

2005년 양양산불 피해 소나무림의 연소량 추정¹

이병두² · 김형호^{3*} · 장광민² · 정주상² · 이명보⁴ · 이시영⁵

Estimation of Biomass of *Pinus densiflora* Stands Burnt Out by the 2005 Yangyang Forest Fire

Byung-Doo Lee², Hyung-Ho Kim^{3*}, Kwang-Min Chang², Joo-Sang Chung²,
Myung-Bo Lee⁴, Si-Young Lee⁵

요 약

2005년에 발생한 강원도 양양산불피해지의 소나무림을 대상으로 산불피해도를 「심」, 「중」, 「경」 3단계로 구분하여 산불연소량을 분석하였다. 산불 후 바이오매스는 지표층, 관목층, 수관층으로 나누어 조사하였으며, 산불이 발생하기 전의 바이오매스는 산불 인근 지역의 동일한 재적을 갖는 미피해지 임분과 동일하다고 가정하였다. 지표층과 관목층의 바이오매스는 직접 측정에 의해, 수관층의 바이오매스는 흉고직경과 수고를 이용한 건중량 추정식과 엽면적지수를 이용하여 추정하였다. 피해도가 「심」으로 분류된 plot에서는 약 17,451kg/ha이, 피해도 「중」 plot에서는 8,724kg/ha, 마지막으로 피해가 경미했던 plot에서는 3,693kg/ha이 산불로 인해 연소된 것으로 분석되었다.

주요어 : 산불피해등급, 연료량, 엽면적지수

ABSTRACT

The biomass of *Pinus densiflora* stands burnt out by the 2005 Yangyang forest fire was estimated based on the grades of fire severity; light, moderate and heavy. In order to measure the post-fire ground biomass in kg/ha, the ground fuels including shrub layer were collected and weighted and the crown biomass was estimated using allometric regressions and leaf area index for dry weight of *P. densiflora*. The pre-fire biomass was assumed to be equal to that of non-damaged *P. densiflora* stands having the same characteristics. The results indicated that the forest fire burnt out fuels of stands; 3,693 kg/ha in the light-damaged, 8,724 kg/ha in the moderately-damaged, and 17,451 kg/ha in the heavily-damaged forest stands.

KEY WORDS : FIRE SEVERITY, FUEL, LEAF AREA INDEX

1 접수 3월 31일 Received on Mar. 31, 2006

2 서울대학교 산림과학부 Dept. of Forest Resources, Seoul National Univ.

3 국립산림과학원 산림경영과 Korea Forest Research Institute (kimlake1@hanmail.net)

4 국립산림과학원 산불연구과 Korea Forest Research Institute

5 강원대학교 방재기술전문대학원 Kangwon National Univ.

* 교신저자, Corresponding author

서론

산불이 진화된 후 산림이 받은 피해에 관한 조사는 산불의 특성을 파악하고, 산불로 인한 생태적, 환경적 영향을 분석하는데 필요한 기본 자료가 된다. 그러나 복잡한 지형적 특성을 보이는 국내 산림의 특성상 산림이 받은 피해를 조사하고 측정하는 일이 쉽지 않다. 특히 산불관련 연구 경험이 많지 않았던 국내 여건상 최근 빈번하게 발생하는 대형 산불에 의해 발생하는 인적, 재산적 피해를 추정하기 위한 조사는 수행되고 있으나, 산림이 받은 피해나 연소량을 추정하기 위한 연구가 수행된 적은 거의 없다.

문헌고찰에 의하면 산불로 인한 연소량 즉, 산불 발생으로 방출된 바이오매스를 추정하기 위해 산불 후 벌채를 통한 샘플링 방법(Haugaasen *et al.*, 2003)과 인공위성 영상을 기반으로 정규식생지수(NDVI : Normalized Difference Vegetation Index)(Isave *et al.*, 2002) 혹은 정규산화율(NBR : Normalized Burn ratio)(Key and Benson, 2004; Wagtendonk *et al.*, 2004; Allison *et al.*, 2005; Holden *et al.*, 2005)을 산출하는 방법이 이용되고 있다. 하지만 벌채를 통한 연소량 추정은 조사 과정에 많은 시간과 비용이 요구된다는 단점이 제기되고 있으며, 위성 영상을 이용하는 방법 역시 분석결과의 검증을 위해 현장조사 자료를 요구한다. 따라서 산불 현장에서 손쉽게 적용할 수 있는 산불 연소량 조사 방법론의 개발이 요구되고 있다.

한편 같은 산림일지라도 산불의 피해정도에 따라 연소량은 달라진다. 즉, 지표연료만 연소되었을 때와 산림의 수관층 부위까지 연소되었을 때의 연소량은 다르다. 따라서 산불연소량을 조사하는데 있어서 산불피해 정도는 반드시 고려되어야 한다. 산불피해도에 대한 정의는 다양하지만, 본 연구에서는 산불로 인한 식생의 변화로 한정하였다(Chafer *et al.*, 2004). 산불피해도의 단계는 연구자에 의해 3단계(Sunar and Ozkan, 2001; 원강영과 임정호, 2001; 김형호 등, 2002; 정주상 등, 2002)에서부터 5단계(Chafer *et al.*, 2004)까지 다양하지만 3단계로 구분하는 것이 일반적이다.

이 연구에서는 「심», 「중», 「경」 3 단계의 산불피해도에 따라 산불연소량을 조사하는 체계를 제시하고, 2005년 4월에 발생한 양양산불에 적용하였다. 이를 통해 소나무 임분에 있어서 산불피해도별 엽면적지수(leaf area index)의 변화 추이를 분석하고, 연소량을 추정하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

산불로 인한 연소량을 추정하기 위해 2005년 4월 4일 23시 53분에 강원도 양양군 양양읍 화일리 야산에서 발생한 산불을 대상으로 하였다. 이 지역은 N38°05', E128°35'에 위치하고 있으며(Figure 1), 1971~2000년 동안의 연평균강수량은 1,342mm였다. 또한 태백산맥의 영향으로 편현상이 발생하며, 소나무(*Pinus densiflora*)가 98%로 우점하고 있는 지역이다. 이 산불로 인해 1,000ha가 넘는 산림과, 주택 163동(전소 135, 반소 28), 문화재인 낙산사 경내 건물 22건(석탑 2, 동종 1, 전각 17, 시설물 2) 등이 피해를 입었다. 양양산불의 평균 확산속도는 0.65km/hr로 분석되었고, 최대 확산속도는 약 1.21km/hr로 분석되었다(이병두 등, 2005).

2. 연구방법

1) 산불피해도 분류기준

산불 피해도는 산불로 인한 산림의 물리적, 화학적, 생물학적 변화를 포함한 산림생태계의 변화 정도를 의미한다(White *et al.*, 1996). 본 연구에서는 산불피해를 산불로 인한 식생의 변화로 한정하여(Chafer *et al.*, 2004; 이병두, 2005) 산불의 피해도를 「심», 「중», 「경」 3개의 등급으로 분류하여 조사하였다. 각각의 분류 기준은

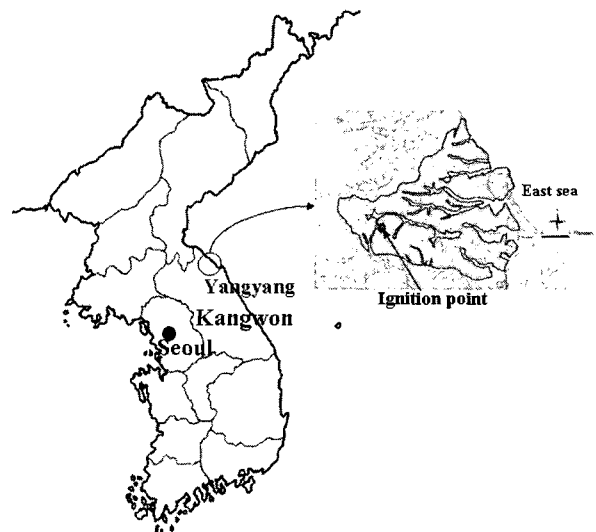


Figure 1. Location of 2005 Yangyang forest fire

2000년 동해안 산불피해지 공동조사단이 제시한 기준을 응용해, 수간 및 수관 부위까지 까맣게 탄 임목이 30×30m 크기 이상인 임지를 「심」, 수간부위 일부와 수관이 노랗게 변색된 임목의 임지를 「중」, 생립목 및 수간 부위만 일부 그을린 피해목이 혼효된 임지를 「경」으로 구분하였다(이병두 등, 2005).

2) 피해도별 연소량 조사

산불피해지에 대한 현지조사는 산불 발생 직후인 2005년 4월 중순에서 5월 초순에 이루어졌으며, 양양산불 피해지 중에서 피해도 「심」, 「중」, 「경」, 그리고 대조구로써 미피해지에 대해서 각각 3개씩, 총 12개의 plot을 20×20m 크기로 설정하였다. 각 plot은 양양산불 피해지의 주요 수종인 소나무림에 설치하였으며, 지형효과를 줄이기 위해 고도와 방위, 경사에 있어서 차이가 크지 않도록 하였다. 또한 plot별 임분의 차이를 최소화하기 위해 ha당 임목본수와 흉고단면적을 고려하였다.

상층을 차지하고 있는 식생에 대해 plot 내의 경급 6cm 이상 모든 임목에 대하여 흉고직경을 0.1cm 팔약, 수고, 지하고 및 임목의 산불피해에 따른 그을음 흔적인 화염길이를 각각 10cm 팔약으로 조사하였다. 엽면적지수(LAI: Leaf Area Index)는 Nikon 어안렌즈(fish-eye lens)를 디지털카메라에 장착하여 수관층을 촬영한 다음, Delta-T사의 수관분석 프로그램인 Hemiview 2.1 Ver.을 이용하여 계산하였다. 관목층의 식생은 plot 내에서 4×4m 크기의 방형구를 임의의 위치에 설정한 다음, 6cm 이하 고목, 관목에 대하여 근원경은 0.1mm 팔약, 수고는 1cm 팔약으로 측정하고, 저울과 건조기를 이용해 건중량을 측정하였다. 마지막으로 지표층의 연료량은 0.5×0.5m 크기의 방형구 두 개를 임의의 위치에 설정한 다음 낙엽층 두께와 건중량을 조사하였다.

3) 연소량 추정

양양지역의 산불피해도별 연소량은 식(1)을 이용하여 분석되었다. 이 식에서 B_i 는 피해도별 연소량, Q_i^r 은 피해도 i (1=경, 2=중, 3=심)일 때 r (1=지표층, 2=관

목층, 3=수관층)에 대한 연소량을 의미한다. Q_i^r 은 식(2)에서와 같이 연소 전 바이오매스에서 연소 후 남아있는 바이오매스를 제감함으로써 수관층, 관목층, 지표층 각각의 연소량을 추정하였다. 식(2)에서 $L_{i(Before)}^r$ 는 피해도 i 일 때 r 에 대한 연소 전 바이오매스, $L_{i(After)}^r$ 는 피해도 i 일 때 r 에 대한 연소 후 바이오매스를 의미한다.

$$B_i = \sum_{r=1}^3 Q_i^r \quad \text{식 (1)}$$

$$Q_i^r = L_{i(Before)}^r - L_{i(After)}^r \quad \text{식 (2)}$$

수관층의 산불이 발생하기 전 바이오매스 산출을 위해 Table 1에서와 같이

$\log W = a + b \log D + c \log H$ (W : 건중량, D : 흉고직경, H : 수고) 식을 이용하여 소나무의 부위별 바이오매스를 산출하는 박인협과 김준선(1989)의 연구결과를 이용하였다. 즉, 수목의 흉고직경과 수고를 통해 수목의 가치와 잎에 대한 건중량을 계산함으로써 수관층의 산물 전 바이오매스를 산출할 수 있다.

산불 후 남아있는 수관층의 바이오매스는 지표층, 관목층과는 달리 직접 측정하는 것이 어려우므로 미피해지 임분의 LAI와 피해임분의 LAI의 차이를 이용하여 이 비율차이만큼 연소 전 바이오매스 ($L_{0(before)}^3$)에서 연소된 것으로 추정하였다. 즉, 수관층의 바이오매스와 LAI 간에는 강한 상관관계가 있으므로(Bartelink, 1996) 미피해지, 경, 중, 심의 순으로 LAI는 감소함을 가정할 수 있다. 이 때 식(3)에서와 같이 LAI의 감소비율 만큼 산물 전 수관층의 바이오매스에서 산물 후 바이오매스를 제외하면 연소량을 추정할 수 있는 것이다.

$$L_{i(After)}^3 = L_{0(before)}^3 \times (LAI_i / LAI_0) \quad \text{식 (3)}$$

Table 1. Allometric regressions for sample trees of *Pinus densiflora* stands

Tree components	Parameters			r	E [*]
	a	b	c		
Live branches	-0.810	2.946	0.875	0.986	1.174
Dead branches	-0.938	2.256	1.274	0.775	1.505
Needles	-0.811	2.139	1.268	0.980	1.183

* E is the estimation of relative error

관목층의 바이오매스는 plot 내의 관목을 직접 채집하여 근원경, 수고, 건중량을 이용하여 분석하였다. 양양 지역 임분의 관목층의 경우 교목형태의 관목이 대부분이었기 때문에 수관(canopy) 면적을 이용하기 보다는 수고와 근원경을 사용하였다(Sah et al., 2004). 연소 전 관목층 바이오매스는 미피해지의 관목층 바이오매스를 이용하여 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$L_{i(before)}^2 = \sum_{k=1}^n DB_s \times (D_k/D_s) \times (H_k/H_s) \quad \text{식(4)}$$

D_k 는 피해도 i에서의 k번째 관목의 근원경, H_k 는 피해도 i에서의 k번째 관목의 수고, DB_s 는 미피해지 표준목 건중량, D_s 는 미피해지 표준목 근원경, H_s 는 미피해지 표준목의 수고를 의미한다. 지표층의 바이오매스는 건조기를 이용하여, 80°C 온도로 무게변화가 없을 때까지 건조한 후 저울을 이용 직접 바이오매스를 측정하였다. 관목층, 수관층과 동일하게 각 피해도별 연소 전 지표층 바이오매스는 미피해지 임분의 지표층 바이오매스와 동일하다는 가정 하에 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 조사대상지역의 특성

Figure 2와 Table 2는 양양산불 피해지역에서 산불피해도별 plot의 위치와 특성을 보여주고 있다. plot을 설치한 지역의 지형조건을 살펴보면 동해안에 접해있어 평균 고도가 43m, 평균 경사 18.4°, 주향은 동향이였다. 주요 상층식생은 소나무림으로 ha당 평균 1,252본이 존재하고 있었으며, 평균 수고는 10.8m, 평균 흉고직경은 약 16.7cm, 평균 흉고단면적은 29.5m²/ha이였다. 각 plot은 상층식생, 흉고단면적, 수고가 동일한 것으로 분석되었

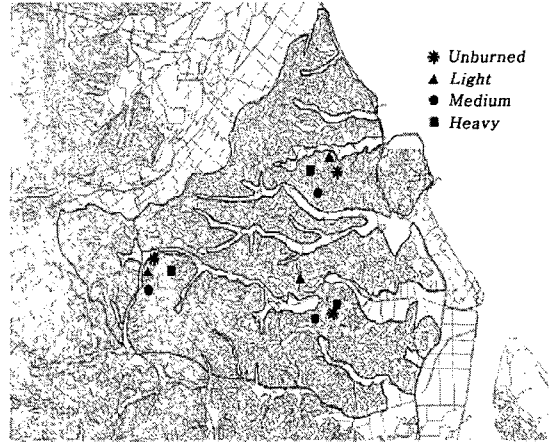


Figure 2. Sampling plots based on the grade of fire severity

다. 관목층을 이루고 있는 주요 수종은 싸리(*Lespedeza bicolor*), 생강나무(*Lindera obtusiloba*), 산뽕나무(*Morus bombycis*), 졸참나무(*Quercus serrata*) 등이였다. 지표층의 바이오매스는 ha당 9,264kg, 관목층의 바이오매스는 1,867kg이였다.

2. 산불피해도에 따른 LAI의 변화

산불피해도별로 수관층을 촬영하여 분석한 LAI 영상을 분석한 결과 Figure 3과 Table 3에서와 같이 산불피해도가 강해질수록 수관층에 존재하는 가지와 잎 즉, 수관층 바이오매스가 감소하는 경향이 있었다. 산불피해도별로 LAI가 달랐으며(F-value 153.15, p<0.0001), Duncan이 제시한 다중범위검정(multiple-range test)을 이용하여 α 값이 0.05수준에서 다중비교를 실시한 결과 역시, 산불피해도 「심」, 「중」, 「경」의 집단 간 차이가 존재하였다(Table 4). 그러나 산불 미피해지와 산불피해도 「경」 지역의 차이는 존재하지 않았다. 이는 조사 자료 수집 시 산불피해도 「경」을 수관층의 피해

Table 2. Summarized statistics of sampling plots

Fire severity	Altitude(m)	Slope(°)	Trees/ha (no.)	Height (m)	DBH (cm)	BA/ha (m ²)
Unburned	54	12.7	1,418	11.4	16.5	33.2
Light	29	16.5	1,034	13.0	22.1	41.7
Medium	56	19.9	1,229	9.7	14.2	21.1
Heavy	33	24.5	1,301	8.9	14.1	22.1
Mean	43	18.4	1,252	10.8	16.7	29.5

* Dead trees included

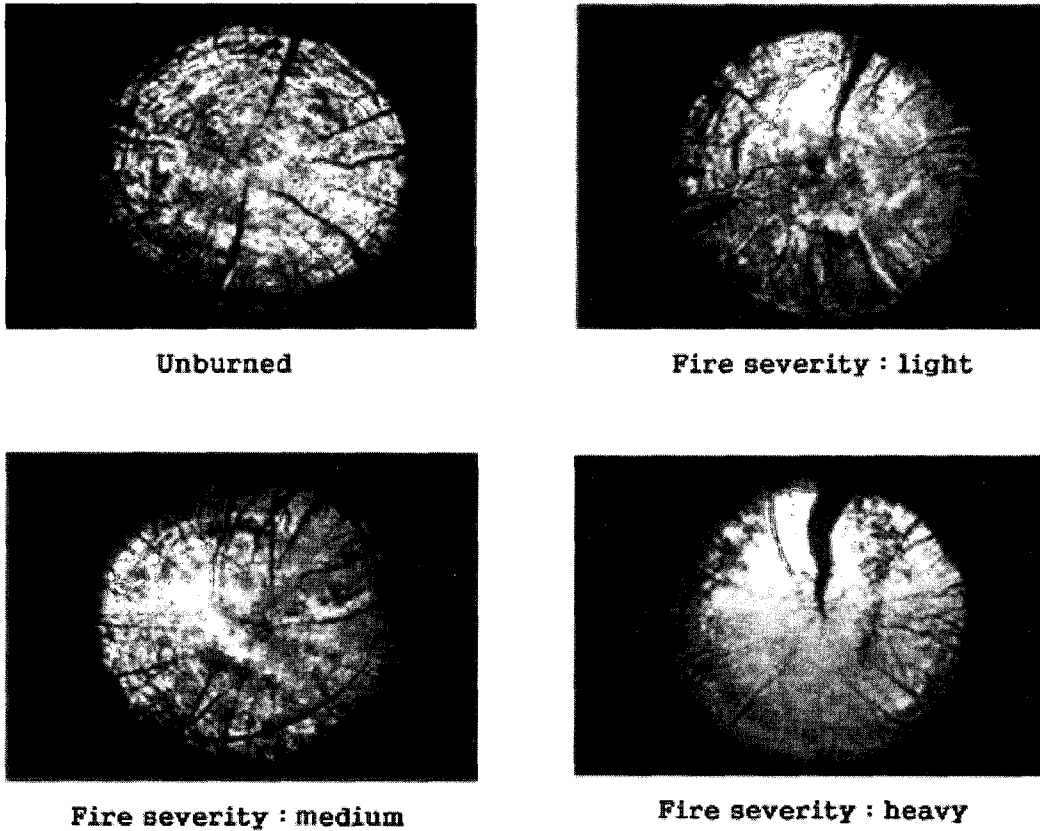


Figure 3. Photographs for the analysis of LAI by the grade of fire severity

를 입지 않은 곳으로 정의했기 때문이다.

3. 산불피해도별 연소량

산불피해도별 연소량은 Table 5와 같다. 심하게 피해를 입은 plot에서는 평균 17,451kg/ha이 연소된 것을 알 수 있었으며, 피해도 「중」에서는 8,724kg/ha, 마지막으로 지표화로 확산된 plot에서는 3,693kg/ha이 산불로 인해 연소되었음을 알 수 있었다. 피해도 「경」 plot의 경우 지표화로만 확산되고 수관화로 번지지 않았기 때

문에 수관층의 연소량은 존재하지 않았다. 피해도 「중」 plot의 수관층 연소량은 약 591kg/ha로 미피해지 수관층의 평균 바이오매스 24,532kg/ha과 비교했을 때 2.4%를 차지하는 양이었다. 이는 조사가 이루어진 plot의 평균 화염높이가 4.8m, 지표면에서 가지가 존재하는 곳까지의 높이를 의미하는 지하고의 평균높이는 5.7m로 조사되어 대부분의 나무에서 수관의 일부분만이 연소되었기 때문으로 판단된다. 피해가 심한 plot의 경우 수관층에서 평균 7,268kg/ha이 연소되어 미피해지 임분과 비교했을 때 약 30%정도가 연소된 것을 알 수 있었다.

Table 3. Mean LAI by the grade of fire severity

Fire severity	Number of images	Mean LAI	Variance
Unburned	26	3.54	0.11
Light	24	3.68	0.09
Medium	26	1.89	0.11
Heavy	18	1.14	0.06

Table 4. Result of mutiple-range test of LAI according to the grade of fire severity

Fire severity	Mean	Unburned	Light	Medium	Heavy
Unburned	1.14	-	0.14	1.65*	2.40*
Light	1.89		-	1.79*	2.54*
Medium	3.68			-	0.75*
Heavy	3.54				-

*p<.05

Table 5. Biomass burnt out at the 95% confidence level

Fire severity	Layer	Plot1 (kg/ha)	Plot2 (kg/ha)	Plot3 (kg/ha)	Mean (kg/ha)	Confidence interval (kg/ha)
Light	Ground	3,121	2,951	3,058	3,043	3,043±168
	Shrub	727	640	573	650	650±152
	Crown	-	-	-	-	-
	Total	3,848	3,591	3,631	3,693	3,693±320
Medium	Ground	7,231	6,741	7,301	7,091	7,091±598
	Shrub	985	992	1,150	1,042	1,042±183
	Crown	946	686	141	591	591±380
	Total	9,162	8,419	8,592	8,724	8,724±1,161
Heavy	Ground	8,983	8,574	8,864	8,807	8,807±413
	Shrub	1,259	1,259	1,609	1,376	1,376±396
	Crown	7,643	8,715	5,445	7,268	7,268±1,540
	Total	17,885	18,548	15,918	17,451	17,451±2,349

결론

본 논문에서는 2005년 강원도 양양에서 발생한 산불을 대상으로 산불피해도를 「심」, 「중」, 「경」 3단계로 구분하여 산불로 인한 연소량을 분석하였다. 본 연구에서 제시한 산불로 인한 피해도별 연소량 추정 방법은 조사 과정에 많은 시간과 비용을 요구하는 기존 벌채를 통한 방법과 비교해 볼 때, 비용이 적게 들고 현장에서 적용이 용이하다는 점에서 의미가 있는 것으로 생각된다.

향후 산불이 발생했을 때 GIS 및 RS와 같은 공간정보 기술을 이용하여 산불로 인한 피해도별 면적을 산출하고 본 연구를 통해 제시된 방법론을 이용하여 현장에서 피해도별 연소량을 샘플링한 후 전체 산불지역의 연소량을 추정할 수 있는 모델을 개발한다면 국가적 차원에서 탄소수지모델의 정확성을 높이는 데 일조할 수 있으리라 판단된다. 하지만 정확한 연소량을 추정하기 위해서는 산불피해도의 단계를 구분하는 정량적 기준과 LAI

를 이용한 수관층 연소량 추정 방법에 대한 추가 연구, 활엽수림에서의 연소량 추정 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 아울러 피해도별, 수종별 반복조사를 통해 통계적으로 유의미한 모델을 산출해야 할 것이다.

인용문헌

- 김형호, 이병두, 정주상(2002) 인공신경망 적용에 의한 Landsat 7 ETM+ 영상 해독과 소나무림의 산불피해등급 추정. 한국임학회지 91(6): 706-713.
- 박인협, 김준선(1989). 한국산 4개 지역형 소나무천연림의 물질 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 78(3): 323-330.
- 이병두, 이시영, 정주상(2005) 2005년 강원도 양양산불 행동 특성. 한국화재·소방학회 논문지 19(4): 6.
- 이병두(2005) GIS와 RS를 이용한 2000년 삼척산불 행동 특성 분석 및 산불확산예측모델 개발. 서울대학교 박사학위논문, 117쪽.

- 원강영, 임정호(2001) 단일 시기의 Landsat 7 ETM+ 영상을 이용한 산불피해지도 작성. 한국원격탐사학회지 17(1): 85-97.
- 정주상, 이병두, 김형호(2002) GIS 및 판별분석에 의한 삼척 산불지역의 소나무임분 피해도 추정. 한국임학회지 91(3): 355-361.
- Allison, E.C., Z.F. Peter and E.C. Joseph(2005) Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire* 14: 189-198.
- Bartelink, H.H.(1996) Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 86: 193-203.
- 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: 227-240.
- Haugaasen, T., J. Barlow and C.A. Peres(2003) Surface wildfires in central Amazonia: Short-term impact on forest structure and carbon loss. *Forest Ecology and Management* 179: 321-331.
- Holden, Z.A., A.M.S. Smith, P. Morgan, M.G. Rollins and P.E. Gessler(2005) Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data. *International Journal of Remote Sensing* 26(21): 4801-4808.
- Isave, A.S., G.N. Korovin, S.A. Bartalev and D.V. Ershov(2002) Using remote sensing to assess russian forest fire carbon emissions. *Climatic change* 55: 235-249.
- Key, C.H. and N.C. Benson(2004) Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'. USDA Forest Services, Rocky Mountains Research Station General Technical Report.
- Sah, J.P., M.S. Ross, S. Koptur and J.R. Snyder(2004) Estimating aboveground biomass of broad leaved woody plants in the understory of Florida Keys pine forests. *Forest Ecology and management* 230: 319-329.
- Sunar, F. and C. Ozkan(2001) Forest fire analysis with remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing* 22(12): 2265 - 2277.
- Van Wagtenonk, 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: 397-408.
- 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.