

Thinning Effect on Fuel Load and Crown Fire Hazard

Byung Doo Lee¹⁺, Yeong Tae Bae², Sung Cheol Jung³

¹ Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea

² Department of Forest Resources, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Korea

³ Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, 22 Donnaeko-ro, Seogwipo-city, Jeju, Korea

Abstract

This study analyzed the influence of a thinning operation on fire behavior, fire hazard and fuel load. Our research examined fuel load in surface, shrub, and crown layer by three degree of density (100, 200 and 300 trees per hectare) in both treated and untreated area. NEXUS 2.0, a system for assessing crown fire hazard into torching index and crowing index, and a BehavePlus program were used to analyze fire behavior. It was observed that, when the intensity of a thinning operation increased, the shrub fuel load also increased but the surface fuel and canopy fuel load decreased. Unlike a torching index with no big difference by thinning intensity, the more intensified a thinning operation became, the more reduced a crowing index was. The result of fire behavior analysis showed that the spreading rate was much faster and heat radiation was also very high in untreated sites. Not only fire intensity but flame length became weaken and shorten in uncontrolled area.

Key words: forest fire, forest tending, fuel, crown fire hazard, crowning index, torching index

1. 서론

1973년부터 시작된 치산녹화 사업으로 11,31m³/ha이었던 임목축적이 2014년에는 142.2m³/ha로 늘어났다. 이렇게 증가된 임목축적은 산림의 가치 증진에 있어서 큰 역할을 담당했다. 그러나 산불의 관점에서는 연료가 증가한 것을 의미하므로 대형 산불의 가능성이 높아졌다고 할 수 있다(Lee, 2005).

우리나라에서는 최근 10년(2006~2015년)간 약 3,949건의 산불이 발생하여 4,658ha면적의 산림이 불

탸다(Korea Forest Service, 2016). 산불은 진화장비의 발달과 신속한 대응으로 인해 산불 1건당 피해면적이 1.90ha 정도로 감소하였으며 대부분의 산불이 1ha이하의 산불이었다. 하지만 2005년 양양산불, 2013년 포항산불의 경우 강한 바람으로 인해 수관화(Crown Fire)로 전이되면서 많은 산림과 건축물을 태웠다. 이는 임목의 축적량도 중요하지만 우리나라처럼 산불에 취약한 산림현황에서는 피해를 입기 쉬운 곳에 산불에 잘 견디는 숲을 조성하고, 관리하는 것이 중요하다는 것을 말해준다.

⁺ Corresponding author: Byung Doo Lee, Tel. +82-2-961-2687, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. byungdoo@korea.kr

산림의 내화성을 증진시키는 방법은 첫 번째, 열방출량이 적고 착화온도가 높은 수종을 식재하는 방법(Kim, *et. al.*, 2010), 두 번째, 인위적으로 불(처방화입, Prescribed burning)을 놓아 연료를 사전에 태워서 실제 산불 발생 시 강도를 낮추는 방법(Collett, *et. al.*, 1995), 세 번째, 숲아베기와 가지치기 등의 숲가꾸기를 통해 수관화 위험을 줄이는 방법(Rothermel, 1991; Kim, *et. al.*, 2013; Rye, *et. al.*, 2015) 등이 있다. 이 3가지 방법 중에서 숲가꾸기는 처리 비용은 많이 들지만 안전하고, 효과가 빠른 방법으로 알려져 있다. 반면에 내화수종을 식재하는 방법은 시간이 오래 걸리고, 처방화입은 실패했을 때 대형 산불 위험이 있다. Kim, *et. al.*(2011)은 숲아베기를 실시한 경북 영주와 숲아베기를 실시하지 않은 봉화의 소나무 조림지에서 연료량을 조사하여 산불이 발생했을 때 수관화로 확산될 확률이 낮아진다고 분석하였다.

수관화는 나무의 윗부분 즉 수관층(Crown Layer)을 태우는 산불을 의미하는데 지표화(Surface Fire)에 비해 속도가 빠르고, 강도가 높은 것이 일반적인 특성이다. 이로 인해 진화 시에는 헬기와 같은 공중 진화 자원이 필요하고, 피해 측면에서도 건축화재와 인명피해의 위험성이 높아진다.

James & Skinner(2005)는 산림 내 연료를 관리하기 위한 4가지 원칙을 다음과 같이 제시하였다. 첫 번째는 지표층 연료제거로 이는 화염높이를 감소시키는 이점이 있다. 두 번째는 가지치기인데, 지표에서 수관층 연료까지의 높이가 높아져 화염이 수관층까지 도달하기 어렵다. 세 번째는 숲아베기로 나무 사이의 간격을 멀어지게 하여 화염의 수평방향 확산을 단절시킨다. 마지막으로 산불에 잘 타지 않는 수종을 식재하여 산불이 나더라도 강도 자체가 높지 않게 유지하는 방법이다. 우리나라의 경우 대부분의 활엽수종이 내화수종으로 분류된다.

하지만 이러한 산불위험 저감을 위한 숲가꾸기에는 비용이 수반되므로 우선지역을 선정하는 과정이 필요하다. Paul, *et. al.*(2007)은 우선순위를 선정하기 위

한 평가방법으로 “산불위험 = 연료량(지표, 수관) + 산불확산 위험(확산속도, 화염길이, 수관화 위험성) + 발화 위험(합수율, 벼락빈도) + 산림인접지(Wildland Urban Interface) 면적”을 제시하였다.

한편 산불위험을 줄이기 위한 숲가꾸기의 성공여부를 판단하기 위해서는 시행 전·후, 연료량의 변화량과 더불어 대형 산불 위험의 변화, 즉 저감율을 수치화하여 평가할 수 있는 방법론이 필요하다. 이를 위해 Scott & Reinhardt(2001)는 수관화 위험을 전이지수(TI: Torching Index)와 확산지수(CI: Crowning Index)로 구분하여 제시하였다. 수관화 전이지수는 산불이 지표층에서 수관층으로 수직 이동되어 지표화가 수관화로 전이될 수 있는 바람의 세기를 뜻한다. 이 지수는 지표 연료의 양과 수관층 연료의 수분함유량, 지표층에서 수관층 연료까지의 거리를 의미하는 지하고(CBH: Canopy Base Height)와 경사에 영향을 받는다. 수관화 확산지수는 수관층으로 전이된 산불이 수관층을 통해 수평으로 확산될 수 있는 바람세기를 의미한다. 일반적으로 수관층의 연료량이 많을수록 약한 바람에도 쉽게 수관화로 확산된다. 이 지수는 수관층 연료의 수분함유량과 수관연료밀도(CBD: Canopy Bulk Density)와 경사(slope)에 영향을 받는다(Robert, *et. al.*, 2008). 여기서 수관 연료밀도는 수관이 차지하고 있는 공간에 탈수 있는 수관 연료량이 얼마나 있는지를 의미하여, kg/m³로 산출한다. 전이지수가 높으면 지표화에서 수관화로 번지는데 강한 바람이 요구되며, 비슷한 측면에서 확산지수가 높으면 이미 전이된 수관화가 인접한 나무의 수관층을 태우는데 강한 바람이 필요하다. 즉 전이지수, 확산지수가 높게 평가된 산림은 수관화의 위험성이 낮아 산불이 지표화로 번져 느린 확산속도와 낮은 산불강도를 보인다.

본 연구에서는 이러한 수관화 위험 평가기법을 활용하여 수관화에 취약한 소나무 숲을 대상으로 다양한 기준으로 숲아베기 했을 때, 지표층(낙엽), 중층(초본, 관목), 상층(수관층)의 산불연료량과 수관화 위험의 변화를 분석하였다. 이를 통해 대형 산불을 방지할 수 있는 숲아베기 기준을 제공하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 전라남도 순천시 별량면 금치리(N 34° 51'54", E 127° 22'57")와 경상남도 거창군 위천면 상천리(N 35° 43' 44", E 127° 47'22") 일대의 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill) 숲을 선정하였다 (〈Figure 1〉). 두 지역 모두 2009년에 100본/ha, 200본/ha, 300본/ha의 3가지 강도로 솎아베기가 실시되었다. 솎아베기 100본/ha의 의미는 100×100m 크기(1ha)의 산림에 100그루의 나무를 남겨 두고 나머지는 베어 내는 것을 의미한다. 전남 순천은 해발 350m의 남사면이며 경사는 0~10°이며, 경남 거창은 해발 700m의 남동사면이며 경사는 10~40°이다(〈Table 1〉).

2. 자료수집 및 분석

1) 연료구분 및 연료량측정

산림연료는 산불이 발생하였을 때 탈 수 있는 유기물질을 의미하며 연료의 수직위치(층위)별로 지표층, 관목층, 수관층으로 분류된다(Riano, *et. al.*, 2002). 따라서 지표층, 관목층, 수관층의 구분하여 연료 특성을 솎아베기 4년 후인 2013년에 조사하였다. 조사는 ha당 100본, 200본, 300본 솎아베기를 실시한 지역과 대조구로서 솎아베기를 하지 않은 지역 총 4곳으로 구분하여 진행하였다.

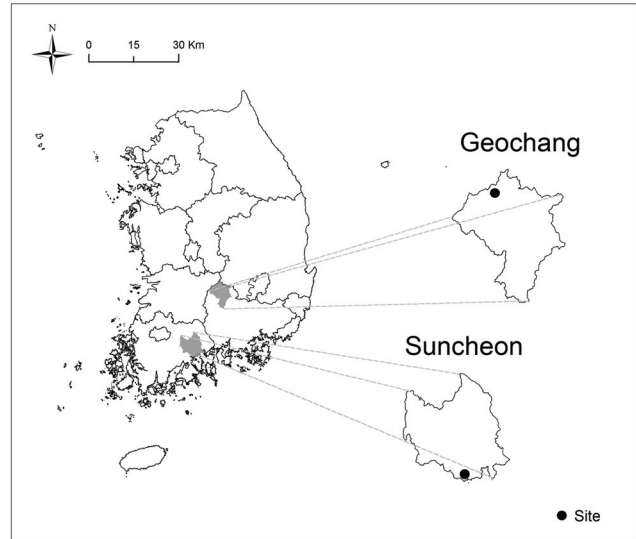


Figure 1. Location of study area

(1) 지표층(낙엽과 초본)

지름 18cm의 원통형 채집도구를 이용하여 균일하게 낙엽을 채집하고 85°C로 설정된 건조기에 무게가 더 이상 변하지 않을 때까지 건조한 뒤, 무게를 측정하였다. 아래 계산식 (1)에 대입하여 단위면적(ha)에 대한 지표층 연료량을 환산하였다.

$$fuelload = \frac{A(g)}{r^2 \times \pi} \times 1(ha) \quad (1)$$

A=fuel load in 18cm circle, r=1/2 diameter,
 π= The ratio of the circumference of a circle to its diameter.

(2) 관목층

1m × 1m 내의 관목을 채집하여 낙엽과 같은 방식으로 건조 후 아래 계산식 (2)을 활용하여 단위면적(ha)에 대한 연료량을 계산하였다.

Table 1. General geographic and stand information of study sites

Components	Geochang				Suncheon			
Location	N 35° 43'44" E 127° 47'22"				N 34° 51'54" E 127° 22'57"			
Elevation(m)	700				350			
Aspect	SouthEast				South			
Species	<i>Pinus rigida</i>				<i>Pinus rigida</i>			
Stand density(tree/ha)	control	treatment			control	treatment		
	1,500	100	200	300	3,200	100	200	300
Slope(°)	8	10	40	10	5	5	5	5

$$fuelload = \frac{A(g)}{1m \times 1m} \times 1(ha) \quad (2)$$

A=fuel load in 1m² square.

(3) 수관층

각 처리구별로 10×10m 크기의 조사구를 설정한 다음, 나무높이와 가슴높이의 지름을 측정하였다. 수관연료량은 가슴높이 지름을 독립변수로 하는 대수회기식(lnWt=β0+β1lnD, Wt: 수관연료량, β0: -1.8488, β1: 1.4156)을 이용(Kim, *et. al.*, 2011)하여 산출하였다. 수관층 연료량은 총수관연료량(Total Crown Fuel Load)과 탈수 있는 수관연료량(Available Crown Fuel Load)으로 구분하고 있는데, 본 연구에서는 수관화 확산 시 옩과 1cm 이하의 가지가 주로 연소된다는 연구 결과(Shinozaki, *et. al.*, 1964)를 활용하였다.

2) 수관화 위험도

(1) 수관연료밀도, 지하고

수관화 확산에서 중요한 변수인 수관연료밀도는 아래 식 (3)과 같이 수관연료량을 수관체적으로 나눈 값이다. 이때 수관체적(CV)은 Kim, *et. al.*(2011)이 소나무 연구를 통해 제시한 대수회기식(lnCV=β0+β1lnD)에서 β0:-1.6911, β1: 1.8978을 대입하여 산출하였다.

$$Crown\ bulk\ density(kg/m^3) = \frac{CFL_i}{CV} \quad (3)$$

CV=Crown volume(m³),

CFLi=Crown fuel load(kg) of ith individual trees.

지하고(CBH)는 개체목의 가장 낮은 곳의 가지를 개체목별로 측정하여 평균을 구하여 사용하였다. 앞선 연구 결과에 따르면 수관연료밀도와 지하고는 산불이 확산될 때 중요한 인자로서 지하고가 높거나 연료밀도가 낮을수록 수관화 가능성이 낮다고 알려져 있다(Sando & Wick, 1972; Mutch, *et. al.*, 1993; Scott, 1998).

(2) 수관화 전이지수와 수관화 확산지수

수관화 전이지수와 확산지수는 조사지역별 연료량 조사 결과 값을 Scott & Reinhardt(2002)가 개발한 NEXUS 2.0에 입력하여 산출하였다. 산출된 지수는 <Table 2>와 같이 Robert, *et. al.*(2008)이 제시한 기준에 따라 다섯 단계로 구분하였다. 첫 번째 기준 값 40.2km/h는 해당 산림에서는 수관화 전이와 확산이 이루어지지 않음을 의미한다. 두 번째 기준 값 64.4km/h는 전이지수가 높은 산림이라도 확산지수가 낮다면 전체적인 수관화 위험이 낮다는 것을 의미한다. “In-condition”은 수관화 전이 및 확산의 가능성이 낮은 범위를 나타내며, “Out-of-condition”은 수관화 전이 및 확산의 가능성이 높음을 의미한다.

그 외 해당 산림의 확산속도, 단위 면적당 열량, 산불강도, 화염길이는 Andrews(2009)가 개발한 BehavePlus를 이용하였다. BehavePlus는 연료 처리가 산불행동에 미치는 영향, 건축물을 보호하기 위한 산불위험성 평가, 처방화입 적지 및 적기 선정 등에 폭넓게 활용되고 있다.

Table 2. Hazard assessment, condition rating and risk levels

Risk Level	Condition rating	Hazard assessment level(km/h)	
		Torching index	Crowning index
Very low	In-condition	≥ 40.2	≥ 40.2
Low	In-condition	< 40.2	≥ 64.4
Medium	Out-of-condition	< 40.2	40.2 ≤ CI < 64.4
Medium-high	Out-of-condition	≥ 40.2	< 40.2
High	Out-of-condition	< 40.2	< 40.2

※ Source: Robert, *et. al.*(2008).

III. 결과 및 고찰

1. 솜아베기에 따른 층위별 연료량 변화

솜아베기 후 강도(100본, 200본, 300본, 무처리구)에 따른 층위별(지표층, 관목층, 수관층) 연료량의 변화는 <Figure 2>와 <Figure 3>에 제시되어 있다. 솜아베기의 강도가 강할수록 지표층과 수관층의 연료량은 줄어들고, 관목층의 연료량은 늘어나는 경향을 보였다.

1) 지표층

솜아베기의 강도가 강할수록 지표층의 연료량은 줄어드는 결과를 보였다. 4년 후의 연료량은 솜아베기의 강도가 클수록 각 처리구의 연료량은 줄어드는 것으로 측정되었다. 이는 솜아베기 직후에는 기존의 낙엽이 완전히 분해되지 않고 남아있었으나, 4년 후에는 낙엽은 분해되고, 솜아베기로 인해 나무의 본수가 줄어들면서 새로운 낙엽의 공급량이 줄었기 때문이다. 이를 자세히 살펴보면 거창지역의 경우 100본의 지표층 연료량은 ha당 5.85t이었고, 200본은 10.66t, 300본은 11.25t, 무처리구는 16.47t이었다. 순천지역도 비슷하였는데, 100본은 7.17t/ha, 200본은 8.34t, 300본은 9.62t, 마지막으로 무처리구 연료량은 15.92t이었다.

2) 관목층

Wang, *et al.*(1995)은 솜아베기 강도가 증가할수록 임분 내로 유입되는 광량(Photosynthetically active radiation)이 증가한다고 보고하였다. 이는 관목층 연료

량의 증가로 이어진다. Han, *et al.*(2012)은 산개나리의 생장특성이 광량증가로 인해 생장량이 증가하고, Jun, *et al.*(1999)은 수관이 형성되지 않은 곳은 숲 내로 유입되는 광량이 많아 하층식생이 잘 자란다고 하였다.

본 연구 결과도 이와 유사하게 나타났다. 관목층의 연료량은 무처리구 < 300본 < 200본 < 100본 처리구의 순서로 많았다. 거창지역의 경우 무처리구 연료량은 ha당 1.00t으로 가장 적었고, 300본은 3.56t, 200본은 3.90t, 100본은 4.67t으로 가장 많았다. 순천지역도 유사하게 무처리구에서는 4.26t이었지만, 300본에서는 4.69t, 200본에서는 8.29t, 100본에서는 10.38t으로 증가하였다. 이러한 결과를 통해 솜아베기 강도가 강할수록 하층으로 광량의 유입이 많아지면서 연료량이 증가한다는 기존 연구 결과를 재확인할 수 있었다.

3) 수관층

유효수관연료량은 100본 처리구 < 200본 < 300본 < 무처리구의 순서를 보였다. 이는 솜아베기 강도가 강할수록 나무 본수 감소로 인해 유효수관연료량이 줄어들기 때문이다. 거창지역의 경우 100본 처리구 연료량은 ha당 1.94t, 200본은 2.50t, 300본은 3.52t이었지만, 무처리구에서는 16.75t로 탈 수 있는 수관층 연료물질이 현저히 많았다. 순천 지역의 분석 결과도 이와 유사하다. 100본 처리구에서는 0.66t, 200본에서는 1.81t, 300본에서는 3.44t으로 점차 증가하였고, 마지막으로 무처리구에서는 16.33t이었다.

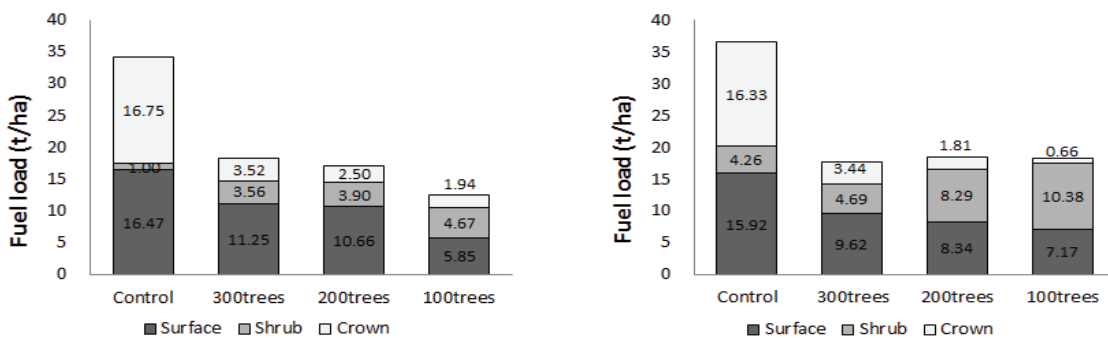


Figure 2. Fuel load (tons/ha) by thinning intensity in Geochang(left) and Suncheon(right)

2. 숲아베기에 따른 수관화 위험도 변화

1) 수관화 위험성 분석 결과

숲가꾸기 4년 후의 수관화 위험성 분석 결과가 <Table 3>에 제시되어 있다. 수관연료밀도는 순천 무처리구에서 0.160kg/m³으로 가장 높았고, 순천 100본 처리구에서 0.012kg/m³으로 가장 낮았다. 거창의 경우 무처리구에서는 0.064kg/m³이었으나 숲아베기의 강도가 강해짐에 따라 점점 줄어들다가 100본 처리구에서 0.015kg/m³로 약 76%가 감소하였다.

수관화 전이지수의 경우 순천의 200본 처리구만 제외하고 Robert, et. al.(2008)이 제시한 40.2보다 낮아서 약한 바람에도 지표화가 수관화로 쉽게 전이될 수 있다. 전이지수는 숲아베기 강도 혹은 시행여부와 상관없이 낮은 수치를 보였다. 이는 숲아베기를 할 때 가지 치기를 하지 않아, 지표면에서 수관층 연료까지의 거리가 변하지 않았고, 지표층 낙엽·초본, 관목층의 연료량이 크게 변하지 않았기 때문이다. 즉 무처리구에서는 관목층의 연료량이 줄어든 반면 지표 낙엽연료량이 늘었고, 100본, 200본, 300본 처리구에서는 지표 낙엽 연료량이 줄어든 대신 광량 증가로 관목층의 연료량이 늘었기 때문이다.

수관화 전이지수가 숲아베기 강도에 따라 변함이 거의 없는 반면에 수관화 확산지수는 강도별 저감 효과가 컸다. 즉 거창 지역의 경우 무처리구에서는 82.24km/h였으나, 300본에서는 155.20km/h, 200본에서는 162.56km/h, 100본에서는 228.48km/h까지 증가하였다. 순천 지역도 마찬가지로 무처리구에서는 41.92에서 100본 강도로 숲아베기를 할 경우 262.24km/h로 효과가 나타났다. 평균

적으로 100본 처리구는 190%, 200본 처리구 60%, 300본 처리구는 100%의 감소율을 보였다.

Robert, et. al.(2008)이 제시한 산불등급을 적용하여 분석한 결과, 거창 지역의 경우 무처리구 포함 모든 숲아베기 지역이 낮음(Low)으로 평가되었다. 순천지역의 경우 무처리구에서는 중간(Medium)이었으나 숲아베기 후에는 매우 낮음(Very Low), 낮음(Low)으로 떨어졌다. 따라서 숲아베기를 실시한 지역은 지표화가 수관화로 쉽게 전이되더라도 수관층으로 확산되지 못하고 지표화 위주로 확산될 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 연구결과들은 나무들 간의 간격이 6m 이상으로 ha당 357본 이하이면 수관화로 확산되더라도 곧 지표화로 변해 산불강도가 약해진다는 기존 Kim, et. al.(2013)의 연구결과와 유사하다.

2) 산불행동 특성 분석 결과

확산속도, 단위면적당 열방출량, 화선에서의 강도, 화염길이 등을 포함한 산불행동 특성 분석 결과는 <Table 4>에 제시되어 있다. 산불행동을 설명하는 이 4가지 인자들은 비슷한 패턴을 보였다. 즉 무처리구에서 확산속도가 가장 빠르고, 열방출량 또한 많으며, 화선 강도는 높고, 화염은 길었다. 숲아베기 강도가 강해질수록 즉 300본, 200본, 100본 순서로 속도는 느려지고, 열방출량은 감소하며 화선 강도는 약해지고, 화염 길이는 짧아졌다.

자세히 살펴보면 확산속도는 무처리구에서는 시간당 약 20m로 변했지만, 100본 처리구에서 각각 2.01(거창), 5.05m(순천)로 느려졌다. 열방출량은 거창의

Table 3. Crown fire hazard and fire risk level in Geochang and Suncheon region after thinning operation

Treatment (ha)	Geochang				Suncheon			
	Canopy bulk density (kg/m ³)	Torching index (km/h)	Crowning index (km/h)	Fire Risk Level*	Canopy bulk density (kg/m ³)	Torching index (km/h)	Crowning index (km/h)	Fire Risk Level*
100 trees	0.015	26.72	228.48	Low	0.012	32.48	262.24	Low
200 trees	0.023	36.96	162.56	Low	0.023	46.08	166.08	Very Low
300 trees	0.026	35.20	155.20	Low	0.040	30.56	112.48	Low
control	0.064	33.28	82.24	Low	0.160	30.40	41.92	Medium

* Source: Robert, et. al.(2008).

Table 4. Forest fire behavior characteristics in Geochang and Suncheon region after thinning operation

Treatment (ha)	Geochang				Suncheon			
	Rate of spread (m/h)	Heat per unit area (btu/m ²)	Fireline intensity (btu/m/s)	Flame length (m)	Rate of spread (m/h)	Heat per unit area (btu/m ²)	Fireline intensity (btu/m/s)	Flame length (m)
100 trees	2,01	2,448	3	0,13	5,05	3,096	6	0,23
200 trees	32,19	5,193	51	0,57	10,06	3,672	12	0,27
300 trees	8,05	8,190	18	0,37	12,07	5,067	21	0,37
control	20,14	22,545	162	0,93	20,16	16,641	129	0,87

경우 무처리구에서는 22,545에서 100본 처리구에서 2,448로 줄어들었다. 순천의 경우에는 16,641에서 3,096으로 줄어들었다. 화선에서의 강도는 줄어든 격차가 더욱 컸다. 거창의 경우 무처리구에서는 162였지만, 100본 처리구에서는 3으로 줄었고, 순천에서도 129에서 6으로 줄어들었다. 화염길이는 거창, 순천 모두 약 1m 수준이었으나, 100본 처리구에서는 각각 0.13, 0.23m로 낮아졌다.

거창 지역의 200본 처리구에서는 무처리구보다 산불 확산속도가 더 빠른 것으로 분석되었고, 열방출량과 화선에서의 강도, 화염길이는 300본 처리구보다 높게 나타났다. 200본 처리구의 지형 경사는 40°로 다른 처리구 경사 8°, 10°, 10°에 비해 급해 복사열이 효과적으로 전달되기 때문이다. 이는 An, *et. al.*(2008)이 실험한 경사에 따른 산불의 확산속도에서 경사가 급할수록 확산속도가 빨라진다는 결과와 유사하다.

IV. 결론

본 연구에서는 숲아베기와 같은 숲가꾸기로 인한 산불위험 저감량을 수치로 평가하고자 진행되었다. 이를 위해 경남 거창과 전남 순천의 리기다소나무림을 대상으로 강도별로 숲아베기를 실시한 후 연료량을 조사하고, 산불 확산속도, 열방출량, 화선강도, 화염길이를 도출하였다. 또한 대형 산불의 주원인인 수관화의 위험성을 수관화 전이지수와 확산지수로 산출하여 분석하였다. 숲아베기가 연료량에 미치는 영향은 층위별로 차이가 있었다. 숲아베기 강도가 강할수록 지표층과 수관층

의 연료량은 줄어들었고, 관목층 연료량은 증가하였다. 숲아베기만 실시한 경우 지표화에서 수관화로의 전이 위험성은 줄어들지 않는 것으로 분석되었기 때문에, 가지치기를 통해 지하고를 높여 전이 가능성을 줄여야 한다. 수관화 확산의 경우에는 산불강도가 강해질수록 효과가 큰 것으로 나타나 수관화 위험을 줄이는데 효과적이었다. 후속 연구로써, 나무의 경우 계속 성장하므로 숲아베기의 산불위험 저감 효과가 어느 기간 동안 지속되는지를 모니터링 하여 분석할 필요가 있다.

References

- An, Sang Hyun and Young Chul Shin. 2008. Spread Speed of Forest Fire Based on Slope. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 8(4): 75-79.
- Andrews, L. P. 2009. *BehavePlus Fire Modeling System. Version 5.0*. RMRS-GTR213. 111.
- Collett, N., G. Fred, and G. Neumann. 1995. Effects of Two Spring Prescribed Fires on Epigeal Coleoptera in Dry Sclerophyll Eucalypt Forest in Victoria, Australia. *Forest Ecology and Management*. 76: 69-85.
- Han, Sim Hee, Gil Nam Kim, Du Hyun Kim, and Kyung Hee Kim. 2012. Correlation between Relative Light Intensity and Physiological Characteristics of Forsythia Saxatilis in Bukhansan Natural Habitats. *Journal of Korean Forest Society*. 101(2): 236-243.
- James, K. Agee and C. N. Skinner. 2005. Basic Principles of Forest Fuel Reduction Treatments. *Forest Ecology and Management*. 211: 83-96.
- Jun, Yong Huan, Xianyu Meng, and Don Koo Lee. 1999. Biomass

- Productivity and Its Vertical Allocation of Natural Pinus Densiflora Forests by Stand Density. *Journal of Korean Forest Engineering*. 18(2): 92-99.
- Kim, Dong Hyun, Sung Cheol Jung, Kyo Sang Koo, and Myung Bo Lee. 2010. Combustion Characteristics of the 5 Species in Warm Temperate Forest Zone. *Korean Institute of Fire Science and Engineering*. 408-412.
- Kim, Dong Wook, Woo Dam Chung, Russell A. Parsons, and Byung Doo Lee. 2013. Impact Assessment of Tree Spacing on Crown Fire Spread Distance for Korean Pine Stands Using a Fire Simulator. *2013 Council on Forest Engineering Annual Meeting*.
- Kim, Sung Yong, Byung Doo Lee, Yeon Ok Seo, Mi Na Jang and Young Jin Lee. 2011. Effects of Forest Tending Works on the Crown Fuel Characteristics of Pinus Densiflora S. et Z. Stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society*. 100(3): 359-366.
- Korea Forest Service. 2015. *Statistical Yearbook of Forestry*.
- Korea Forest Service. 2016. *2015 Statistical Yearbook of Forest Fire*.
- Lee, Byung Doo. 2005. Analysis of Behavior Characteristics of the 2000 Samcheok Forest Fire Using GIS/RS and Development of a Forest Fire Growth Prediction Model. Ph. D. Dissertation. Seoul National University.
- Mutch, R. W., S. F. Aemo, J. K. Brown, C. E. Carlson, R. D. Ottmar, and J. L. Peterson. 1993. *Forest Health in the Blue Mountains: A Management Strategy for Fire-adapted Eco Systems*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-310.
- Paul, F. Hessburg, Keith M. Reynolds, Robert E. Keane, Kevin M. James, and R. Brion Salter. 2007. Evaluating Wildland Fire Danger and Prioritizing Vegetation and Fuels Treatments. *Forest Ecology and Management*. 247: 1-17.
- Riano, D., Emillo Chuvieco, Javier Salas, Alicia Palacios-Orueta, and Aitor Bastarrika. 2002. Generation of Fuel Type Maps from Landsat TM Images and Ancillary Data in Mediterranean Ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research*. 35: 1301-1315.
- Robert, J. H. Jr., Karen L. Abt, and Wayne Shepperd. 2008. Efficacy of Mechanical Fuel Treatments for Reducing Wildfire Hazard. *Forest Policy and Economics*. 10: 408-414.
- Rothermel, R. C. 1991. *Predicting the Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains*. Research Paper.
- Ryu, Gye Sun, Byung Doo Lee, and Sung Yong Kim. 2015. Developing Techniques of Mapping and Indicator Selection for Forest Fire Vulnerability. *Korean Review of Crisis and Emergency Management*. 11(11): 323-337.
- Sando, R. W. and C. H. Wick. 1972. *A Method of Evaluating Crown Fuels in Forest Stands*. Research Paper NC-84. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Scott, J. H. 1998. *Sensitivity Analysis of a Method of for Assessing Crown Fire Hazard in the Northern Rocky Mountains*.
- Scott, J. H. and E. D. Reinhardt. 2001. *Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior*. RMRS-RP 29.
- Scott, J. H. and E. D. Reinhardt. 2002. Estimating Canopy Fuels in Conifer Forests. *Fire Management Today*. 62(4): 45-50.
- Shinozaki, Kyoji Yoda, Kazuo Hozumi, and Tatu Kira. 1964. A Quantitative Analysis of Plant Form - The Pipe Model Theory. I. Basic Analysis. *Japanese Journal of Ecology*. 14: 97-105.
- Wang, J. R., S. W. Simard, and J. P. Kimmins. 1995. Physiological Responses of Paper Birch to Thinning in British Columbia. *Forest Ecology and Management*. 73: 177-184.

Korean References Translated from the English

- 김동현, 정성철, 구교상, 이명보. 2010. 난대지역 5수종의 연소 특성. *한국화재소방학회 학술발표논문집*. 408-412.
- 김성용, 이병두, 서연옥, 장미나, 이영진. 2011. 숲가꾸기 사업 이 소나무림의 수관연료특성에 미치는 영향. *한국임학 회지*. 100(3): 359-366.
- 김영환, 맹현우, 이돈구. 1999. 백두산 동북부지역 소나무 천연 림에서 밀도에 따른 임분의 Biomass 생산성 및 수직배분. *임산에너지*. 18(2): 92-99.
- 산림청. 2015. 임업통계연보.
- 산림청. 2016. 2015 산불통계연보.
- 안상현, 신영철. 2008. 경사에 따른 산불의 확산속도. *한국방재 학회논문집*. 8(4): 75-79.

유계선, 이병두, 김성용. 2015. 산불취약성지도 작성을 위한 지표 선정 및 지도화 기법 개발. 한국위기관리논집. 11(11): 323-337.

이병두. 2005. GIS와 RS를 이용한 2000년 삼척산불 행동 특성 분석 및 산불확산예측모델 개발. 서울대학교 대학원 농학박사학위논문.

한심희, 김길남, 김두현, 김경희. 2012. 북한산 산개나리의 자생지 내 상대 광량과 생리적 특성간 상관 관계. 한국임학회지. 101(2): 236-243.

Received: Jul. 14, 2016 / Revised: Aug. 11, 2016 / Accepted: Aug. 17, 2016

숙아베기에 따른 산불 연료량과 수관화 위험도 변화

국문초록 숲가꾸기는 연료량을 줄여 산불의 위험을 줄이는 근본적인 방법이다. 본 연구에서는 숙아베기가 산불 연료량과 수관화 위험도, 산불행동에 미치는 영향을 분석하였다. 경남 거창과 전남 순천 2곳을 대상으로 숙아베기 미시행지(대조구), 강도(ha당 100본, 200본, 300본)에 따라 지표층, 관목층, 수관층의 연료량을 측정하였으며 NEXUS 2.0 프로그램을 이용하여 수관화 위험성을 전이·확산지수로 구분하여 산출하였다. 산불행동은 BehavePlus를 이용하였다. 숙아베기의 강도가 강할수록 지표층과 수관층의 연료량은 줄어들고, 관목층은 늘어났다. 수관화 전이지수는 숙아베기 강도에 따라 변함이 거의 없는 반면에 수관화 확산지수는 강도가 강할수록 저감 효과가 컸다. 숙아베기를 실시한 산림은 지표화가 수관화로 전이되더라도 수관층을 타고 확산될 가능성은 낮았다. 숙아베기 강도가 강해질수록 확산속도는 느려지고, 열방출량은 작아지며 화선 강도는 약해지고, 화염길이는 짧아졌다. 이러한 결과들은 대형산불을 예방하기 위한 숲가꾸기 지침 개발에 활용이 가능하다.

주제어 : 산불, 숙아베기, 연료, 수관화위험, 수관화 확산지수, 수관화 전이지수

Profiles **Byung Doo Lee** : He received his Ph.D. in Agriculture from Seoul National University in August 2005 with his Ph.D. paper titled "Analysis of Behavior Characteristics of the 2000 Samcheok Forest Fire Using GIS/RS and Development of a Forest Fire Growth Prediction Model". He is currently working for Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science as a senior researcher. He has conducted various research projects on forest fire and building on it, published many academic papers. His current research interest includes forest fire prediction and suppression techniques and forest danger assessment (byungdoo@korea.kr).

Yeong Tae Bae : He received his Master of Science degree in forestry from Kookmin University in August 2007. He has researched characteristics of forest fire outbreak and fire spread after outbreak at Forest Disaster Management Division of the National Institute of Forest Science from 2009 to 2014. He is currently taking his Ph.D. course at Kookmin University. His research interest includes risk assessment and analysis based on correlation between forest fire and weather (pagans98@hanmail.net).

Sung Cheol Jung : He received his Ph.D. in Agriculture from the University of Tokyo in 2009 with his Ph.D. paper titled "Study on the Reproductive Ecology of Robinia Pseudoacacia in a Pinus Thunbergii Forest of Kujukurihama Coast". He is currently working for Warm Temperature and Subtropical Forest Research Center of the National Institute of Forest Science as a junior researcher. He has conducted a variety of research projects on Gotjawal forest; volcanic terrain formed by lava flow, and Abies koreana in Mt. Halla. Building on it, he has published a number of academic papers. His research interest includes forest ecology(scjungkr@korea.kr).