韓國環境復元技術學會誌 12(5) : 28～41(2009)
J. Korean Env. Res. Tech. 12(5) : 28～41(2009)

산림 공간구조 특성과 산불 연소강도와의 관계에 관한 연구*

이상우[1] · 임주훈[2] · 원명수[3] · 이주미[4]

[1] 건국대학교 환경과학과 · [2] 국립산림과학원 산림복원연구과
[3] 국립산림과학원 산림방재과 · [4] 건국대학교 대학원

Linking Spatial Characteristics of Forest Structure and Burn Severity*

Lee, Sang-Woo[1] · Lim, Joo-Hoon[2] · Won, Myoung-Su[3] and Lee, Joo-Mee[4]

[1] Dept. of Environmental Science, Konkuk University,
[2] Division of Forest Restoration, Korea Forest Research Institute,
[3] Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute,
[4] Graduate Program, Konkuk University.

ABSTRACT

Because fire has significant impacts on fauna and flora in forest ecosystems, as well as socioeconomic influences to local community, it has been an important field of study for decades. One of the most common ways to reduce fire risk is to enhance fire-resilience of forest through fuel treatments including thinning and prescribed burning. Since fuel treatment can't be practiced over all forested areas, appropriate and effective strategies are needed. The present study aims to look at the relationship between spatial characteristics of forest structure measured with landscape pattern metrics and burn severity to provide guidelines for effective fuel treatments. Samchuck fire was selected for the study, and 232 grids covering the study areas were generated, and the grid size was 1km. The burn severity is measured with dNBR derived from satellite imagery, and spatial characteristics of forest structure were measured using FRAGSTATS for both landscape and class levels for each 1km grid. The results of this study strongly indicated that heterogeneity in composition and configuration of forests may

* 본 연구는 국립 산림과학원 장기생태 모니터링 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구결과의 일부는 Forest Ecology and Management에 출판을 위해 제출되었음.

Corresponding author : Lee, Joo-Mee, Dept of Enviromental Science, Konkuk University,
Tel : +82-2-6319-8872, E-mail : olive199@konkuk.ac.kr

Received : 21 July, 2009. **Accepted** : 20 October, 2009.

significantly reduce burn severity. By enhancing heterogeneity of forests, fuel treatments for fire-resilience forest could be more effective.

Key Words : *Fire resilience, Burn severity, dNBR, Fuel treatments.*

I. 서 론

산불은 산림의 연소과정을 통하여 식생, 토양, 장기적인 산림생태계의 구조적 변화뿐만 아니라 지역주민들의 사회경제적 피해를 발생시키기 때문에 산림관련 연구자 및 정부에서 많은 관심을 가져온 연구분야이다(Collins et al., 2007; Delcourt and Delcourt, 1997; Gustafson et al., 2004; Lloret et al., 2002; Nunes et al., 2005; Turner et al., 1994; Wimberly and Reilly, 2007). 기존 연구에 의하면 연소강도, 확산, 빈도 등 산불의 여러 특성들은 지형, 기후, 식생과 세가지 요인의 복합적인 상호작용에 의하여 영향을 받는다. 지형요인인 고도, 경사, 향 등은 식생 종조성, 연료의 습도 등을 통하여 산불의 특성에 직간접적 영향을 주는 변수로 알려져 있다(이시영, 1994; Bigler et al., 2005). 기후 또한 산불의 발생 및 확산 등에 큰 영향을 주는 요인으로 알려져 있는데, 특히 풍속과 습도 등이 큰 영향을 준다(Collins et al., 2007; Pyne et al., 1996; Rothermel, 1972). 식생은 산불의 발생과 확산에 필요한 연료를 공급하는 중요한 변수이다(Pyne et al., 1996). 특히 지형요인과 기후요인은 산불의 관리 및 억제를 위하여 조절하기 어려운 고정 요소들이다. 하지만 식생요소의 경우 정책과 관리를 통하여 조절이 가능한 변동요소이다. 이러한 산불의 연료적 측면에서 근래 많은 연구들은 식생과 식생의 구조적 조절을 통하여 산불에 대한 저항력을 높이거나 산불의 피해를 줄일 수 있는 방안에 많은 관심을 가져 왔다. 산불의 연료 조절 기법으로는 “thinning(밀도조절)”기법과 “prescribed burning(계획산불)”이 가장 많이 사용되고 있으나(Graham et al., 2004; Arno and Allison-Bunnell, 2002), 우리나라에서는 현재 밀도조절 기법만 사용되고 있다. 연료조절 기법은 산불 발생시 연료의 공급을 계획적으로 제한하는 방법으로 많은 지역에서 사용되고 있다.

연료는 산불의 확산과 강도에 영향을 미치는 죽거나 살아있는 산림 생물군(biomass)의 물리적 특성을 지칭한다(Andrews and Queen, 2001; Burgan et al., 1998). 만약 산불의 발생, 확산, 강도와 같은 여러 특성들이 연료의 특성에 종속적이고, 또한 연료는 산림의 구조에 영향을 받는다면 산림의 구조와 산불 특성과의 관계를 이해하는 것이 효과적인 연료관리 계획에 필수적이라 할 수 있다. 산불의 여러 특성과 산림구조의 관계는 근래 많은 연구에서 그 중요성이 강조되고 있다(Bajocco and Ricotta, 2008; Kerby et al., 2007; Nunes et al., 2005; Ryu et al., 2007; Wimberly and Reilly, 2007). 예를 들면, Ryu et al.(2007)은 미국 위스콘신 국유산림을 대상으로 한 연구에서 경관지수(landscape metrics)로 측정된 산림의 다양한 구조가 산림 피해지와 의미 있는 관계가 있다고 보고하였다. 그들은 연구결과를 근거로 산불피해를 줄일 수 있는 산림구조는 다양한 산림 식생 종조성, 불규칙 형태의 산림패치, 그리고 작고 동질적인 패치의 규모 등이 포함되어야 한다고 결론지었다.

이러한 측면에서 본 연구는 피해 전 산림구조와 산불 강도(burn severity)의 관계를 분석하고 이것을 기초로 산림의 산불저항력 증진방안을 도출하는 데에 목적을 두고 있다. 산림의 경관생태적 구조는 경관생태적 측면에서 산림의 구성(composition)과 짜임(configuration)으로 나뉘어 볼 수 있다(McGarigal and Marks, 1995; Turner et al., 2001). 다른 지역을 대상으로 한 연구에서 산림구조는 다양한 산불의 특성에 직간접적 영향을 주는 것으로 밝혀졌다(González et al., 2005;

Kerby et al., 2007; Lloret et al., 2002; Nunes et al., 2005; Ryu et al., 2007). 또한, 피해 전 산림구조는 산불 발생 후 산림의 회복기간과 종조성에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Brown, 2000). 피해 전 산림구조는 산림 연료의 유형, 공간적 분포, 산불민감도 그리고 연료량 같은 연료의 특성에 영향을 주며, 이것은 다시 산불 강도에 영향을 줄 수 있다. 산림에서 모든 연료조절은 필연적으로 산림구조에 직접적인 영향을 주게 된다. 또한, 경제성 및 접근성 측면에서 모든 산림지역에 연료조절 기법의 적용이 어려운 현실을 고려할 때 본 연구의 결과는 효과적인 연료조절 기법의 적용에 대한 지침을 제공할 수 있으며, 궁극적으로는 산불에 저항력 있는 산림의 조성과 관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지 및 산불특성

본 연구의 대상지는 그림 1에서와 같이 2000년에 대규모 산불로 큰 피해가 발생한 삼척지역으로 정하였다. 삼척산불은 2000년 4월 7일 지역주민이 쓰레기를 소각하는 과정에서 발생하여 동년 4월 15일까지 9일 동안 약 16,151ha의 산림에 피해를 입힌 건국 이후 우리나라에 발생한 최대 연소면적으로 기록된 대규모 산불이다(이병두 등, 2008). 산불 발생시 최대풍속은 26.8m/sec, 그리고 최소 습도는 약 7%로 기후가 산불 피해의 확산에 큰 역할을 한 것으로 보인다. 산불 피해 전 산림은 대체적으로 소나무(*Pinus densiflora*)와 참나무(*Quercus mongolica*)-소나무혼효림(*P. densiflora*)이 우점하고 있었다. 피해지 평균 수령은 약 30년으로 6.25 전쟁 후 시작된 산림재생과정상 소나무에서 참나무로 변화하는 천이의 과정으로 이해 할 수 있다. 산불피해지역에는 산불의 생태적 기능과 재생과정을 연구하기 위하여 장기생태 모니터링 조사구(LTER, Long-Term Ecological Research)가 국립산림과학원에 의해

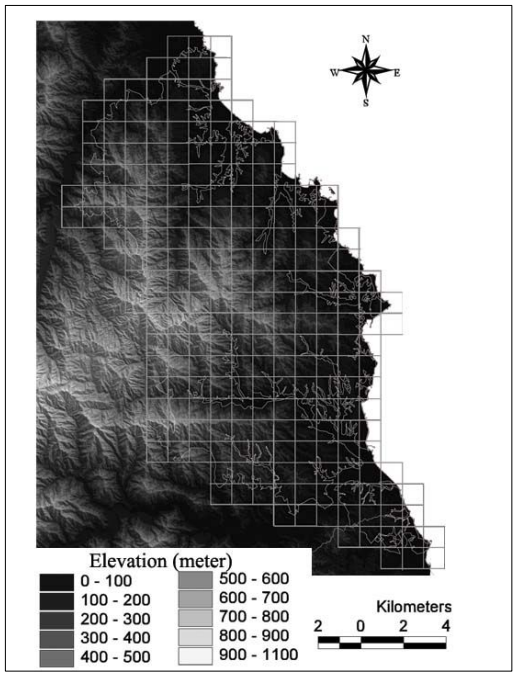

Figure 1. Elevations of the study areas and analysis unit boxes (1km).

설치되어 운영되고 있으며 본 연구는 LTER 연구의 일환으로 수행되었다. 대상지 평균 표고는 그림 1에서와 같이 257m이며, 평균경사는 약 21.4%이었다. 전반적으로 삼척 산불피해지는 서측에 표고 900m 정도의 높은 지형이 위치하고 동측의 경사지는 동해안 해안선과 경계를 이루고 있다. 분석을 위하여 1km 격자를 생성하였으며, 격자 별 표고와 경사도를 평균값을 구하였다.

2. 연소강도 측정

연소강도(burn severity)는 산불에 의해 발생된 환경요소의 변화 정도로 정의 할 수 있다(Key and Benson, 2006; Lentile et al., 2006; Morgan et al., 2001). 다양한 환경요소들이 연소강도의 측정을 위해 사용되는데, 일반적으로 토양의 이화학적 변화, 식생의 변화, 연료의 변화 등이 포함된다. 특히, 원격탐사 분야에서 연소강도를 측정을 하기 위해 식생의 연소와 토지표면의 반사율 변화가 가장 보편적으로 사용된다(Conard et

Table 1. Burn severity classes and proportions of Samchuck areas.

Severity	Intervals*	Damaged area (ha)**	Percentage (%)
Unburned	$x < \mu\text{-}2\delta$	93	0.6
Low	$\mu\text{-}2\delta \leq x < \mu\text{-}1\delta$	811	5.0
Moderate	$\mu\text{-}1\delta \leq x < \mu$	4,743	29.3
High	μ	5,421	33.5
Very High	$\mu \leq x < \mu+1\delta$	3,894	24.0
Extreme	$\mu+1\delta \leq x < \mu+2\delta$	1,238	7.6

* x = observed dNBR value, μ (mean) = 171.1, and δ (standard deviation) = 37.99.
** Total damaged area is 16,201 ha.

al., 2002; Key and Benson, 2002; Miller and Yool, 2002; White et al., 1996; Zhang et al., 2003). 또한, 많은 연구에서 연소강도는 산불강도(fire severity)와 혼용되고 있는데 (Lentile et al., 2006), 일반적으로 산불강도는 지역범위에서 산불에 의해 발생되는 단기적 환경변화를, 연소강도는 지역-광역범위에서 발생되는 장단기적 환경변화를 지칭한다(Lentile et al., 2006). 본 연구에서는 인공위성 이미지를 사용한 연소강도(NBR, Normalized Burn Ratio) 측정과의 용어상 일관성을 유지하며, 보다 넓은 의미에서의 환경변화를 다루기 위해 산불강도(Fire severity)보다는 연소강도(Burn severity)를 사용하기로 하였다.

삼척 산불피해지의 연소강도 측정을 위해 산불발생 전과 후의 Landsat 인공위성 이미지가 사용되었다. 인공위성 사진을 이용하여 산불 영향을 측정하는 것은 기존의 많은 연구에서 그 효용성이 검증되었는데(Collins et al., 2007; Key and Benson, 2002; Kushla and Ripple, 1998; Turner and Romme, 1994; Wimberly and Reilly, 2007), 근래에는 특히 dNBR(delta Normalized Burn Ratio)기법이 많이 사용되고 있다(원명수 등, 2008; Cocke et al., 2005; Collins et al., 2007; Wimberly and Reilly, 2007). dNBR기법은 산불발생 전과 후의 인공위성 이미지 4번 밴드와 7번 밴드를 이용하여 계산되는데, NBR의 계산식은(band 4-band7)/(band4+band7)이다. Band 4과 5번을 이용한 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 또한 많은 연구에서 산불의 연소강도를 측정하기 위해 사용되어 왔는데, 일반적으로 dNBR 값이 연소강도를 더 잘 표현한다(Key and Benson, 2006; Lentile et al., 2006; van Wagtendonk et al., 2004).

삼척 산불피해지의 연소강도(dNBR)측정을 위하여 1999년 5월 7일 촬영된 이미지와 2000년 5월 5일 촬영된 Landsat 30m 해상도의 영상이 사용되었다. 산불발생 전과 후 영상의 연소강도를 각각 계산한 다음 $dNBR_{1999\text{-}2000}$을 계산하였다. dNBR결과는 다시 RSAC(2005) 기준에 따라 표 1과 같이 6개의 연소강도 군으로 분류하였다. 분류결과 삼척 산불피해지의 연소강도는 높음 강도(High)가 전체의 33.5%를 차지하여 가장 높은 비율을 보여주었다. 그 다음으로 높은 비율을 보인 연소강도는 보통(Moderate)이 29.3%, 그리고 매우 높음 강도(Very High)가 24%를 지하였다. 그림 2는 연소강도 분류 별 공간분포를 보여주고 있는데, 전반적으로 높은 연소 강도는 대상지의 낮은 지역인 동-남측에 분포되어 있고 낮은 연소강도는 높은 지역인 북-서면에 위치하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 분석 단위는 기존 연구에서 산림구조의 분석에 유용한 단위로 알려진 1km 격자를 사용하였다(Lloret et al., 2002). 각 1km 격자 별 연소강도는 각 격자 내부의 dNBR값을 평균하여 구하였다.

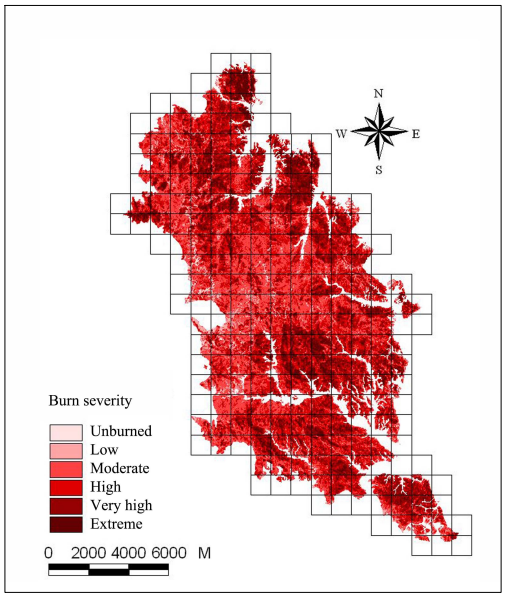

Figure 2. $dNBR_{1999\text{-}2000}$ classes and spatial distributions over the study areas.

3. 산림구조 측정

산림의 구조는 다양하게 측정될 수 있는데, 산림의 구성과 구조적 이질성에 관심을 둔 본 연구는 경관지수(landscape metrics)를 이용하여 산림의 구조를 측정하였다. 경관지수는 많은 연구에서 광범위한 지역의 토지피복 및 산림경관의 이질성 측정을 목적으로 사용되어 왔으며, 그 효용성이 높은 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2008; Lloret et al., 2002; McGarigal and Marks, 1995; Ryu et al., 2007). 국가 산림 분류도에 기초하여 삼척지역의 산불발생 전의 산림분포를 GIS 자료화 한 뒤 그리드(Grid) 형태로 변환하였다(그림 3). 국가 산림분류도의 분류기준에 의하면 혼효림은 침엽수와 활엽수의 수관점유면적이 25% 이상 75% 미만인 임분이다. 변환된 그리드 형식의 국가 산림 분류도 위에 1km 크기의 격자를 생성하여 격자별 산불피해 전의 경관지수를 계산하였다. 그림 3에서 연구대상지의 산불 피해 전 전체적인 산림분포 특성은 저지대인 동측에 소나무가 주로 분포하고 있고, 혼효림은 주로 고지대인 서측에 분포하고 있었다. 산림별 분포비율은 소나무가 66.73%로 가장 높고, 혼효림이 18.43%로 그 다음으로 높게 나타났다.

산림구조 측정을 위한 연소강도 및 산림의 생태적 기능과 관련된 경관지수는 연구목적과 문헌연구에 기초하여 선정하였다. 기존 연구들에 의하면 경관지수들은 내적상관성(intercorrelation)이 높은 것으로 알려져 있어 지수의 선정에 주의가 필요하다(Lee et al., 2008; Lloret et al., 2002; McGarigal and Marks, 1995; Ryu et al., 2007). 본 연구에서 산림구조를 측정하기 위해 선정된 경관지수는 최대조각지수(LPI, Largest Patch Index), 조각밀도(PD, Patch Density), 평균형태지수(MSI, Mean Shape Index), 면적가중형태지수(AWMSI, Area-Weighted Mean Shape Index), 샤논 다양성지수 (SHDI, Shannon's Diversity Index), 최단이웃거리(ENNMN, Euclidian Nearest Neighborhood Distance), 집합성지수 (AI, Aggregation Index), 그리고 단순 산림유형별 면적비율이다. 최대조각지수(LPI)는 격자당 가장 큰 조각의 면적비율을 측정하여 전반적인 분절도를 측정하고, 조각밀도(PD)는 LPI와 반대개념으로 이해될 수 있다. 즉, 단위 면적당 얼마나 많은 조각이 있는지를 측정하는 지수이다. 평균형태지수(MSI)는 격자 별 산림조각들의 평균적인 형태복잡도를 측정하는 도구이며, 면적가중형태지수(AWMSI)는 평균형태지수에 큰 조각면적에 대한 가중치를 부여한 지수이다. 샤논의 다양성지수(SHDI)는 산림의 다양성을 측정할 때 흔히 사용되는 지수이다. 최단이웃거리(ENNMN)는 격자 내에서 산림조각간 최단거리의 평균으로 조각들의 분산정도를 나타내며, 역으로 집합성지수(AI)는 격자 내에서 산림조각들의 집합정도를 측정한다(McGarigal and Marks, 1995).

표 2는 선정된 경관지수들의 계산식과 단위를 보여주고 있으며, 경관지수의 계산은 경관차원(Landscape level)과 분류차원(Class level)에서 계산하였다. 경관차원은 모든 산림유형을 포함하여 경관지수를 계산하는 방법이며, 분류차원은 단일

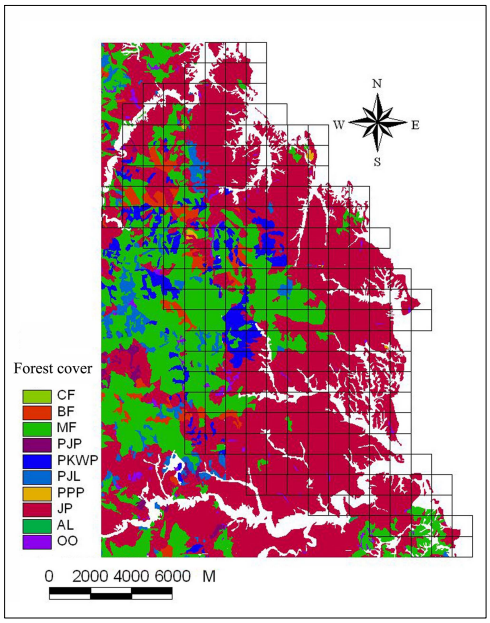

Figure 3. Forest covers in the study areas.

산림유형에서 경관지수를 계산하는 방법이다. 따라서 샤논의 다양성 지수는 분류차원에서 계산될 수 없다. 본 연구에서 선정된 경관지수들은 기존의 국내외 많은 연구에서 산림구조를 계량적으로 평가하는 도구로 사용되어 왔으며 종다양성, 토양침식, 에너지 흐름, 메타개체군과 같은 산림의 생태적 기능과 밀접한 관계를 보이는 지수이다 (이병두 등, 2008; Lee et al., 2008; Lloret et al., 2002; McGarigal and Marks, 1995; Ryu et al., 2007). 이외에도, 본 연구에서 선정된 경관지수들은 연료의 공간적 구조와 밀접한 관계를 갖는 것으로 보인다(Kerby et al., 2007). 연소강도와 산림구조의 관계는 Pearson 상관분석을 통하여 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기초통계량

표 3은 각 격자 별 연소강도, 산림유형 면적, 지형 및 경관지수 등 본 연구에서 사용된 변수들의 기초 통계량을 요약하고 있다. 격자 별 산림유

Table 2. Landscape metrics for measuring spatial characteristics of forest structure.

Category	Metrics (Acronym)	Unit	Calculations*
Configuration	PD (patch density)	# per ha	N/A × (10,000) × (100)
	LPI (largest patch index)	%	$\max(a_{ij})$ / A × (100)
	MSI (mean shape index)	none	$\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} p_{ij}/\min\ p_{ij}\right]/N$
	AWMSI (area-weighted mean shape index)	ha	$\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\left(p_{ij}/\min\ p_{ij}\right)\left(a_{ij}/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\right)\right]}$
	ENNMN (Euclidean nearest neighborhood distance mean)	M	$\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} d_{ij}\right]/N$
	AI (Aggregation Index)	%	$\left[\frac{x_{ij}}{\max \rightarrow x_{ij}}\right]100$
Composition	SHDI (Shannon's diversity index)	none	$-\sum_{i=1}^{m}(q_i \times \ln q_i)$

* : A = grid size (1 km^2), N = total number of patches in a grid, a = area, p = perimeter, d = nearest neighborhood distance of the same forest cover types, x = number of like adjacencies between pixels of patch type i based on the single-count method, q = proportion of a grid occupied by forest cover type i, i = forest cover types, and j = patches.

Table 3. Descriptive statistics of measured variables.

Variables		Min.	Max.	Mean	Std. Dev.
Burn severity		2.1	5.4	3.8	0.5
Composition (forest cover area)	MF (m^2)	0.0	892,000	128,000	214,000
	JP (m^2)	0.0	1,040,000	464,000	334,000
Topography	Elevation (m)	25.6	840.2	257.0	206.6
	Slope (%)	6.4	31.5	21.4	4.94
Configuration	PD (L/P/M)*	1.0/1.0/1.0	15.3/10.2/7.1	6.5/2.6/2.1	3.3/1.7/1.4
	LPI (L/P/M)	22.4/0.09/0.3	100/100/100	68.2/49.8/31.7	20.7/32.4/27.6
	MSI (L/P/M)	1.0/1.0/1.0	2.3/3.2/3.0	1.4/1.4/1.5	0.2/0.3/0.3
	AWMSI (L/P/M)	1.0/1.0/1.0	3.6/4.1/3.0	1.7/1.6/1.6	0.4/0.4/0.4
	ENNMN(L/P/M)	0.0/60/60	690.0/1050/918	139.7/142.3/186.7	114.5/114.2/155.5
	AI	83/63/67	100/100/100	94.4/93.2/91.5	3.6/5.8/7.2
	SHDI	0.0	1.3	0.6	0.3

MF : Mixed forest, JP : Japanese red pine

* : L = landscape level (n = 232), P = pine tree forest (n = 230), and M = mixed forest (n = 115).
PD = Patch density, LPI = Largest patch index, MSI = Mean shape index, AWMSI = Area-weighted mean shape index, ENNMN = Euclidean nearest neighborhood distance mean, AI = aggregation index, SHDI = Shannon's diversity index.

형 면적의 경우, 사전검토에서 소나무림과 혼효림만 연소강도와 의미 있는 관계를 보여 기초통계량 분석에서 다른 산림유형은 제외하였다. 삼척 산불피해지의 평균 연소강도는 3.8로 높음(high)에 가깝게 나타났다. 평균적인 격자 별 혼효림 면적은 128,000 m^2이고, 소나무림 면적은 464,000m^2로 전반적으로 격자 별 소나무림이 월등이 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 평균 고도는 257m이고 경사도는 21.4%로 비교적 급경사지역이 많이 포함되어 있다. 경관차원에서 평균적인 조각밀도, 최대조각지수, 평균 형태지수, 면적가중형태지수, 샤논 다양성지수, 최단이웃거리, 그리고 집합성지수는 각각 6.5, 68.2, 1.4, 1.7, 0.6, 139.7, 94.4로 나타났다. 특히 경관차원에서 샤논의 다양성 지수와 최대조각지수의 평균을 보면 삼척산불피해지는 산림동질성(homogeneity)이 상당히 높음을 알 수 있다. 분류차원에서 소나무림과 혼효림의 평균 최대조각지수는 각각 49.8과 31.7로 나타나 소나무림이 혼효림에 비해 큰 조각들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 하지만 산림 조각의 복잡도는 혼효림이 소나무림보다 비교적 높게 나타났다.

2. 산림유형, 지형과 연소강도

아래 표 4는 고도, 경사, 혼효림 및 소나무림의 면적과 연소강도의 상관분석 결과이다. 결과에서 연소강도는 고도와 경사도에서 모두 부의 관계를 보이는데, 이는 고도가 높고 경사도가 급할수록 연소강도가 낮아지는 것으로 해석할 수 있다. 기존의 많은 연구에서도 고도 및 경사도는 연소강도와 밀접한 관계를 갖는 것으로 보고되고 있다. 고도와 경사도는 연료의 습도, 강수, 연료밀도 및 산림유형 등에 영향을 주어 결국 연소강도에까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 고도 및 경사는 연소강도와 직접적인 관계 보다는 산림유형 및 연료 패턴 등과 같은 다른 여러 변수들과 혼합관계를 갖는 것으로 파악된다(González et al., 2005; Hall and Burke, 2006; Van Wagner,

Table 4. Pearson correlations between forest cover and topography and burn severity.

	Burn Severity	Elevation	Slope	Mixed Forests
Elevation	-0.36**			
Slope	-0.14*	0.67**		
Mixed Forests	-0.25**	0.61**	0.45**	
Japanese Red Pine	0.58**	-0.29**	-0.08	-0.39**

n = 232.
*p<0.05, **p<0.01
MF : Mixed forest, JP : Japanese red pine.

1977). 또한 지형에 의해 형성된 굴뚝효과 등도 고도와 경사도를 포함한 지형과 연소강도의 관계에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Foster, 1983). 지형에 의한 굴뚝효과는 삼면이 경사가 급한 지형에서 발생하는 것으로 불안정한 공기기둥이 형성되어 지형의 낮은 곳에서 공기가 상승하여 산불의 연소강도와 화염의 크기를 급격히 높이는 것을 지칭한다(Dickinson and Johnson, 2001; Pyne et al., 1996). 혼효림의 크기는 연소강도와 부의 관계를 보이며, 소나무림의 크기는 연소강도와 양의 관계를 보여주고 있다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이 산불의 발생 및 확산에 있어 산림유형에 대한 선택성을 잘 보여준 결과이다. 즉, 다양한 산림유형이 발달한 곳은 산불의 발생이 낮고 확산 또한 느린 반면 단순림, 특히 소나무림으로 이루어진 산림의 경우 산불발생 및 확산이 빠른 것으로 보고되고 있다(Duguy, 1998; Farina, 1998; Li and Wu, 2004; Ryu et al., 2007; Stephens, 2001).

흥미로운 것은 고도가 높을수록 소나무림은 감소하고 혼효림의 면적은 증가하는 것으로 나타났다는 점이다. 즉, 저지대일수록 소나무림의 면적이 증가하여 연소강도가 높아지는 효과를 보이는 것으로 해석될 수 있다. 따라서 연소강도에 대한 지형과 연료유형간의 교차효과가 있을 것으로 판단되나 단순 상관분석만으로는 지형과 다른 변수들간의 교차효과를 검증하기는 매우 어렵다. 또한, 연소강도의 분포에 공간적 자기상관성(spatial auto-correlation) 등도 내재되고 있는 것으로 보고되고 있어(Collins et al., 2007; Haining, 2003; Lloret et al., 2002; Wimberly and Reilly, 2007) 좀 더 정교한 분석모형이 필요하다. 연소강도에 대한 지형과 다른 변수들과의 교차 영향 그리고 공간적 자기상관성 문제를 해결하기 위한 분석모형으로는 회귀나무분석(regression tree analysis)이 유용한 것으로 알려져 있다(Calbk et al., 2002; Collins et al., 2007). 회귀나무분석은 공간적자기상관성의 존재 유무와 상관없이 분석가능하며, 종속변수에 대하여 변수들간의 상대적 중요도를 보여 주어 생태 및 산불연구에서 유용한 분석모형으로 알려져 있다(Breiman et al., 1984; De'ath, 2002; De'ath and Fabricius, 2000). 하지만 회귀나무분석을 위해서는 베리오그램분석(variogram)을 통한 공간적자기상관성 검증이 선행되어야 하므로 본 연구에서는 포함하지 않았다.

3. 연소강도와 경관구조와의 상관관계

아래 표 5는 연소강도와 경관지수들간의 상관분석 결과를 보여주고 있는데, 몇몇 격자에서는 소나무림 혹은 혼효림이 출현하지 않아 상관분석에 사용된 표본수가 차이를 보이고 있다. 상관분석 결과에 의하면, 연소강도는 경관차원에서 산림의 조각밀도(PD, r = -0.14), 최단이웃거리(ENNMN, r = -0.18), 그리고 샤논다양성지수(r = -0.23)와 부의 관계를 보여주고 있다. 이는 산림의 연료들이 집중되어 있기 보다는 분산되어 있

Table 5. Pearson correlation of burn severity with landscape metrics at the landscape and class levels.

	Spatial pattern metrics	Correlation coefficient
Landscape level[1]	PD	-0.14*
	LPI	0.14*
	MSI	0.04
	AWMSI	-0.01
	ENNMN	-0.18*
	AI	-0.04
	SHDI	-0.23**
Class level (Pine tree cover)[2]	PD	-0.03
	LPI	0.46**
	MSI	-0.07
	AWMSI	-0.01
	AI	0.29**
	ENNMN	-0.26**
Class level (Mixed forest cover)[3]	PD	-0.03
	LPI	-0.44**
	MSI	-0.05
	AWMSI	-0.11*
	AI	-0.13*
	ENNMN	-0.10

PD = Patch density, LPI = Largest patch index, MSI = Mean shape index, AWMSI = Area-weighted mean shape index, ENNMN = Euclidean nearest neighborhood distance mean, AI = aggregation index, SHDI = Shannon's diversity index.
[1] : n = 232, [2] : n = 230, [3] : n = 115.
*p<0.05, **p<0.01.

을 때, 그리고 다양한 수종으로 숲이 이루어져 있을 때 연소강도가 낮아 질 수 있음을 의미한다. 이와 반대로 최대조각지수(LPI, r = 0.14)는 연소강도와 양의 관계를 보여 주는데, 이는 산림이 큰 조각으로 이루어져 있을 때 연소강도가 높아질 수 있음을 시사한다. 전반적으로 평균형태지수와 면적가중형태지수등과 같은 형태복잡도 측정지수들은 연소강도와 경관차원에서 의미 있는 관계를 보여주지 못하고 있다. 따라서 경관차원에서 산림의 다양성과 공간적 이격도가 높을 때, 그리고 작은 조각크기로 구성 되어 있을 때 산불에 대한 저항력이 높아지는 것으로 판단된다. 특히, 산불에 민감한 소나무림은 큰 조각으로(LPI, r = 0.46) 이루어져 있을 때 연소강도가 매우 크게 상승하는 것으로 해석된다. 경관차원에서와 같이 소나무림의 형태복잡도는 연소강도와 의미 있는 관계를 보여주지 못하지만, 소나무림 조각들의 거리는(ENNMN, r = -0.23)부의 관계를 보여주고 있다. 따라서 산림이 소나무로만 구성된 단순림일 경우 산림의 이질성을 높여주는 접근방법이 산불에 대한 산림의 저항성을 높여줄 수 있을 것이다. 이와는 반대로 분류차원에서 혼효림의 최대조각지수(LPI, r = -0.44), 면적가중형태지수(AWMSI, r = -0.11), 그리고 집합성지수(AI, r = -0.13)은 연소강도와 부의 관계를 보여주고 있다.

4. 산불저항력 증진전략

산불에 저항력 있는 산림의 조성 및 관리는 경관구조(landscape structure)측면에서 산림의 유형(Forest composition)과 공간구조(Forest configuration)으로 나누어 볼 수 있다. 산림의 유형측면에서 본 연구결과는 기존의 많은 연구결과와 일치하고 있다. 즉, 산불의 발생, 연소강도 및 확산 등을 포함한 대부분의 산불특성은 산림의 유형에 매우 선택적이며, 특히 소나무림 조각의 크기와 공간적 분포에 매우 민감한 것으로 나타났다(이병두 등, 2008; Bigler et al., 2005; Collins et al., 2007; Lloret et al., 2002; Nunes et al., 2005; Ryu et al., 2007; Wimberly and Reilly, 2007). 이에 반해, 혼효림은 연소강도에 비교적 덜 민감한 것으로 나타났다. 즉, 산불발생시 혼효림의 연소강도는 소나무림의 연소강도보다 낮을 것으로 예상할 수 있다. 본 연구결과에서 산림종조성의 다양성 또한 산불의 연소강도를 낮추는 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 산불에 대한 저항력을 높이기 위해 단일수종 혹은 소수 수종으로만 이루어진 숲은 산림 종조성의 다양성을 높일 필요가 있다고 판단된다.

산림의 공간적 분포(Forest configuration) 또한 연소강도와 밀접한 관계를 보여주고 있다. 특히

경관차원(Landscape level)에서 산림의 조각밀도, 크기 그리고 공간적 이웃거리가 산불에 대한 산림의 저항력을 높이는데 중요한 인자로 나타났다. 소나무림과 혼효림은 분류차원(Class level)에서 경관차원에서와는 다른 산림의 공간적 구조를 보여 주는데, 이는 산림의 유형에 따라 다른 관리전략이 필요함을 의미한다. 산불에 민감한 소나무림의 경우 조각의 크기를 작게 하여 공간상에 적정간격으로 분산시키는 전략이 필요하고, 혼효림의 경우 조각의 크기는 크며, 되도록 군집으로 모여있는 형태가 유리하다. 하지만 다른 연구에 의하면 연소강도에 대한 영향측면에서 산림의 종조성, 특히 소나무림에 의한 영향이 산림의 공간적 분포보다 더 중요한 변수로 보고되고 있다(Collins et al., 2007). 또한, 산림의 구성과 구조관리를 통한 산불에 대한 저항력 증진 방안은 온화한 기후조건에서만 효과적이고, 극한 기후조건에서는 제한적일 수 있다(Bajocco and Ricotta, 2008; Nunes et al., 2005).

IV. 결 론

본 연구는 2000년 발생한 삼척 산불피해지를 대상으로 경관구조 측면에서 산림의 구조와 연소강도의 관계를 분석하고, 이를 기초로 산림의 산불저항력 증진방안을 도출하였다. 산림의 구조는 산림의 구성과 공간구조 측면에서 경관지수를 이용하여 측정하였으며, 연소강도는 인공위성 영상에 기초해 dNBR 지수를 사용하여 측정한 후 경관지수와의 상관관계를 분석하였다.

연구결과 산림의 구성(composition)과 구조(configuration)모두 연소강도와 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다. 경관차원에서 산불강도는 산림의 다양성과 부의 관계를 보여, 산림의 구성적 다양성이 높을 때 산불강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 경관차원에서 산불강도는 산림조각의 크기와 정의 관계를 그리고 분절지수와는 부의 관계를 보여주고 있다. 즉, 산림조각이 클수록 산불강도는 높아지며 작은 조각들로 이루어져 있을 때 강도가 낮아지는 것으로 해석할 수 있다. 소나무림의 공간구조 특성과 산불강도의 상관관계를 분석한 결과 소나무 조각이 커지면 산불강도는 높아지는 것으로 나타났다. 유사하게 소나무림 조각들이 근접하여 군집형태로 모여 있는 경우도 산불강도는 높아지는 것으로 해석된다. 하지만 혼효림의 경우 조각의 크기는 산불강도와 부의 관계를 보여 혼효림이 산불에 저항력이 있음을 보여주고 있다. 또한 혼효림이 군집형태로 모여 있는 경우 산불강도는 낮아지는 것으로 나타났다.

이러한 결과에 비추어 볼 때 전국적으로 소나무림이 우점하고 있는 우리나라의 경우 이에 대한 특별한 관심과 관리가 필요하다. 이러한 측면에서 산림청에서 주도하고 있는 방화림 조성사업의 경우 대부분 가장자리에서 소극적으로 이루어지고 있으나 큰 소나무 숲의 경우 방화림 조성을 통하여 분절화 하는 방안도 검토되어야 할 것으로 판단된다. 미국에서 수행된 연구에 의하면 연소강도의 영향력은 대체적으로 1km 정도까지 미치는데 이것을 감안하면(Collins et al., 2007), 대규모 소나무림은 적어도 1km 이상의 방화림에 의해 분절되어야 산불에 대한 저항력이 높아질 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이러한 산림구조 변형을 통한 산불저항력 증진 방안은 비교적 온화한 기후조건에서 효과가 있을 것으로 판단되며, 극단의 기후조건에서는 그 효과가 크게 떨어질 수 있다.

왜 산림의 구조가 연소강도와 밀접한 관계를 보이는지 여러 해석이 가능하나 가장 설득력있는 이유는 산림구조가 연료의 공간적 배열에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 연료는 일반적으로 산불에 영향을 주는 살아있거나 죽은 산림생물량의 물리적 특성으로 정의되는데(Andrews and Queen, 2001; Burgan et al., 1998), 산림구조는 살아있거나 죽은 생물량의 공간적 구조에 직접적으로 영향을 주기 때문이다, 따라서 산림구조의 변경은

연료의 공간적 배열을 변경하는 효과를 가지게 되는 것으로 판단된다.

본 연구 결과가 산림의 구조와 연소강도의 관계규명을 통하여 산불에 저항력 있는 산림의 조성 및 관리에 기초적인 가이드라인을 제공해주지만 구체적인 산림의 조성 및 관리기법을 제시하기엔 부족하다. 변경된 산림구조가 연소강도에 어떠한 영향을 주는지, 지형과 산림의 교차효과는 얼마나 큰지 등 아직 밝혀지지 않은 많은 질문들에 대답하기 위해서는 좀더 구체적이고 정교한 시뮬레이션 모형을 통한 연구가 필요하다. 특히 본 연구는 산림의 공간적 특성과 연소강도를 1km 격자 규모에서 측정되어 더 큰 규모 혹은 작은 규모에서의 산림구조와 연소강도와의 관계를 파악하기에는 어려움이 있다. 따라서 좀 더 다양한 규모에서의 연구를 통하여 어떠한 규모에서 가장 산림구조와 연소강도가 관계를 갖는지 파악할 필요성이 있다.

인 용 문 헌

원명수·구교상·이명보·손영모. 2008. Landsat TM영상자료를 활용한 삼척 대형산불 피해지의 비이산화탄소 온실가스 배출량 추정. 한국농림기상학회지 10(1) : 17-24.

이병두·송정은·이명보·정주상. 2008. 한국의 생태지역별 산불특성과 임산분포패턴과의 관계. 한국임학회지 97(1) : 1-9.

이시영. 1994. 산불발생 위험도 및 연소확대 요인분석에 관한 연구. 동국대학교 박사학위논문.

Andrews, P. L., and L. P. Queen. 2001. Fire modeling and information system technology. International Journal of Wildland Fire, 10 : 343-352.

Arno, S. F., and S. Allison-Bunnell. 2002. Flames in Our Forest : Disaster or Renewal. Washington, DC : Island Press.

Bajocco, S., and C. Ricotta. 2008. Evidence of selective burning in Sardinia(Italy) : which land-cover classes do wildfires prefer? Landscape Ecology, 23 : 241-248.

Bigler, C., D. Kulakowski and T. T. Veblen. 2005. Multiple disturbance interactions and drought influence fire severity in Rocky Mountain subalpine forests. Ecology, 86 : 3018-3029.

Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. G. Stone. 1984. Classification and Regression Trees. Belmont, C. A. : Wadsworth International Group.

Brown, J. K. 2000. Ecological principles, shifting fire regimes and management considerations (In Brown, J. K., and J. K. Smith eds., “Wildland Fire in Ecosystems-Effects of Fire on Flora”). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-42-volume 2. pp.185-203.

Burgan, R., R. Klaver and J. Klaver. 1998. Fuel model and fire potential from satellite and surface observations. International Journal of Wildland Fire, 8 : 159-170.

Calbk, M. E., D. White, A. R. Kiester. 2002. Assessment of spatial autocorrelation in empirical models of ecology(In Scott, J. M. P. J. Heglund, M. L. Morrison, J. B., Haufler, M. G. Raphael, W. A. Wall and F. B. Samson eds., “Predicting Species Occurrences : Issues of Scale and Accuracy”). Washington, D.C. : Island Press. pp.429-440.

Cocke, A. E.. P. A. Fule and J. E. Crouse. 2005. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data. International Journal of Wildland Fire, 14 : 189-198.

Collins, B. M., M. Kelly, J. W. Van Wagtendonk and Stephens, S.L. 2007. Spatial patterns of

large natural fires in Sierra Nevada wilderness areas. Landscape Ecology, 22 : 545-557.

Conard, S. G.. A. I. Sukhinin, B. J. Stocks, D. R. Cahoon, E. P. Davidenko and G. A. Ivanova. 2002. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. Climatic Change, 55 : 197-211.

De'ath, D. 2002, Multivariate regression trees : A new technique for modeling species-environment relationships. Ecology, 83(4) : 1105-1117.

De'ath, D., and K. E. Fabricius. 2000. Classification and regression trees : a powerful yet simple technique for ecological data analysis. Ecology, 81(11) : 3178-3192.

Delcourt, H. R., and P. A. Delcourt. 1997. Pre-Columbian Native American use of fire on southern Appalachian landscapes. Conservation Biology, 11 : 1010-1014.

Dickinson, M. B., and E. A. Johnson. 2001. Fire effects on trees(In Johnson, E.A and K. Miyanishi eds., "Forest Fire : Behavior and Ecological Effects"). San Diego : Academic Press. pp.503.

Duguy, B. 1998. Reconstrucción de los cambios en los usos del suelo y en la estructura del paisaje (1956-1994). Interacción con los incendios. Caso de una zona piloto en la provincia de Alicante. Ph.D. Thesis. Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos.

Farina, A. 1998. Principles and Methods in Landscape Ecology. London, UK : Chapman & Hall.

Foster, D. R. 1983. The history and pattern of fire in the boreal forest of southeastern Labrador. Canadian J. Bota, 61 : 2459-2471.

González, J. R., M. P. Palahí and T. Pukkala. 2005. Integrating fire risk consideration in forest management planning in Spain-a landscape level perspective. Landscape Ecology, 20 : 957-970.

Graham, R. T., T. S. McCaffrey and T. B. Jain. 2004. Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-120.

Gustafson, E. J., P. A. Zollner, B. R. Sturtevant, H. S. He and D. J. Mladenoff. 2004. Influence of forest management alternatives and land type on susceptibility to fire in northern Wisconsin, USA. Landscape Ecology, 19 : 327-342.

Haining, R. 2003. Spatial Data Analysis : Theory and Practice. Cambridge : Cambridge University Press.

Hall, S. A., and I. C. Burke. 2006. Considerations for characterizing fuels as inputs for fire behavior models. Forest Ecology and Management, 227 : 102-114.

Kerby, J. D., S. D. Fuhlendorf and D. M. Engle. 2007. Landscape heterogeneity and fire behavior : scale-dependent feedback between fire and grazing processes. Landscape Ecology, 22 : 507-516.

Key, C. H., and N. C. Benson. 2002. Fire effects monitoring and inventory protocol-landscape assessment. USDA Forest Service Fire Science Laboratory, Missoula, MT.

Key, C. H., and N. C. Benson. 2006. Landscape assessment : sampling and analysis methods. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report RMRS-GTR-164-CD(Ogden, UT).

Kushla, J. D., and W. J. Ripple. 1998. Assessing

wildfire effects with Landsat thematic mapper data. Int. J. Remote Sens, 19 : 2493-2507.

Lee, S. -W., C. D. Ellis, B. -S. Kweon and S. -K. Hong. 2008b. Relationship between landscape structure and neighborhood satisfaction in urbanized areas. Landsc. Urban Plan, 85 : 60-70.

Lentile, L. B., Z. A. Holden, A. M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Tudak, P. Morgan, S. A. Lewis, P. E. Gessler and N. C. Benson. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects, International Journal of Wildland Fire, 15 : 1-27.

Li, H. B., and J. G. Wu. 2004. Use and misuse of landscape indices. Landsc. Ecol. 19 : 389-399.

Lloret, F., E. Calvo, X. Pons and E. Díaz-Delgado. 2002. Wildfires and landscape patterns in the eastern Iberian Peninsula. Landsc. Ecol. 17 : 745-759.

McGarigal, K., and B. J. Marks. 1995. FRAGSTATS : spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, PNW-GTR-351.

Miller, J. D., and Yool, S. R. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. Remote Sensing of Environment. 82 : 481-496.

Morgan, P., C. C. Hardy, T. Swetnam, M. G. Rollins and L. G. George. 2001. Mapping fire regimes across time and space : Understanding coarse and fine-scale fire patterns. International Journal of Wildland Fire, 10 : 329-342.

Nunes, M. C. S., M. J. Vasconcelos, J. M. C. Pereira, N. Dasgupta, R. J. Alldredge and F. C. Rego. 2005. Land cover type and fire in Portugal : do fires burn land cover selectively? Landsc. Ecol. 20 : 661-673.

Pyne, S. J., Andrews, P. L., and R. C. Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. New York : John Wiley & Sons.

RSAC. 2005. Remote sensing application center burned area emergency response (BAER) imagery support, Salt Lake City, Utah : US Department of Agriculture Forest Service, Remote sensing Application Center, http : // www.fs.fed.us/eng/rsac/baer/

Rothermel, R. C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. General technical report INT-115. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Ogden, UT. p.40.

Ryu, S. -R., J. Chen, D. Zheng and J. L. Lacroix. 2007. Relating surface fire spread to landscape structure : an application of FARSITE in a managed forest landscape. Landsc. Urban Plan. 83 : 275-283.

Stephens, S. L. 2001. Fire history of adjacent Jeffrey pine and upper montane forests in the eastern Sierra Nevada. Int. J. Wildland Fire. 10 : 161-176.

Turner, M. G., R. H. Gardner and R. V. O'Neill. 2001. Introduction to landscape ecology(In Turner, M. G., Gardner, R. H., O'Neill, R. V. eds., "Landscape Ecology in Theory and Practice, Springer-Verlag"). NY. pp.1-23.

Turner, M. G., and W. H. Romme. 1994. Landscape dynamics in crown fire ecosystems. Landsc. Ecol. 9 : 57-77.

Van Wagner, C. E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Can. J. For. Res. 7 : 23-24.

Van Wagtendonk, J. W., R. R. Root and C. H. Key. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+detection capabilities for burn severity. Remote Sens. Environ, 92(3) : 92-115.

White, J. D., K. C. Ryan, C. C. Key and S. W. Running. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. International Journal of Wildland Fire, 6 : 125-136.

Wimberly, M. C., and M. J. Reilly. 2007. Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery. Remote Sens. Environ, 108 : 189-197.

Zhang, Y. -H., M. J. Wooster, O. Tutabalina and G. L. W. Perry. 2003. Monthly burned area and forest fire carbon emission estimates for the Russian Federation from SPOT VGT. Remote Sensing of Environment, 87 : 1-15.