.8 $\mu\text{g/g}$) 높게 나타났으며, 이것은 낙엽이나 식물체가 연소된 회분을 통해 칼슘이 토양에 이입되었기 때문으로 볼 수 있다.

인은 0~5cm에서 산화지가 217.8 $\mu\text{g/g}$, 비산화지에서 150.8 $\mu\text{g/g}$ 으로 산화지에서 더 높게 나타났지만, 5~10cm에서는 비산화지 137.8 $\mu\text{g/g}$, 산화지 127.6 $\mu\text{g/g}$ 으로 비산화지에서 더 높게 나타났으며, 10~20cm에서는 비산화지 112.8 $\mu\text{g/g}$, 산화지 112 $\mu\text{g/g}$ 으로 차이가 거의 없었다. 산불이 발생하면 낙엽과 식물의 수관층에 있던 상당한 양의 인이 미세한 재의 형태로 소실되지만, 실제로는 산불에 의해 낙엽이나 식물체 속에 들어있던 인이 회분의 형태로 토양에 이입되는 효과가 있기 때문에 토양의 인 함량이 증가한다고 보고하고 있다(Wright and Bailey, 1982; 문과 정, 1996).

칼륨도 인과 유사하게 표토층에서는 산화지가 더 높게 나타났지만, 하층토양에서는 비산화지에서 더 높게 나타났다. 많은 연구들에서 산불 후에 치환성 칼륨이 증가하는 것으로 조사되었는데(Austin and Basinger, 1955; Lewis, 1974; Stark, 1977), 정과 김(1987)은 석회암지대의 소나무림에서 산불 후 치환성 칼륨이 산화지에 비해 비산화지에서 높은 것으로 보고한 바 있다. Beyers *et al.*, (2005)은 산불이 발생하였을 때의 온도가 칼륨 함량 변화에 중요한 요인임을 지적하고, 774°C 이상일 경우 칼륨이 휘발한다고 주장한 바 있다.

반면, 마그네슘과 나트륨은 비산화지에서 더 높은 값을 나타냈는데, 산불 후 토양유실이나 용탈 또

Table 1. Changes in contents of soil nutrient element in different depth of soil after one week of pine forest fire at Seosan

	0~5cm		5~10cm		10~20cm	
	Unburned	Burned	Unburned	Burned	Unburned	Burned
Ca ($\mu\text{g/g}$)	1,101.3 \pm 114.0	1,588.3 \pm 499.5	981.6 \pm 90.5	1,111.4 \pm 97.7	908.8 \pm 112.3	1,011.8 \pm 174.2
P ($\mu\text{g/g}$)	150.8 \pm 18.7	217.8 \pm 142.5	137.8 \pm 13.6	127.6 \pm 35.4	112.8 \pm 16.4	112.0 \pm 44.1
K ($\mu\text{g/g}$)	2,144.3 \pm 223.8	2,275.4 \pm 226.7	2,537.7 \pm 268.3	2,265.1 \pm 317.6	2,543.5 \pm 285.4	2,372.1 \pm 976.8
Mg ($\mu\text{g/g}$)	2,585.1 \pm 312.1	2,440.5 \pm 448.3	2,943.1 \pm 136.1	2,454.6 \pm 586.4	2,788.8 \pm 97.7	2,531.9 \pm 916.9
Na ($\mu\text{g/g}$)	746.3 \pm 89.2	685.3 \pm 25.4	737.3 \pm 81.4	675.8 \pm 19.7	696.6 \pm 79.0	691.6 \pm 40.2

는 식물의 흡수가 활발한 경우 그 양이 감소되는 것으로 알려져 있다(DeBano, 1991). 본 연구에서 마그네슘 함량이 낮은 이유도 산불이 발생한 후 빗물에 의해 치환성 양이온이 용탈되어 소실되었기 때문인 것으로 사료된다.

3. 산불 발생 후 영양염류 동태의 변화

산화지와 비산화지에서 산불 후 시간경과에 따른 무기 영양염류의 변화는 표토층에서는 큰 차이를 보였으나, 5cm 이하의 토양층에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이러한 차이는 칼슘과 마그네슘 그리고 총질소함량에서 현저하였다.

산불 후 시간 경과에 따라 토양 칼슘 함량의 변화는 0~5cm 깊이의 토양에서는 주목할 만한 차이를 나타내었지만, 5~10cm 깊이의 토양과 10~20cm 깊이의 토양에서는 그 함량과 동태에 대하여 산화지와 비산화지간의 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며, 토양 깊이의 증가에 따라 그 함량은 감소하였다. 0~5cm 깊이의 토양에서 산화지 토양의 칼슘 함량은 비산화지보다 현저히 높게 나타났으며, 시간의 경과에 따라 산화지 토양에서는 점차 증가하는 경향을 보였다. 모든 토양 깊이에서 110일에서부터 136일 사이에 칼슘함량이 감소하였는데, 이는 하절기의 강우로 인한 세탈이 빠르게 진행되었기 때문으로 판단된다(Fig. 5).

토양의 인 함량은 토양깊이에 따라 감소하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 5~10cm, 10~20cm 깊이의 토양에서는 산화지의 경우 그 함량이 비산화지에서보다 낮은 값을 보였다. 그러나 0~5cm 깊이의 토양에서는 산불 직후 급격히 증가한 토양 인 함량을 나타내었으며, 이후에는 5~10cm, 10~20cm 깊이의 토양에서와는 다르게 산화지에서 비산화지와 비슷한 인의 함량을 보여 산불로 인하여 표토에서의 인의 상대적 증가를 나타내었다. 이러한 결과는 표토에서는 산불에 의하여 재의 성분과 함께 인의 함량이 크게 나타날 수 있는 반면에, 5~10cm, 10~20cm 깊이의 토양에서는 산불로 인한 토양미생물의 감소변화에 기인한 것이거나, 산불 후 지상부 식생의 재생과정에서 흡수된 결과로 추측된다.

토양의 칼륨과 나트륨 함량은 모든 토양층에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 산화지와 비산화지의 토양에서의 함량도 유의한 차이를 나타내지 않았다. 그러나 토양의 마그네슘 함량은 비산화지의 모든 토양층에서 산화지에서 높은 함량을 나타냈다. 칼슘 함량은 0~5cm 깊이의 토양에서만 대조구에서보다 산화지에서 높은 함량을 보였지만, 이와 대조적으로 마그네슘의 함량은 산화지에서 언제나 비산화지의 토양에서보다 낮은 함량을 보였다. 이러한 결과는 일반적으로 마그네슘이 이가 양이온으로서 토양에서의 동태는 칼슘과 비슷한 양태를 보이는 것과 다른 결과로서, 본 조사에서 나온 결과 즉 산불에 의하여 마그네슘함량이 적어지는 문제에 대하여는 앞으로 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

총질소함량은 산불 발생 후 산화지 토양의 모든 층에서 더 낮은 질소함량을 나타냈으나, 시간이 흐름에 따라 다른 변화 양상을 보였다. 0~5cm 깊이의 토양에서 산화지와 비산화지의 질소함량이 같아지는, 즉 표토에서의 총질소함량이 산불 후 회복되는 시기는 산불 발생 170일후로 빠르게 회복하는 모습을 보였다. 빠른 회복의 이유는 산불 후 정착하기 시작한 식물들이 가을철로 들어가면서 토양에 공급하는 유기물 때문으로 판단된다. 그러나 5~10cm와 10~20cm 토양층에서는 두 지소간의

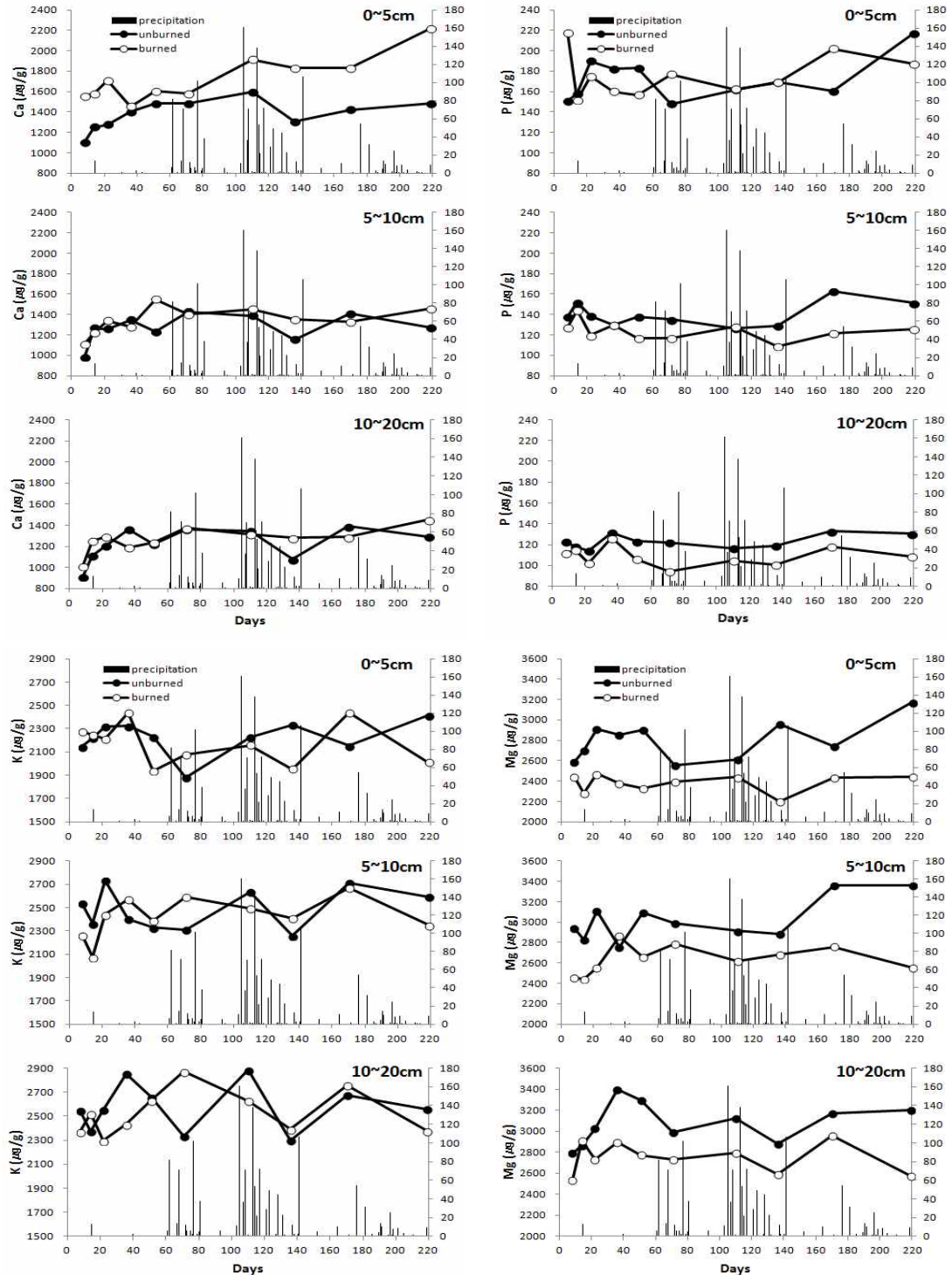


Fig. 5. Comparisons of changes in calcium, phosphorus, potassium, magnesium, sodium, and total nitrogen at different depth of soil after pine forest fire at Seosan.

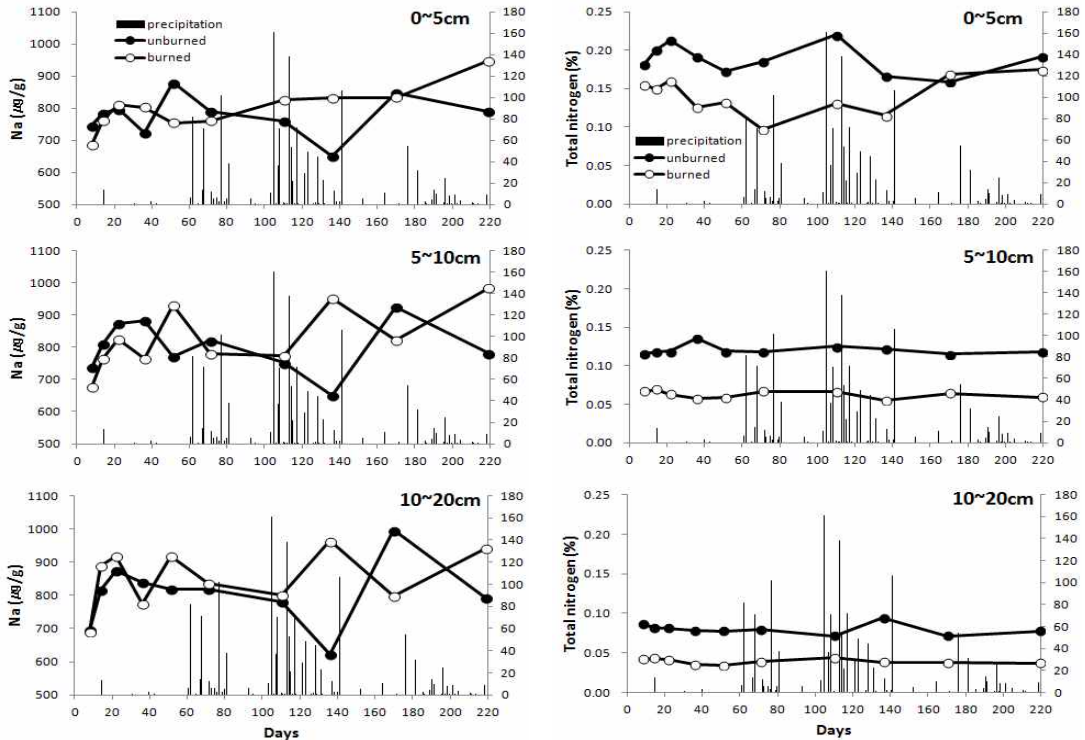


Fig. 5. Continued.

총질소함량의 차이에 변화가 없었다. 즉, 산화지의 토양은 비산화지 토양보다 낮아진 총질소함량이 지속되고 있었다. Carballas(2003)에 의하면 산불은 유기물 및 유기태질소 함량을 감소시킨다. 산불 발생 후 불의 영향에 의해 산화지 토양의 질소함량이 감소하였지만, 표토층의 경우 약 5~6개월 만에 비산화지의 토양과 비슷한 질소함량을 나타내는 것으로 보아, 산불 발생 1년 이내에 산불 이전 수준으로 회복된다고 생각할 수 있다. 그러나 낙엽과 낙지 등에 의해 많은 유기물을 직접 공급 받는 표토층과 달리, 낮은 층의 토양들은 산불 이전 수준으로의 회복이 느리게 진행됨을 예상할 수 있다.

산불 발생으로 변화되는 산림토양의 화학적 성질 변화는 일반적으로 산화 후 2~3년 이내에 산불 이전의 상태로 회복되는 것으로 알려져 있으나(우 등, 1985; 이 등, 1988; 우와 이, 1989) 5~10cm, 10~20 cm의 토양층에서까지 무기영양의 회복이 이루어지기에는 식생의 회복과 함께 수회의 강우와 낙지엽의 공급 및 그의 분해와 같은 과정이 수반되어야 하는 좀 더 오랜 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

인용문헌

- 강상준, 이종태. 1982. 산화지의 식생회복에 관한 생태학적 연구. 한국생태학회지 5:54-62.
 김원. 1989. 소나무림의 산화지의 이차식생과 종다양성. 한국생태학회지 12:285-295.
 김원, 서정호, 이종운. 1983. 당지동의 산화지의 식생회복과 초기 식생천이. 한국생태학회지 6:237-

242.

동해안산불피해지 공동조사단. 2000. 산불피해지의 건전한 자연 생태계 복원 및 항구적인 산림복구 계획 수립을 위한 동해안 산불지역 정밀조사 보고서(Ⅰ, Ⅱ).

산림청. 2015. 2014년 산불통계연보. pp. 3.

심학보, 김원. 1993. 섬제골 지역의 산화지 및 비산화지의 군락구조 비교. 한국생태학회지 16:429-438.

우보명, 권태호, 마호섭, 이현호, 이종학. 1985. 황폐산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(Ⅱ). 한국임학회지 68:37-45.

우보명, 이현호. 1989. 황폐산지에서의 산불이 삼림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(Ⅳ). 한국임학회지 78:302-313.

이규송, 정연숙, 김석철, 신승숙, 노찬호, 박상덕. 2004. 동해안 산불 피해지에서 산불 후 경과 년 수에 따른 식생 구조의 발달. 한국생태학회지 27:99-106.

이시영, 이해평. 2006. 한국의 산불발생 실태분석. 한국화재소방학회 논문지 20:54-63.

이원규, 김춘식, 차순형, 김영걸, 변재경, 구교상, 박재욱. 1997. 산불이 산림토양의 이화학적 성질에 미치는 영향. 한국생태학회지 20:157-162.

이원규, 최경, 오민영. 1988. 산화에 의한 토양 및 식생의 변화. 임업연보 37:35-49.

문형태, 정연숙. 1996. 강원도 고성지역에서 산불이 소나무림 토양의 영양염류에 미치는 영향. 한국생태학회지 19:375-383.

정동준, 신만용. 2003. 중부지방 굴참나무림의 입지환경에 따른 생장 및 수분생리 특성에 관한 연구. 한국농림기상학회지 5:233-237.

이천용. 2000. 산림환경토양학. 보성문화사. pp. 350.

김계훈, 박순남. 2000. 중부 지역 도시 자연녹지 토양 중 NO_3^- , SO_4^{2-} 및 중금속 분포. 한국환경농학회지 19:351-357.

신준환, 이돈구. 1985. 경기도 광주지방의 잣나무임분에 있어서 전질소의 분포와 무기태 질소의 계절적 변화. 한국임학회지 69:56-68.

진현오, 이명중, 신영오, 김정제, 전상근. 1994. 산림토양학. 향문사. pp. 325.

조현길, 한갑수. 1999. 도심지와 자연지간 토양 특성 및 탄소저장량 비교. 산림과학 연구지 15:71-76.

허태철, 주성현. 2002. 침·활엽수림에서 산림토양의 이·화학적 특성 비교. 경북대학교농학회지 20:39-47.

임양재, 임영득. 1971. 한반도의 몇 삼림형에 따른 임토유기물 축적량의 위도적 차이에 대해서. 한국 식물학회지 40:5-13.

이명중. 1993. 삼림토양의 질소의 존재형태에 관한 연구. 한국임학회지 82:246-253.

김태훈, 정진현, 이충화, 구교상, 이원규, 강인애, 김사일. 1991. 토양형별 주요수종의 생장. 임업연구원 연구보고 42:91-106.

정진현, 구교상, 이충화, 김춘식. 2002. 우리나라 산림토양의 지역별 이화학적 특성. 한국임학회지 91:694-700.

오기철, 김종갑, 정원옥, 민제기. 2001. 산불 후 산림식생 및 토양환경의 변화. 한국환경복원기술학회

지 19:417-430.

정연숙, 김준호. 1987. 산화가 소나무림의 토양과 유출수의 화학적 성질 및 식물량에 미치는 영향. 한생태지 10:129-138.

Austin, R. C. and D. H. Basinger. 1955. Some effects of burning on forest soil of western Oregon and Washington. J. For. 53:275-280.

Beyers, J. L., J. K. Brown, M. D. Busse, L. F. DeBano, W. J. Elliot, P. F. Folliott and M. J. Zwolinski. 2005. Wildland Fire in Ecosystems Effects of Fire on Soil and Water. pp. 53-71.

Boerner, R. E. J. 1982. Fire and nutrient cycling in temperate ecosystems. BioScience 32:187-192.

Brady, N. C., R. R. Weil. 2004. Elements of the Nature and Properties of Soil. 2th ed. Pearson, Upper Saddle River, New Jersey.

Caldwell, T. G., D. W. Johnson, W. W. Miller and R. G. Qualls. 2002. Forest floor carbon and nitrogen losses due to prescription fire. Soil Science Society of America Journal 66:262-267.

Carballas, T. 2003. Los incendios forestales. In: reflexiones sobre el medio ambiente en Galicia. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, Spain, pp. 362-415.

Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud and D. Williams. 1983. Fire in Forestry. Vol. I. Forest Fire Behavior and Effects. John Wiley & Sons, New York. 450 pp.

Chorover, J., P. M. Vitousek, D. A. Everson, A. M. Esperanza and D. Turne. 1994. Solution chemistry profiles of mixed-conifer forests before and after fire. Biogeochemistry 26:115-144.

Christensen, N. L. and C. H. Muller. 1975. Effects of fire on factors controlling plant growth in *Adenostoma* chaparral. Ecol. Monogr. 45:29-55.

Convington, W. W. and S. S. Sackett. 1984. The effect of a prescribed burn in southwestern ponderosa pine on organic matter and nutrients in woody debris and forest floor. Forest Sci. 30:183-192.

Daubenmire, R. F. 1968. Ecology of fire in grasslands. Advances in Ecological Research 5:203-226.

DeBano, L. F., R. M. Rice and C. E. Conrad. 1979. Soil heating in chaparral fires: effects on soil properties, plant nutrients, erosion, and run-off. USDA Forest Service Research Paper PSW-145, Berkeley, California.

DeBano, L. F. 1991. The effect of fire on soil properties. Proceedings- management and productivity of western-montane forest soils. USDA Forest Service General Technical Report INT-280. 151-156 pp.

Gallant, A. L., A. J. Hansen, J. S. Councilman, D. K. Monte and D. W. Betz. 2003. Vegetation dynamics under fire exclusion and logging in a Rocky Mountain Watershed, 1856-1996. Ecological Applications 13:385-403.

Grier, C. C. 1975. Wildfire effects on nutrient distribution and leaching in a coniferous ecosystem. Canadian Journal of Forest Research 5:599-607.

Joslin, J. D., J. M. Kelly, H. Van Miegroet. 1992. Soil chemistry and nutrition of North American spruce-fir stands; Evidence for recent change. J Environ Qual 21:12-30.

Kauffman, J. B., R. L. Sanford, Jr., D. L. Cummings, I. H. Salcedo and E. V. S. B. Sampaio. 1993.

- Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. *Ecology* 74:140-151.
- Kennedy, I. R. 1986. *Acid Soil and Acid Rain*. Research Studies Press LTD. Herfordshire, England.
- Khanna P. K. and R. J. Raison. 1986. Effect of fire intensity on solution chemistry of surface soil under a *Eucalyptus pauciflora* forest. *Australian Journal of Soil Research* 24:423-434.
- Kimmins, J. P. 1987. *Forest Ecology*. MacMillan Publishing Company, New York. 531 pp.
- Kimura, M. 1963. Dynamics of vegetation in relation to soil development in the northern Yatsugatake Mountains. *Japanese Journal of Botany* 18:255-287.
- Lewis, W. M. Jr. 1974. Effects of fire on nutrient movement in a South Carolina pine forest. *Ecology* 55:1120-1127.
- Marques, M. A. and E. Mora. 1998. Effects on erosion of two postfire management practices: clear-cutting versus non-intervention. *Soil Tillage Res.* 45:433-439.
- Minshall, G. W., C. T. Robinson and D. E. Lawrence. 1997. Postfire responses of lotic ecosystems in Yellowstone National Park, U.S.A. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54:2590-2525.
- Mroz, G. D., M. F. Jurgensen, A. E. Harvey and M. J. Larsen. 1980. Effects of fire on nitrogen in forest floor horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:395-400.
- Otto, H. J. 1994. *Waldökologie*. Ulmer-Verl. Stuttgart. 391 pp.
- Pierzynski, G. M., J. T. Sim, G. F. Vance. 1994. *Soil and Environmental Quality*. Lewis Publishers, Florida, USA. pp 47-55.
- Pritchett, W. L., R. F. Fisher. 1987. *Properties and Management of Forest Soil*. 2nd Ed. John Wiley & Sons Inc. pp 1-60.
- Raison, R. J. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: A review. *Plant and Soil* 51:73-108.
- Raison, R. J., P. K. Khana and P. V. Woods. 1984. Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian Journal of Forest Research*. 15:132-140.
- Reich, P. B., M. D. Abrams, D. S. Ellsworth, E. L. Kruger and T. J. Tabone. 1990. Fire affects ecophysiology and community dynamics of central Wisconsin oak forest regeneration. *Ecology* 71:2179-2190.
- Scotter, G. W. 1963. Effects of forest fire on soil properties in northern Saskatchewan. *For. Chron.* 39: 412-421.
- Stark, N. M. 1997. Fire and nutrient cycling in a Douglas-fir / larch forest. *Ecology*. 58:16-30.
- White, E. M., W. W. Thompson and F. R. Gartner. 1973. Heat effects on nutrient release from soil under ponderosa pine. *J. Range Manage.* 26:22-24.
- Woodmansee, R. G. and L. S. Wallach. 1981. Effects of fire regimes on biogeochemical cycles, Pages 649-669 in Clark EE and T. Rosswall, editors, *Terrestrial Nitrogen Cycles*. Ecological Bulletin 33: Stockholm Swedish Land Use Research Council.
- Wright, H. A. and A. W. Bailey. 1982. *Fire Ecology: United States and Southern Canada*. John Wiley & Sons, New York. 501 pp.

기상청, http://www.kma.go.kr/weather/climate/average_30years.jsp

요 약

산불은 대표적인 산림훼손으로, 토양의 물리화학적, 생물학적 특성에 큰 영향을 미친다. 이 연구는 2012년 4월 충남 서산시 인근에서 발생한 소나무 숲 산불 직후 산화지와 비산화지의 임상 토양에서 토양의 유기물함량, 영양염류의 변화를 조사하였다. 산화지와 비산화지에서 각각 4개의 조사구를 선정하였고, 토양의 유기물량과 수분 함량, 토양 pH, 총질소함량, 그리고 무기영양 함량으로 칼슘, 마그네슘, 총 인, 칼륨, 나트륨 함량을 조사하였다. 토양 유기물량과 수분 함량, 총질소함량은 산불지역에서 감소하였으며, 토양 pH와 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 산불지역에서 대조구지역보다 더 높은 값을 나타내었다. 산불지역 토양의 칼슘 함량은 0~5cm 깊이의 토양에서만 대조구에서보다 산화지에서 높은 함량(1.1~1.5배)을 보였으나, 이와 대조적으로 마그네슘의 함량은 산화지에서 산불초기에는 비산화지보다 낮은 함량을 보였으며, 시간의 경과에 따라 표토에서의 함량은 거의 일정하게 나타났다. 인의 표토에서의 함량은 산불 발생 직후 급격히 증가(1.4배)하는 모습을 보였지만, 빠르게 감소하여 대조구지역과 비슷한 함량을 나타내었다. 총질소함량은 산불지역의 모든 토양층에서 대조구지역에 비해 낮게 나타났다. 그러나 0~5cm의 표토층의 경우, 산불 발생 5개월 후 대조구지역과 비슷한 질소함량을 보여 빠르게 회복하는 경향을 보여주었으나, 5cm 이하의 토양에서는 실험기간동안 산화지에서 늘 낮은 값을 보여 그의 회복에는 많은 시간이 필요한 것으로 보인다.

검색어 : 소나무림, 산불, 무기영양염류, 질소, 토양