

지형과 산불피해도와의 관계 분석

이병두¹ · 원명수¹ · 장광민^{2*} · 이명보¹

Analysis of the Relationship between Landform and Forest Fire Severity

Byung-Doo LEE¹ · Myoung-Soo WON¹ · Kwang-Min JANG^{2*} · Myung-Bo LEE¹

요 약

지형은 연료의 구성과 기상 및 산불로부터 발생하는 에너지의 흐름에 영향을 미쳐 산불행동에 관여하는 인자이다. 따라서 지형에 따른 산불피해도를 정략적으로 해석할 수 있다면, 산불위험도 작성 및 진화대원 안전 확보에 있어 기초 자료로 응용될 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 삼척(2000년 발생), 청양(2002년 발생), 양양(2005년 발생) 산불을 대상으로 산불피해도를 분석하고 지형을 구분한 다음 통계분석을 실시하여 두 인자간의 상관관계를 알아보았다. 산불피해도는 산불 전후 Landsat TM 영상에서 추출한 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio)의 차이를 이용하였다. 지형은 지형위치지수(Topographic Position Index)를 이용해 Weiss(2001)가 제시한 10개로 구분하였다. 분석결과 산지수로, 능선, 산복사면 등의 지형에서 산불피해도가 높게 나타났으며, 곡저구릉, 평탄곡지, 평지 등의 지형은 산불피해도가 낮게 나타났다. 이를 임상별로 세분해 보면 산불피해도는 침엽수림에서 활엽수림에 비해 지형에 더 민감하게 반응한 것으로 나타났다.

주요어 : 지형, 피해도, 정규탄화지수, Landsat 위성영상, 통계 분석

ABSTRACT

Topography factors, as homeostasis variables at forest fire, affect the formation of fuel load patterns, atmospheric phenomena and forest fire behavior. Examination of the correlation between landforms and fire severity is important to decision making for fire hazard analysis and fighting strategies. In this study, fire severity was analyzed using Normalized Burn Ratio(NBR) derived from pre- and post-fire Landsat TM/+ETM images and landform were classified based on Topographic Position Index(TPI) in Samcheok(2000), Cheongyang(2002), and Yangyang(2005) forest fire regions. F-tests and Duncan's multi-range test between landform and fire severity showed that fire severities of headwater, high ridges, and upper slopes is higher than ones of local ridges, midslope ridges, and plains. Fire severity were more sensitive in coniferous forest than broadleaf forests.

KEYWORDS : Landform, Fire Severity, Normalized Burn Ratio, Landsat TM/ETM+, Statistical analysis

2007년 12월 31일 접수 Received on December 31, 2007 / 2008년 3월 28일 심사완료 Accepted on March 28, 2008

1 국립산림과학원 산불연구과 Division of Forest Fire, Korea Forest Research Institute

2 서울대학교 산림과학부 Department of Forest Sciences, Seoul National University

* 연락처자 E-mail : lovvis7@hanmail.net

서론

산불에 영향을 미치는 인자, 즉 산불환경인자는 기상, 연료, 지형과 산불 특성 그 자체라고 알려져 있다. 이 중 기상인자와 연료인자는 시간의 흐름에 따라 민감하게 반응하지만, 지형인자는 앞의 두 인자에 비해 상대적으로 항상성을 갖는 변수로서 연료의 구성과 기상에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 산불행동에도 영향을 미친다고 알려져 있다(Pyne et al. 1996).

이러한 지형요소로는 고도, 경사, 사면향과 더불어 지형(landforms) 등이 거론된다. 이 중 경사는 바람과 함께 산불행동에 직접적인 영향을 미치는 요소로서(Santoni et al. 1999) 산불분야에서 많은 연구가 이루어졌다(Rothermel 1972, 이시영 1994, Richards 1999). 고도와 사면향 또한 연료의 구성과 건조도에 영향을 미쳐 산불행동에 기여한다는 사실이 밝혀져 왔다(Pyne et al. 1996). 그러나 지형과 산불과의 관계를 규명한 연구는 Viegas와 Pita(2004)가 계곡에서의 산불행동을 관찰한 사례와 이시영(1994)이 경관 수준에서 지형에 따라 산불을 6가지로 구분한 것 외에 미흡한 실정이다. 더욱이 지형에 따라 산불이 급격하게 변화하여 진화대원의 안전에 영향을 미칠 수 있으므로, 산불에 대한 지형의 영향을 규명한다면 산불위험도 분석 및 진화대원 안전을 확보한 진화전략 수립 등 진화 의사결정에 있어서 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

지형을 구분하는 방식은 크게 성인적 분류와 형태적 분류로 구분할 수 있는데, 전자가 지형의 형성원인에 근거하여 분류하는 방식이라면, 후자는 지표면이 이루고 있는 형태적 모양을 근거로 분류하는 방법이다. Dalrymple(1968)등은 지표의 물질이동을 설명하기 위해 지형의 형성 과정을 고려하여 9개 단위 지표면 모델(Nine-unit landsurface model)을 제시하였다. 형태적 분류기법의 대표적인 예로써, Speight(1990)은 Digital Elevation Model(DEM) 자료를 이용하여 산정부, 능선, 사면(상위, 중위, 하위), 단일사

면, 평지, 계곡부(배수지, 비배수지), 그리고 언덕으로 분류한 바 있다. 한편, Weiss(2001)의 지형위치지수(Topographic Position Index: TPI) 기법은 경사도와 고도뿐만 아니라 인접지역에 대한 기복량까지 함께 고려하여 다양한 지형을 쉽게 정량화 시킬 수 있다는 점에서 지형분류에 적합하다. 산불은 지표면을 따라서 확산하고, GIS 등을 통해 지표면의 현 상태에 대한 정량화된 정보를 산출할 수 있다는 측면(Gerrard, 1992)에서 본 연구에서는 형태적 분류 방법을 기반으로 지형을 구분하였다.

산불피해는 산불로 인한 산림의 물리적, 화학적, 생물학적 변화를 총칭하는 말로써(White et al. 1996, Rogan & Yool 2001) 산불로 인한 산림생태계의 변화를 의미한다. 하지만 위와 같이 산불피해를 산불로 인한 산림생태계의 변화로 넓게 정의하면 다양한 측정지표와 측정방법이 존재하게 된다. 따라서 산불피해를 산불로 인한 식생의 변화로 한정하는 것과 같이 재 정의하여 이용하므로(Chafer et al. 2004), 본 연구에서도 산불피해도(forest fire severity)를 산불로 인한 식생의 변화의 정도로 한정해 사용하였다.

한편, 원격탐사 기법은 산불이 오지에서 발생하고 넓은 면적에 영향을 미친다는 관점에서 피해면적, 피해도 분석 분야에서 일찍부터 이용되었다. 특히 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI), 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio: NBR)를 이용한 산불피해 면적 산정 및 산불피해도 분석이 대표적이다. 최근에 산불 직후에는 NDVI보다 NBR을 이용했을 때 분류 정확성이 우수하다는 연구결과(Key and Benson 1999; van Wagtenonk et al. 2004)에 따라 NBR을 이용하는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 최근 발생한 대형 산불 중 삼척(2000년 4월 7일 발생), 정양(2002년 4월 14일 발생), 양양(2005년 4월 4일 발생) 산불을 대상으로 NBR를 이용해 산불피해도를 산정한 다음, Weiss(2001)의 TPI 방법을 이용해 지형을 구분하고, 이 두 인자간의 관계를 통계 분석을 통해 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지

연구대상지는 그림 1에서와 같이 2000년 삼척산불, 2002년 청양산불, 2005년 양양산불을 대상으로 하였다. 삼척산불은 건국이후 산불통계를 수집한 이래 최대 연소면적을 기록하고 있으며, 청양산불은 영동지역 외에 발생한 산불 중 최대 피해면적의 산불이다. 마지막으로 양양산불은 우리나라 3대 관음기도도량 중 하나이며 1300년의 역사를 가지고 있는 낙산사를 소실시켜 산불로 인한 대규모 문화재 피해가 발생했던 산불이다.



FIGURE 1. Locations map of Samcheok, Cheongyang, and Yangyang forest fire

2. 산불피해도 분석

산불피해도는 산불전후에 촬영된 Landsat TM/+ETM 영상을 각각 기하 보정한 다음, 근적외선 대역과 중적외선 대역(Landsat TM과 ETM+ 센서의 4번과 7번 밴드에 해당)의 반사값을 이용하여 NBR를 산출(식 1)한 후, 산불 전의 NBR($NBR_{prefire}$)에서 산불 후의 NBR($NBR_{postfire}$)를 빼서 NBR의 변화량, 즉 ΔNBR 를 산출하여 이용하였다. ΔNBR 값이 클수록 해당지역의 산불피해도가 높음을 의미한다. 이러한 과정은 원명수 등(2007)의 한국지리정보학회지 제 10권 3호 'Landsat 영상으로부터 정규탄화지수 추출과 산불피해지역 및 피해강도의 정량적 분석' 논문과 같다. 각 산불지역에서 이용된 Landsat TM/+ETM의 영상정보는 표 1과 같다.

$$NBR = (R_4 - R_7) / (R_4 + R_7) \quad (1)$$

$$\Delta NBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \quad (2)$$

각 산불피해지의 피해 등급 분류는 ΔNBR 의 평균(μ)과 표준편차(δ)를 이용해(van Wagtenonk et al., 2004) unburned, low, moderate, high, very high, extreme의 총 6단계로 구분하였다.

3. 지형 구분

본 연구에서는 지형분류방법으로 TPI를 이용한 지형분류 기법을 적용하였으며(Weiss, 2001; Jenness, 2006), TPI 산출을 위해 Arcview script를 기반으로 만들어진 TPI 산출 프로그램 사용하였다(<http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>, 2007.12.24.).

TABLE 1. A table of contents of satellite imagery used analysis of fire severity(Won et al., 2007)

Categories	Samcheok	Cheongyang	Yangyang
Forest fire day	2000.4.7-4.15	2002.4.14-4.15	2005.4.4-4.6
Path/Low	114/34	116/35	115/34
Info. of used imagery	1999.5. 7(TM) 2000.5.25(TM)	2000.5.31(ETM ⁺) 2002.5.13(TM)	2004.7.30(TM) 2005.8.18(TM)

TPI는 지형의 상대적 위치를 정량적으로 나타낸 값으로 특정 셀의 고도 값과 인접한 셀들의 평균 고도 값의 차이를 이용해 산출되며, TPI값은 전체 경관단위에서 표고 차에 따른 지형의 상대적 위치를 의미한다. 즉, TPI 값이 양의 값을 나타내면 특정 셀이 주변보다 높음을, TPI 값이 음의 값을 나타내면 특정 셀이 주변보다 낮은 지형임을 의미한다.

일반적으로 지형을 분류할 때 축척인자(scale factor)의 선정결과에 따라 동일지역에서 전혀 다른 지형분류도가 작성된다. 이에 따라 대상지역의 지형특성을 반영하기 위해서는 올바른 축척인자의 선정이 중요하다(이준경과 김창환, 2001; Jenness, 2006). 본 연구에서는 대상지역의 지형분류에 적합한 축척인자를 결정하기 위하여, 장광민(2007)의 축척결정알고리즘을 이용하였다.

이를 위해 셀의 크기를 50m 단위로 계속 증가

시켜 대상지역의 평균 기복량을 산출하고 이를 바탕으로 지형성장곡선(Revised hypsometric curve)을 작성하였다(이금삼과 조화룡, 1998; 성춘자, 2003; 이민부 외, 2001). 지형성장곡선에서 기복량의 변화패턴이 달라지는 지점을 찾기 위해, 지형성장곡선에 식 3을 이용하여 기울기 변화도(δ) 곡선을 작성하고, 기울기 변화도 곡선의 극값들 중 가장 큰 기울기 변화도를 가지는 지점을 축척인자로 결정하였다(장광민, 2007).

$$\delta = \beta_{k,k-1} - \beta_{k+1,k} \quad (3)$$

대상지별 선정된 축척인자를 적용하여 대축척(Large-Neighborhood) TPI와 소축척(Small-Neighborhood) TPI를 산출하였으며, DEM 자료로부터 경사도를 산출하여 지형분류도를 작성하였다. 지형분류체계는 Weiss(2001)의 분류기준을 적용하여 심곡(Deeply incised streams:

TABLE 2. Landform Categories by Weiss(2001)

Landform Categories	slope	SN TPI	LN TPI
CANYONS	not defined	TPI <= -1 Stand. Units	TPI <= -1 Stand. Units
SHALLOW VALLEYS	not defined	TPI <= -1 Stand. Units	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units
UPLAND DRAINAGES	not defined	TPI <= -1 Stand. Units	TPI >= 1 Stand. Units
U-SHAPED VALLEYS	not defined	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units	TPI <= -1 Stand. Units
PLAINS	Slope <= 5	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units
OPEN SLOPES	Slope > 5	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units
UPPER SLOPES	not defined	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units	TPI >= 1 Stand. Units
HILLS IN VALLEYS	not defined	TPI >= 1 Stand. Units	TPI <= -1 Stand. Units
MIDSLOPE RIDGES	not defined	TPI >= 1 Stand. Units	TPI > -1 Stand. Units and TPI < 1 Stand. Units
HIGH RIDGES	not defined	TPI >= 1 Stand. Units	TPI >= 1 Stand. Units

DIS), 얇은 계곡(Sallow valleys: SV), 산지수로(Headwaters: HW), 평탄곡지(U-shaped valleys: UV), 평지(Plains: PL), 산록사면(Open slopes: OS), 산복사면(Upper slopes: US), 꼭저구릉(Local ridges: LR), 평탄구릉(Midslope ridges: MS) 그리고 능선(High ridges: HR)의 10가지 지형으로 분류하였다(표 2).

4. 지형과 산불피해도의 관계 분석

지형별로 산불피해 정도가 다른 지를 알아보기 위해 ΔNBR 를 종속변수로 지형을 독립변수로 설정하여 F-검정을 실시하였다. 이 때 전체 셀을 대상으로 통계분석을 수행하기에는 그 샘플 수가 너무 많게 되므로, 분석의 용이성을 위하여 산불지역 각각에 대해 100m 크기의 셀을 만든 다음, 교차 지점에 점을 생성하여 지형과 ΔNBR 값을 추출하여 분석 대상으로 하였다.

아울러 국립산림과학원에서 구축한 수치임상도를 이용하여 해당 지역의 산림을 침엽수림, 혼효림, 활엽수림으로 크게 3가지로 구분하고, 이 정보 또한 통계 분석에 이용하였다. 이러한 과정은 임상별로 지형에 따라 산불피해도가 어떻게 달라지는지 살펴보기 위함이었다. 지형별

로 ΔNBR 가 차이가 있는지, 즉 산불피해도가 다른지를 알아보기 위해 SAS 9.1버전 프로그램(SAS Institute, Inc., 2003)을 이용해 Duncan의 다중범위검증($\alpha=0.05$)을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 산불피해도

삼척 산불피해지 ΔNBR 분석 결과, 그림 2와 표 3에서와 같이 피해도 'High'에 해당하는 등급이 33.5%를 차지하여 가장 많은 분포를 보였으며, 약 32%가 'Very high~Extreme'에 분포하였다. ΔNBR 분석 결과 삼척지역의 산불에 의한 전체 피해면적은 16,200ha로 나타났다. 청양산불 피해지의 경우 피해도가 Very high~Extreme'인 등급에 약 73%가 분포해 대부분 지역이 전소된 것으로 추정할 수 있었다. 피해가 경미한 지역은 2.7%에 불과하였다. 전체 연소면적은 약 3,120ha로 나타났다. 양양산불은 피해면적이 1,751ha로 분석되었는데, 'High' 등급 지역이 전체의 37.2%, 'Very high~Extreme'인 지역이 28.4%, 피해가 경미하거나 피해를 입지 않은 지역이 34%의 피해분포를 보였다.

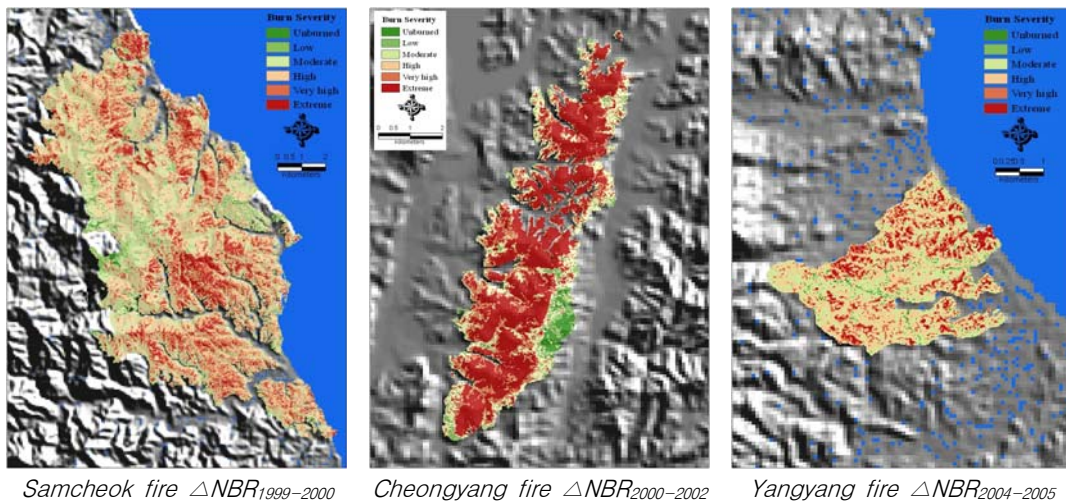


FIGURE 2. Fire severity of study sites derived from *difference Normalized Burn Ratio*(ΔNBR) (Won et al., 2007)

TABLE 3. Estimation of fire severity by difference Normalized Burn Ratio(Δ NBR) in study sites(Won et al., 2007)

Sites	Fire Severity	Pixel Number	Burned Area (ha)	Percentage (%)
Samcheok	Unburned	1,036	93	0.6
	Low	9,011	811	5.0
	Moderate	52,701	4,743	29.3
	High	60,236	5,421	33.5
	Very high	43,270	3,894	24.0
	Extreme	13,752	1,238	7.6
	Total	180,006	16,201	100.0
Cheongyang	Unburned	-	-	-
	Low	925	83	2.7
	Moderate	2,314	208	6.7
	High	6,101	549	17.6
	Very high	7,837	705	22.6
	Extreme	17,490	1,574	50.5
	Total	34,667	3,120	100.0
Yangyang	Unburned	78	7	0.4
	Low	828	75	4.3
	Moderate	5,774	520	29.7
	High	7,239	652	37.2
	Very high	3,720	335	19.1
	Extreme	1,813	163	9.3
	Total	19,452	1,751	100.0

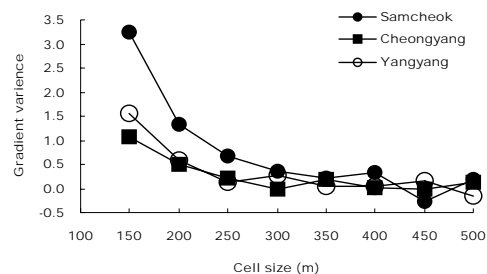
2. 대상지별 지형구분

지형성장곡선을 이용하여 그림 3에서와 같이 기울기변화도 곡선을 작성하였다. Cell size와 small neighborhood size는 수치지형도의 해상도를 고려하여 각각 10m와 50m로 결정하였다. Large neighborhood size는 기울기변화도 곡선의 극값들 중 절대값이 가장 큰 지점으로 결정하였으며, 삼척, 청양 그리고 양양이 각각 400m, 350m, 300m로 축적인자가 결정되었다(표 4).

지형구분결과 그림 4와 그림 5와 같이 계곡부 지형에서는 산지수로(HW)에서 가장 높은 고도와 경사도를 보였고, 얕은 계곡(SV), 심곡(DIS), 평탄곡지(UV)의 순으로 고도와 경사도

가 점차 낮아지는 경향을 보였다. 평지(PL)의 경우 고도 100m이하의 저지대에 위치하며 5°이하의 낮은 경사도를 보여주었다. 사면부 지형에서는 산복사면(US)이 산록사면(OS)에 비해 상대적으로 고도가 높게 나타났으며 경사도에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 능선부 지형에서는 능선(HR)이 고도가 가장 높았고, 곡저구릉(LR), 평탄구릉(MR)의 순으로 고도가 점차 낮아지는 특징을 보였다.

그러나 Weiss(2001)의 지형분류 체계에서 평탄곡지(UV)는 빙하에 의한 침식작용으로 생성된 계곡이고, 심곡(DIV)은 대고원 가운데에 발달한 큰 규모의 계곡을 의미하므로, 우리나라와 같이 국지적인 수준에서의 지형 분류에서는 거의 나타나지 않는다. 따라서 이 두 개의 지형은 추후 국내 실정에 맞는 지형용어 및 분류기준이 확립되면, 다른 지형으로 재분류될 필요성이 있다고 판단된다.

**FIGURE 3.** Gradient variance curve for each study site.**TABLE 4.** Scale factors for classifying land-form in study sites

Sites	Cell size (m)	Small Neighborhood size (m)	Large Neighborhood size (m)
Samcheok	10	50	400
Cheongyang	10	50	350
Yangyang	10	50	300

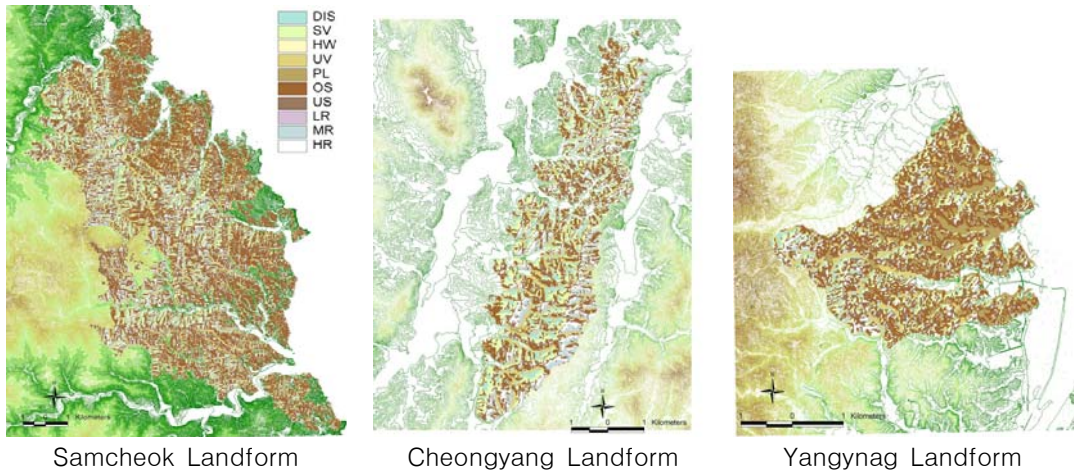


FIGURE 4. Landform of study sites based on Topographic Position Index (Weiss, 2001) DIS: Deeply incised streams; SV: Sallow valleys; HW: Headwaters; UV: U-shaped valleys; PL: Plains; OS: Open slopes; US: Upper slopes; LR: Local ridges; MR: Midslope ridges; HR: High ridges

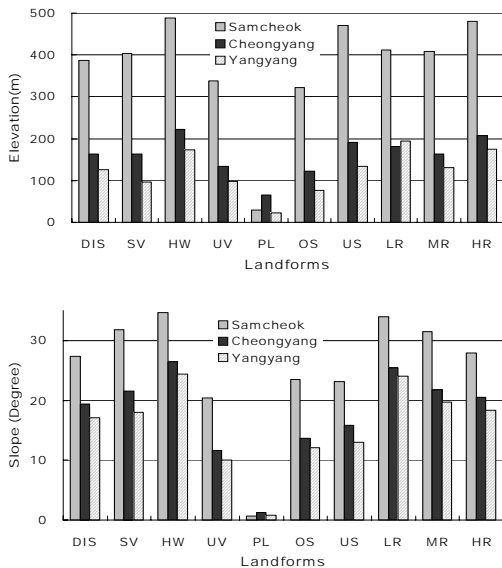


FIGURE 5. Elevation and slope of each landform in study sites. DIS: Deeply incised streams; SV: Sallow valleys; HW: Headwaters; UV: U-shaped valleys; PL: Plains; OS: Open slopes; US: Upper slopes; LR: Local ridges; MR: Midslope ridges; HR: High ridges

3. 지형과 산불피해도 관계

표 5에서와 같이 수종에 상관없이 전체 임상을 대상으로 했을 때 산불피해도는 지형별로 다르게 나타났다(d.f.=9, F-value=69.6, Pr>F=<0.0001). 즉 산지수로(HW), 능선(HR), 산복사면(US)의 지형에서 산불피해도가 가장 높게 나타났으며, 얇은계곡(SV), 산록사면(OS), 평탄구릉(MR), 심곡(DIS)는 중간이었다. 마지막으로 곡저구릉(LR), 평탄곡지(UV), 평지(PL) 등은 산불피해도가 가장 작았다.

산지수로(HW), 능선(HR), 산복사면(US) 등의 지형은 상대적으로 높은 고도와 경사도로 인하여 수관화로 발전되기 쉽기 때문에 산불피해도가 높게 나타난 것으로 판단되며, 상대적으로 고도와 경사도가 낮은 평탄곡지(UV), 평지(PL) 등의 지형은 대부분 지표화로 연소되어 산불피해도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 이 중 산지수로는 Pyne 등(1996)등이 지적한 굴뚝효과(Chimney effect)와 가장 유사한 지형으로써 열에너지가 모여 급격하게 상승하는 지형으로 수관화를 동반하게 되므로, 진화대원에겐 위험한 지형으로 분류된다. 또한 능선부 지형에 비해

계곡부 지형이 상대적으로 피해가 적었는데, 이러한 결과는 수분퍼텐셜(Water potential)이 높은 계곡부 지형이 산불발생시 피해가 적다는 Heinselman(1973)와 Foster(1983)의 연구결과와도 일치한다.

이를 임상별로 세분해 보면, 침엽수림(d.f.=9, F-value=50.96, Pr>F=<0.0001)과 혼효림(d.f.=9, F-value=5.04, Pr>F=<0.0001)에서는 지형별로 산불피해도가 차이 났으나, 활엽수림(d.f.=9, F-value=1.45, Pr>F=0.1631)에서는 피해도가 다르지 않았다(표 5). 즉 침엽수림에서는 전체 임상을 대상으로 했을 때와 마찬가지로 산지수로(HW), 능선(HR), 산복사면(US)의 피해가 심하고, 얇은계곡(SV), 산록사면(OS), 평탄구릉(MR) 지형이 다음이었으며, 마지막으로 심곡(DIS), 곡저구릉(LR), 평탄곡지(UV), 평지(PL)의 순으로 피해가 약했다.

혼효림에서는 산지수로(HW), 능선(HR)이 피해가 심한 그룹으로, 곡저구릉이 피해가 약한 것으로 분석되었으며, 나머지 지형에서는 통계적으로 유의한 차이가 나지 않았다. 활엽수림에서는 모든 지형에서 유의한 차이가 발견되지 않았다.

이러한 결과는 대상지 산불이 발생했던 4월에 활엽수림에서는 수관층의 연료가 상대적으로 적어, 대부분 지표화로 연소되어 산불피해가 약했던 것으로 판단된다. 즉 수관층의 가연물질

로 이용될 수 있는 잎의 양이 충분하여 수관화로 연소될 여지가 높은 침엽수림에서 활엽수림에 비해 지형에 더 민감하게 반응한 것이다. 이러한 연구결과는 삼척산불의 피해도와 임상, 지형과의 관계를 고찰한 이병두(2005)의 연구결과와도 일치한다.

결론

본 연구에서는 Weiss(2001)의 지형위치지수(TPI)를 이용하여 지형을 10개로 분류하고, 산불 전후에 촬영된 Landsat TM/ETM+영상의 정규탄화지수(NBR)를 이용해 산불피해도를 추정하고, 그 관계를 분석하였다. 그 결과 침엽수림에서는 지형에 따라 산불피해도가 달라, 산지수로(Upland drainage), 산복사면(Upper slope), 능선(High ridge) 부분에서 피해가 컸다. 활엽수림에서는 지형에 따른 산불피해도 간의 유의한 관계가 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 산불예방단계에서 산불피해가 심할 수 있는 대형 산불위험 지역 분석과정에 지형인자를 고려할 때 기초 자료로 활용될 수 있으리라 판단된다. 아울러, 산불진화 시 진화대원의 안전을 고려했을 때 이러한 지역을 사전에 파악하여 투입지역에서 우선 배제하여야 할 것이다. 또한, 내화수림대 조성 시 침엽수로 구성되어 있으면서 피해가 크

TABLE 5. Difference Normalized Burn Ratio(Δ NBR) between pre-fire and post-fire according to each landform with vegetation types

Landform Vegetation type	DIS	SV	HW	UV	PL	OS	US	LR	MR	HR
Whole stand	0.647 ^{cd}	0.772 ^b	0.959 ^a	0.564 ^e	0.387 ^f	0.723 ^{bc}	0.913 ^a	0.593 ^{de}	0.706 ^{bc}	0.918 ^a
Coniferous stand	0.689 ^c	0.839 ^b	1.060 ^a	0.644 ^c	0.642 ^c	0.807 ^b	1.052 ^a	0.688 ^c	0.807 ^b	1.010 ^a
Mixed stand	0.543 ^{ab}	0.562 ^{ab}	0.684 ^a	0.435 ^{ab}	0.426 ^{ab}	0.508 ^{ab}	0.566 ^{ab}	0.337 ^b	0.427 ^{ab}	0.666 ^a
Decidious stand	0.857 ^a	0.911 ^a	0.975 ^a	0.761 ^a	0.807 ^a	0.772 ^a	0.780 ^a	0.631 ^a	0.758 ^a	0.921 ^a

^{a-f} Means with the same letter are not significantly different at the 0.05 level according to Duncan's multi-range test

* Classifications according to Weiss(2001), DIS: Deeply incised streams; SV: Sallow valleys; HW: Headwaters; UV: U-shaped valleys; PL: Plains; OS: Open slopes; US: Upper slopes; LR: Local ridges; MR: Midslope ridges; HR: High ridges

다고 분석되는 지형을 우선 고려해야 할 필요도 제기된다. 하지만, 아직까지 우리나라에 맞는 지형의 형태적 구분에 대한 명확한 분류체계가 정립되지 않고 있다. 따라서 향후 우리나라의 지형 특성에 맞는 지형의 형태적 분류체계와 지형용어가 확립되어야 할 필요성이 제기된다. **KAGIS**

참고 문헌

- 성춘자. 2003. GIS를 이용한 지형요소 분석과 지형 분류에 관한 연구. 국토지리학회지 37(2):155-161.
- 원명수, 구교상, 이명보. 2007. Landsat 영상으로부터 정규단화지수 추출과 산불피해지역 및 피해 강도의 정량적 분석. 한국지리정보학회지 10(3): 80-92.
- 이금삼, 조화룡. 1998. GIS기법에 의한 한국의 고도·기복량 분석. 대한지리학회지 33(4):487-497.
- 이민부, 김남신, 한균형. 2001. GIS Database 구축을 위한 지형요소의 지도화. 대한지리학회지 36(2):81-92.
- 이병두. 2005. GIS와 RS를 이용한 2000년 삼척산불 행동 특성 분석 및 산불확산예측모델 개발. 서울대학교 박사학위논문.
- 이시영. 1994. 산불발생 위험도 및 연소확대 요인 분석에 관한 연구. 동국대학교 박사학위논문. 104pp.
- 이춘경, 김창환. 2001. GIS를 이용한 홍천군의 지형 분석. 한국지형학회지 8(1):55-65.
- 장광민. 2007. 지형위치지수 적용에 의한 지형분류의 Scale Factor 결정에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문. 10-20pp.
- Chafer, C. J., M. Noonan and E. Macnaught. 2004. The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. International Journal of Wildland Fire 13(2):227-240.
- Dalrymple, J. B., R. J. Blong and A. J. Conacher. 1968. A hypothetical nine-unit landscape model. Zeitschrift fur Geomorphologie 12:60-76.
- Foster, D. R., 1983. The history and pattern of fire in the boreal forest of southeastern Labrador. Canadian Journal of Botany 61:2459-2471.
- Gerrard. 1992. Soil Geomorphology. Mack and James, London.
- Heinselman, M. L. 1973. Fire in the virgin forests of the Boundary Waters Canoe Area, Minnesota. Quaternary Research 3:329-382.
- Jenness, J. 2006. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Key, C. H. and N. C. Benson. 1999. The Normalized Burn ratio(NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. USGS.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. JOHN WILEY & SONS, INC. 769pp.
- Richards, G. D. 1999. The mathematical modelling and computer simulation of wildland fire perimeter growth over a 3-dimensional surface. International Journal of Wildland Fire 9(3):213-221.
- Rogan, J. and S. R. Yool. 2001. Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains, Arizona and New Mexico. International Journal of Remote Sensing 16:3101-3121.
- Rothermel, R. C. 1972. A mathematical model for prediction fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Research Paper INT 115.
- Santoni, P. A., J. H. Balbi and J. L. Dupuy. 1999. Dynamic Modeling of Upslope Fire Growth.

- International Journal of Wildland Fire 9(4):285-292.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS 9.1 Help and Documentation. SAS Institute Inc., NC, USA.
- Speight, J.G. 1990. Landform In 'Australian Soil and Land Survey Field Handbook' 2nd Ed. Inkata Press, Melbourne.
- Van Wagtendonk, J.W., R.R. Root and C.H. Key. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. Remote Sensing of Environment 92(3):397-408.
- Viegas, D. X. and L. P. Pita. 2004. Fire spread in canyons. International Journal of Wildland Fire 13:253-274.
- Weiss, A. D. 2001, Topographic positions and landforms analysis (Conference Poster). ESRI International User Conference. San Diego, CA.
- 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 Remote Sensing 6:125-136. **KAGIS**