SPOT5영상과 현장조사자료를 융합한 대형산불지역의 피해강도 분석

원명수^{1*} · 김경하¹ · 이상우²

¹국립산림과학원 산림방재연구과, ²건국대학교 환경과학과
(2014년 5월 30일 접수; 2014년 6월 24일 수정; 2014년 6월 24일 수락)

Analysis of Burn Severity in Large-fire Area Using SPOT5 Images and Field Survey Data

Myoungsoo Won^{1*}, Kyongha Kim¹ and Sangwoo Lee²

¹Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute, 57 hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea

²Department of Environmental Science, Konkuk University, Kwangjin-Gu Hwayang-Dong, Seoul 143-701, Korea

(Received May 30, 2014; Revised June 24, 2014; Accepted June 24, 2014)

ABSTRACT

For classifying fire damaged areas and analyzing burn severity of two large-fire areas damaged over 100 ha in 2011, three methods were employed utilized supervised classification, unsupervised classification and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). In this paper, the post-fire imageries of SPOT were used to compute the Maximum Likelihood (MLC), Minimum Distance (MIN), ISODATA, K-means, NDVI and to evaluate large-scale patterns of burn severity from 1 m to 5 m spatial resolutions. The result of the accuracy verification on burn severity from satellite images showed that average overall accuracy was 88.38 % and the Kappa coefficient was 0.8147. To compare the accuracy between burn severity and field survey at Uljin and Youngduk, two large fire sites were selected as study areas, and forty-four sampling plots were assigned in each study area for field survey. The burn severities of the study areas were estimated by analyzing burn severity (BS) classes from SPOT images taken one month after the occurrence of the fire. The applicability of composite burn index (CBI) was validated with a correlation analysis between field survey data and burn severity classified by SPOT5, and by their confusion matrix. The result showed that correlation between field survey data and BS by SPOT5 were closely correlated in both Uljin ($r = -0.544$ and $p < 0.01$) and Youngduk ($r = -0.616$ and $p < 0.01$). Thus, this result supported that the proposed burn severity analysis is an adequate method to measure burn severity of large fire areas in Korea.

Key words: Burn severity, Large fire, Field survey, SPOT5, Maximum likelihood classification

I. 서 론

우리나라는 최근 10년간(2003-2012) 연평균 387건의 산불이 발생하여 734ha의 산림피해를 입고 있다. 이 중 산불발생 건수의 51%(196건), 피해면적의

84%(614ha)가 봄철(3~4월)에 집중된다. 특히 대형산불이 많이 발생하는 4월에는 발생건수의 28%(107건), 피해면적은 60%(442 ha)를 차지한다. 특히 동기간 동안 300ha 이상의 대형산불이 10건이 발생하여 28,377ha의 산림과 재산피해를 가져왔으며, 대부분 4

* Corresponding Author : Myoungsoo Won
(mswon@forest.go.kr)

월에 집중되고 있다(Korea Forest Service, 2013). 이는 10년간 산불로 인한 전체 피해면적의 72%에 해당하는 수치로 봄철 대형산불로 인한 피해는 가히 심각하다고 할 수 있다.

산림은 수목의 종류, 분포 그리고 구조에 따라 연료량의 분포가 달라지고, 이에 따라 산불이 발생하였을 때 산불행동과 피해강도는 다양한 연료층의 특성에 따라 결정된다. 또한 특정 임분에서의 산불위험도는 잠재된 연료량에 따라 다양한 형태로 산불피해강도에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 피해특성 구명을 위해 대형산불 피해지를 대상으로 현장조사를 기반으로 한 산불피해강도 평가와 위성영상자료를 활용하여 신속하게 산불피해강도를 평가할 필요가 있다.

산불피해강도(Burn severity)는 지역적이고 국지적인 환경에서의 산불피해 후 장/단기적으로 산불에 의한 영향을 통합한 의미로, 생태계가 산불로 인해 변화된 정도로 정의할 수 있다(Morgan *et al.*, 2001; Key and Benson, 2002; National Wildfire Coordinating Group, 2005). 산불피해강도의 평가는 산불피해 후 조사계획 수립과 모니터링은 물론 산불 전후의 피해특성 및 양상 그리고 복구계획 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있다(Lentile *et al.*, 2006). 넓은 면적의 산불피해지 구획과 강도를 효율적으로 분석하기 위해서는 Landsat, SPOT, KOMPSAT, IKONOS, RapidEye 등 중고해상도 위성영상자료를 활용하여 피해특성을 분석하는 것이 시간, 인력 그리고 예산적 측면에서 현장조사에 의존하는 것보다 매우 효과적일 수 있다. 위성과 항공기 센서들은 산불피해 전후의 분광반응 변화를 탐지하고 산불전후의 환경조건들을 평가하는데 널리 활용되고 있다. 특히 산불피해강도의 조사 및 평가는 피해지 복구, 복원, 모니터링 등 피해 후 관리에 기초로 이용되는 중요한 자료이며, 다중 분광영상을 이용한 원격탐사기법은 신속하고 비용효과가 큰 측면에서 경관변화를 모니터링하고 평가하는데 효과적으로 적용되고 있다(Lentile *et al.*, 2006).

산불피해로 인한 분광 패턴의 변화 분석은 산불피해 전후 영상의 정규탄화지수(Normalized Burn Ratio: NBR)와 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)를 포함한 다양한 분광밴드들의 조합에 의한 지수의 형태로 활용할 수 있다. 특히, NBR과 dNBR(differenced NBR)은 원격탐사 자료로부터 산불피해강도를 추정하는데 폭넓게 활용되었다(Key and

Benson, 2002, 2006; van Wagtenonk *et al.*, 2004; Cocke *et al.*, 2005; Roy *et al.*, 2006). 특히 Key and Benson(2006)은 NBR과 NDVI 변화에 의한 산불피해강도 분석 결과, 피해강도 평가를 위해서는 NBR이 NDVI 보다 산불피해지의 공간적 이질성과 복잡성을 더 효과적으로 표현할 수 있다고 하였으며, 가을철에 촬영된 영상보다는 봄철 생장기에 촬영된 영상이 피해강도를 더 효과적으로 평가할 수 있다고 하였다. Duffy *et al.*(2007)은 NBR을 이용하여 알래스카 산불피해지의 식생형태와 피해강도의 상관성을 분석하였으며, Charer *et al.*(2004)은 2001년 호주 시드니에서 발생한 Christmas 산불을 SPOT2 영상을 이용하여 $NDVI_{\text{difference}} (NDVI_{\text{prefire}} - NDVI_{\text{postfire}})$ 를 산출하여 피해강도(burn severity) 및 산불강도(fire intensity), 바이오매스량과 정규식생지수(NDVI)간의 상관관계를 분석하였다. Hammill and Bradstock(2006)은 SPOT2와 Landsat7 영상을 이용하여 산불 전후의 NDVI 변화를 계산한 후 산불피해지역의 식생유형과 피해강도와의 관계를 분석한 바 있다.

근래의 산불의 대형화 추세와 더불어 신속성, 객관성, 효율성 측면에서 원격탐사를 이용한 산불피해지의 조사분석은 점차 각광을 받고 있다(Won *et al.*, 2007). 우리나라의 경우 RS/GIS기법을 활용한 산불피해지의 조사 및 모니터링이 실시되고 있으나, 산불피해조사(Composite Burn Index, CBI)를 기초로 RS/GIS 분석 결과를 검증하지 않아 국제적으로 그 신뢰성이 확보되지 못하고 있으며, 2008년 산불피해지 생태변화 조사방법 매뉴얼(Korea Forest Research Institute, 2008)에 피해조사기법이 일부 포함되어 있으나, 미국의 산불피해강도 평가지수(CBI) 기법을 상당 부근 참고하는 수준에 머무르고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 최근 들어 발생한 100 ha 이상의 대형산불 피해지를 대상으로 우리나라 실정에 맞게 개발한 산불피해강도 평가지수(KCBI) 산정방법을 산불피해 현장조사 시 적용하고, 고해상도 위성영상자료를 이용하여 넓은 면적의 대형산불 피해지역의 산불피해강도를 정량적으로 분석하는데 있다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

연구 대상지역은 2011년 경북 울진산불(2011. 3.

Fig. 1. Study areas: Uljin fire and Yeongduk fire, 2011.

30.), 경북 영덕산불(2011. 4. 1.) 피해를 대상으로 현장조사와 위성영상자료를 취득하여 산불피해강도 분석에 활용하였다(Fig. 1). 산림청 산불통계(Korea Forest Service, 2013)에 의하면 울진피해지는 경북 울진군 기성면 정명리에 위치해 있고 피해면적은 168 ha 이며, 영덕 피해지는 경북 영덕군 남정면 회리에 위치해 있고 피해면적은 175.5ha 였다.

2.2. 분석자료

2011년 발생한 울진과 영덕산불 피해지 피해강도 분석을 위해 5m 공간해상도의 SPOT5 위성영상자료를 취득하여 활용하였다. 분석에 이용된 영상은 산불로 인한 연기와 먼지 등 영상 분석에 영향을 미치는 물질이 어느 정도 사라진 1개월 이내의 영상을 이용하였다. 산불피해강도 추출을 위해 사용된 고해상도 위성영상자료는 Fig. 2와 같다.

2.3. 산불피해지 현장조사

대형산불 피해지의 현장조사를 위하여 산불피해강도 평가지수(KCBI) 현장조사 야장(Lee *et al.*, 2012)을 이용하여 산불피해등급을 산출하였다. 신속한 산불피해 평가를 위해 색 변화를 혹은 고사율과 같이 피해 전 임상의 자료를 요하거나 장기적인 모니터링을 요하는 측정 항목들은 가급적 배제하였다. KCBI는 그 자체로 의미 있는 자료이지만 주요 목적이 위성영상을 이용한 산불피해강도 분석결과의 검증에 있다.

KCBI와 위성영상 분석의 적합성 검토를 위해 연구 대상으로 선정한 울진, 영덕 산불피해지를 대상으로 현장조사를 실시하였다. 본 연구에서는 위성영상 분석 결과가 현장조사 지점의 선정과 KCBI 평가치에 영향을 주는 것을 사전에 방지하고자 현장조사와 위성영상 분석을 독립적으로 시행하였다. KCBI 평가는 두 지역

(a) Uljin fire area

- Fire date: 2011.03.30.

- Imaging date: 2011.04.15.

- Image type: SPOT5, 5m resolution

(b) Yeongduk fire area

- Fire date: 2011.04.01.

- Imaging date: 2011.04.15.

- Image type: SPOT5, 5m resolution

Fig. 2. SPOT5 images for burn severity analysis and field survey points in two large fire areas.

모두 동일 조사자들이 산불 후 3개월 이내 동일 조사 기간에 평가하도록 하여 조사자 및 조사시기의 차이에 의해 발생하는 오류를 최소화 하도록 하였다. 현장조사 시 피해강도의 등급을 수관전소(Extreme), 수관열해(High), 피해중(Moderate), 피해경(Low), 미피해지(Unburned) 5등급으로 구분하여 조사를 실시하였으며, 조사항목은 교목층(>8m), 중층(2-8m), 관목층, 지표층(낙엽, 낙지, 초본층), 수고, 흉고직경, 지하고, 탄화높이, 수관피해율, 생존율, 위치좌표, 입지환경 등을 포함하여 조사하였다. 조사구는 현장에서 피해강도 등급을 대표할 수 있는 곳으로 선정하였으며 전체 피해지 면적과 분석영상의 해상도를 고려하여 동일한 피해강도 지역 내에 접근성이 좋고, 동일한 피해강도 지역의 중앙으로 판단되는 지점을 선정하여 10 × 10 m 크기로 배치하였다. 이러한 기준으로 울진과 영덕의 대형산불 피해지에서 KCBI 평가를 위한 측정지표들을 조사하였다. 현장의 산불피해강도 평가를 위해 울진 44개, 영덕 44개 지점을 선정하여 샘플링하였다. KCBI는 기존 연구된 ‘한국형 산불피해강도지수 개발 및 검증’ 방법을 이용하여 산출하였으며(Lee *et al.*, 2012), 피해경(Low) 등급은 $0 < KCBI \leq 3.3$ 의 구간으로 전 층위에서 피해가 거의 없거나 지표층이 연소되고 다른 층위에서 열해, 전소, 탄화 등의 피해가 미미하게 발생한 경우이다. 피해중(Moderate)은 $3.3 < KCBI \leq 6.6$ 의 구간으로 지표층과 하층식생이 전소하였을 경우가 이에 해당한다. 수관열해(High)는 $6.6 < KCBI \leq 9.9$ 의 구간으로 지표, 하층, 중층이 모두 전소된 경우이다. 단 이와 같이 각 층위에서 전소된 경우 열해는 없는 것을 가정한다. 수관전소(Extreme)는 지표, 하층, 중층이 모두 전소($9.9 < KCBI \leq 13.2$ 의 구간)되고 상층 식생 또한 일부 피해가 발생했을 경우이다. 산불피해 현장에서 수집된 피해등급과 위치정보들은 위성영상자료를 활용한 피해강도 구분을 위해 감독분류의 훈련지역으로 선정하여 분석에 활용하였다.

2.4. SPOT5 영상을 이용한 산불피해강도 분석

SPOT5영상을 활용한 연구대상지의 산불피해강도 분석을 위해 정규식생지수(NDVI)와 무감독분류기법 중 널리 사용하고 있는 ISODATA, K-means 분석기법을 사용하였으며, 감독분류기법에서는 산불피해지 현장조사 자료를 기반으로 최대우도법(Maximum Likelihood Classification, MLC)과 최소거리법(Minimum Distance

Fig. 3. Flow chart.

Classification, MIN)을 이용하여 산불피해 후의 피해 등급을 구분하였다. 이상의 5가지 분석기법을 이용하여 분류된 산불피해등급을 비교 분석하여 산불피해지에서의 최적의 피해강도 분석기법을 선정하였다. 연구 대상지의 위성영상자료는 수치지도대 영상정합(map to image)을 통해 TM(Transverse Mercator) 좌표체계(중부원점)에 따라 투영변환한 다음 공1차 내삽법(bilinear interpolation)에 의해 재배열하였으며, 이 때 영상 좌표변환은 X, Y 각 방향에 대해 RMSE 0.5 픽셀 이내의 정확도로 수행하였다.

본 연구에서는 산불피해강도의 정의를 유기물 감소 등 환경요소의 변화 개념을 고려하여 산불피해 후의 효과 모니터링을 위해 피해강도(burn severity) 측면으로 국한시켜 접근하였다. 피해강도의 등급은 현장조사 피해강도 등급 기준과 동일하게 수관전소(Extreme), 수관열해(High), 피해중(Moderate), 피해경(Low), 미피해지(Unburned) 5등급으로 구분하였으며 수관전소와 수관열해는 피해강도가 심해 수목이 완전 고사한 지역에 해당한다. 산불피해지역의 구획을 위해 위성영상의 파장대역별 RGB 밴드조합을 통해 산불피해를 입은 외곽선을 On-screen 디지털라이징을 통해 피해경계를 설정하였다. 자료처리를 위해서 ENVI 원격탐사 이미지 처리 프로그램과 ArcGIS 분석 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. KCBI에 의한 대형산불지역의 피해강도

울진산불피해지는 평균수고는 9.6m였으며 지하고는 4.9m인 것으로 나타났다. 총 44개소의 샘플지역 중 수관전소와 수관열해 비율은 38.6%, 36.4%로 나타나

Table 1. Summary of field survey for burn severity analysis in two large fire areas

Fire area	Tree Height (m)	DBH (m)	Burn severity classes	Field survey (points)	Ratio (%)	Forest types	Field survey (points)	Ratio (%)
Uljin	9.6	4.9	Extreme	17	38.6	Coniferous	40	90.9
			High	16	36.4	Deciduous	1	2.3
			Moderate	6	13.6	Mixed	3	6.8
			Low	5	11.4			
			Unburned	0	0.0			
			Total	44	100.0		44	100.0
Yeongduk	7.2	2.9	Extreme	19	43.2	Coniferous	40	90.9
			High	16	36.4	Deciduous	0	0.0
			Moderate	4	9.1	Mixed	4	9.1
			Low	5	11.4			
			Unburned	0	0.0			
			Total	44	100.0		44	100.0

Table 2. Damage area and burn severity classes by NDVI analysis in Uljin fire area
NVDI, Mean = -0.1397, Std. D = 0.0709, N = 58,516

Fire area	Classes	Intervals	Threshold	Count	Area(ha)	% Intervals
Uljin	Extreme	$x < \mu - 1/2\delta$	-0.1751	20,618	51.5	35.2%
	High	$\mu - 1/2\delta x < \mu + 1/2\delta$	-0.1043	21,117	52.8	36.1%
	Moderate	$\mu + 1/2\delta x < \mu + 3/2\delta$	-0.0334	11,523	28.8	19.7%
	Low	$\mu + 3/2\delta x < \mu + 5/2\delta$	0.0375	4,557	11.4	7.8%
	Unburned	$\mu + 5/2\delta \leq x$	0.1299	701	1.8	1.2%
Total				58,516	146.3	100.0%

피해가 심했던 피해등급의 현장조사 비율이 전체의 75%를 차지하였다. 현장조사구의 피해 임상 비율 또한 소나무림으로 구성된 침엽수림에서 가장 많은 90.9%로 나타났다(Table 1).

영덕산불피해지의 경우 총 44개 피해강도 조사구를 대상으로 분석한 결과 평균수고와 지하고는 각각 7.2m, 2.9m로 나타났으며, 수관전소와 수관열해, 피해중, 피해경 지역의 조사 비율이 각각 43.2%, 36.4%, 9.1%, 11.4%로 조사되었다. 영덕지역도 피해강도가 심했던 지역에서 전체의 79.6%를 차지하였다. 현장조사구의 피해 임상 비율 또한 소나무림이 90.9%가 조사되어 가장 많은 비율을 보였다(Table 1).

3.2. 울진산불 피해지의 피해강도

울진산불피해지의 NDVI 분석 후 평균과 표준편차를 이용한 피해강도 클래스를 구분한 결과, 총 7개로 구분되었다(Table 2). 피해강도 ‘수관전소’에 해당하는 구간에서 35.2%를 차지하였으며, ‘수관열해’에 해당하는 구간에서는 36.1%로 가장 많은 면적분포를 보였다.

Fig. 4. Burn severity distribution map by NDVI analysis in Uljin fire area.

또한 ‘피해중’, ‘피해경’, ‘미피해’지역의 분포는 각각 19.7%, 7.8%, 1.2%의 분포를 보였다. NDVI 분석 결과 울진지역의 산불에 의한 전체 피해면적은 146.3ha로 나타났다(Fig. 3).

Fig. 5. Burn severity distribution map by supervised and unsupervised classification in Uljin fire area (from upper-left: MLC, MIN, ISODATA, K-means classification).

Table 3. Change of burn severity by five classifier in Uljin fire area

Classes	NDVI		MLC		MIN		ISODATA		K-means	
	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)
Extreme	51.5	35.2	19.3	13.2	18.1	12.4	60.1	41.1	21.5	14.7
High	52.8	36.1	45.5	31.1	58.2	39.8	64.2	43.9	101.7	69.5
Moderate	28.8	19.7	25.5	17.5	25.7	17.6	2.2	1.5	5.6	3.8
Low	11.4	7.8	52.4	35.8	43.5	29.8	13.9	9.5	16.8	11.5
Unburned	1.8	1.2	3.5	2.4	0.7	0.5	5.9	4.1	0.7	0.5
Total	146.3	100.0	146.3	100.0	146.3	100.0	146.3	100.0	146.3	100.0

또한 피해강도 추출을 위한 분석기법 중 감독분류 (MLC, MIN)에 의한 방법에서 ‘수관열해’로 인한 피해가 가장 많은 것으로 나타났으며, K-means에 의한 무감독분류 결과는 ‘수관전소’로 인한 산불피해가 많았던 반면 지표화 피해를 입은 ‘피해경’ 지역의 분포 비율이 상대적으로 감소한 것으로 나타났다(Table 3; Fig. 4). 이러한 원인은 수관층이 온전히 남아 있는 ‘피해경’ 지역과 ‘미피해지’의 음영지역과 ‘수관전소’ 지역의 반사값이 유사하여 나타나는 오분류 현상인 것

으로 사료된다. 따라서 정확한 분류를 위해서는 현장 조사에서 얻어진 자료와 위치정보를 트레이닝 지역으로 활용하는 것이 효과적일 수 있다.

3.3. 영덕산불 피해지의 피해강도

영덕 산불피해지의 산불피해 후 NDVI 분석 결과, ‘수관전소’ 구간에서 53.6ha(39.0%), ‘수관열해’ 39.7ha (28.9%), ‘피해중’ 32.3ha(23.5%), ‘피해경’ 10.7ha (7.8%), 그리고 ‘미피해지’에서 1.2ha(0.9%)의 면적분

Fig. 6. Burn severity distribution map by NDVI analysis in Yeongduk fire area.

포를 보여 '수관전소'로 인한 피해가 가장 많은 것으로 나타났다(Table 4; Fig. 5).

영덕산불 피해지의 경우 최대우도법과 최소거리법에서는 비교적 수관전소, 수관열해, 피해중, 피해경 지역을 적절하게 잘 분류하는 것으로 나타났으나, 수관열해와 피해중 지역에서 상호간 오분류가 많이 일어났다(Table 5). 이는 임분 내 열해목과 수관층 일부가 살아있는 수목간에 복잡한 패치를 형성하여 나오는 오분류로 판단된다. 이를 해결하기 위해서는 현장조사시기와 영상획득시기를 산불직후 1개월 내 혹은 3개월 이후로 양분하여 자료획득 및 영상자료를 분석할 필요가

있다. 피해강도 분석결과, 영덕지역의 산불에 의한 전체 피해면적은 137.5ha로 나타났으며, 피해지역의 분류기법에 따른 피해강도 분포 변화는 Fig. 6과 같다.

산림청 통계자료에 의하면 두 지역의 피해면적은 울진산불 168ha, 영덕산불 175.5ha로 최종 보고되었다. 고해상도 위성영상자료를 활용하여 산불피해면적을 분석한 결과는 미피해지를 포함해 울진산불 143.7ha, 영덕산불 133.87ha의 피해를 입은 것으로 분석되었다. 실제 보고된 피해면적과 위성영상자료를 이용하여 분석한 피해면적은 다소 차이는 있지만 비교적 정확한 피해보고가 이루어진 것으로 판단된다.

3.4. 산불피해강도 분석기법 별 정확도 검증

울진과 영덕 대형산불 피해지에 대한 confusion matrix를 이용한 전체정확도와 Kappa coefficient에 의한 분석기법별 정확도 검증 결과는 Table 6과 같았다. Kappa 계수에 의한 분류정확도 검증은 Kappa 계수가 0.8~1.0이면 분류가 최고로 잘 되었음을 의미하며, 0.6~0.8은 분류가 매우 잘 되었으며, 0.4~0.6은 분류가 잘 되었음을 의미한다. 또한 0.2~0.4에 해당하는 계수 값은 분류가 합당하며, 0.0~0.2의 경우는 분류가 불충분하고 0.0 이하는 분류가 아주 나쁨을 의미한다(Ortiz *et al.*, 1997). 본 연구에서 분석한 2개의 대형산불 피해지의 고해상도 위성영상 분석결과를 대체적으로 분류가 잘되었거나 분류가 매우 잘 되었음을 의미하는 것으로 만족할 만한 결과를 보였다. 산불피해지 2지역 모두 최대우도법에서 가장 좋은 분류결과를 보여 현장조사 자료를 훈련지역으로 반영하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 특히 고해상도일수록 분류정확도가 증가하는 경향을 보여 향후 산불피해지 평가를 위해서는 산불규모에 따라 위성영상자료의 선별이 필요하지만 정확한 피해지 평가를 목적으로 한다면 고해상도 영상을 활용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

Table 4. Damage area and burn severity classes by NDVI analysis in Yeongduk fire area
NDVI, Mean = -0.1402, Std. D = 0.0875, N = 54,987

Fire area	Classes	Intervals	Threshold	Count	Area(ha)	% Intervals
Yeongduk	Extreme	$x < \mu - 1/2\delta$	-0.1840	21,452	53.6	39.0%
	High	$\mu - 1/2\delta \leq x < \mu + 1/2\delta$	-0.0964	15,866	39.7	28.9%
	Moderate	$\mu + 1/2\delta \leq x < \mu + 3/2\delta$	-0.0089	12,904	32.3	23.5%
	Low	$\mu + 3/2\delta \leq x < \mu + 5/2\delta$	0.0787	4,279	10.7	7.8%
	Unburned	$\mu + 5/2\delta \leq x$	0.1733	486	1.2	0.9%
Total				54,987	137.5	100.0%

Table 5. Change of burn severity by five classifier in Yeongduk fire area

Classes	NDVI		MLC		MIN		ISODATA		K-means	
	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)	Damage area (ha)	Ratio (%)
Extreme	53.6	39.0	46.5	33.8	54.3	39.5	56.0	40.7	53.4	38.9
High	39.7	28.9	40.4	29.4	30.6	22.2	53.3	38.8	36.4	26.5
Moderate	32.3	23.5	29.3	21.3	30.5	22.2	20.9	15.2	33.2	24.1
Low	10.7	7.8	14.5	10.6	10.8	7.9	5.1	3.7	10.1	7.4
Unburned	1.2	0.9	6.8	4.9	11.2	8.2	2.2	1.6	4.3	3.2
Total	137.5	100.0	137.5	100.0	137.5	100.0	137.5	100	137.5	100.0

Fig. 7. Burn severity distribution map by supervised and unsupervised classification in Yeongduk fire area (from upper-left: MLC, MIN, ISODATA, K-means classification).

Table 6. Result of accuracy verification classified by analytic techniques of burn severity

Fire area	NDVI		MLC		MIN		ISODATA		K-means	
	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa	OA (%)	Kappa
Uljin	84.15	0.7232	85.57	0.7518	79.47	0.6484	49.18	0.2829	12.34	0.0511
Yeongduk	81.90	0.7455	91.19	0.8776	81.90	0.7481	68.23	0.5880	69.57	0.5965
Mean	83.03	0.7343	88.38	0.8147	80.69	0.6983	58.71	0.4355	27.30	0.3238

대형산불 후의 산불피해 평가를 위해 산불피해지의 긴급한 사전평가를 위해서는 상대적으로 간편한 산불피해 후 NDVI 변화량을 이용한 분석기법이 우선적으로 활용될 필요가 있으며, 정밀 피해강도 평가를 위해서는 현장조사 결과를 반영한 최대우도법을 활용한 피해지 평가가 적합할 것으로 판단된다.

3.5. 현장조사와 산불피해강도의 관계

울진과 영덕 2지역을 대상으로 각각 44개 지점을 현장조사 결과와 위성영상의 피해강도 평가 결과를 검증하기 위하여 SPSS19를 이용하여 상관분석을 실시하였다. 상관분석 결과 KCBI와 NDVI의 DN값은 울진 피해지($r = -0.544$, $P < 0.01$)와 영덕피해지($r = -0.616$, $P < 0.01$) 모두 부의 관계로 나타났다(Table 7). NDVI의 DN 값이 클수록 약한 피해강도, 즉 식생이 많이 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 낮은 DN 값은 산불에 의해 식생이 대부분 연소되어 강한 피해강도를 나타냈다. 이러한 결과는 현장에서 측정한 산불피해강도와 위성영상을 이용한 산불피해강도 간에 통계적으로 유의한 관계가 있음을 보여주고 있다. 위성영상 분

Table 7. Correlation between field survey data and SPOT5 image in fire areas

Fire area	Burn severity	Elevation (m)	Slope (%)
Uljin (KCBI)	-0.544**	-0.105	0.156
Yeongduk (KCBI)	-0.616**	-0.169	-0.112

** $P < 0.01$, $n = 44$ (Uljin), $n = 44$ (Yeongduk)

석과 KCBI 현장 평가가 독립적으로 수행된 것을 고려하면 위의 결과는 제안된 KCBI가 산불피해지의 산불피해강도 조사 및 평가에 적용 가능성을 의미한다. 또한 Table 7은 KCBI와 표고와 경사를 포함한 지형과의 상관분석 결과를 보여주고 있는데, 울진과 영덕 지역의 지형은 산불피해강도와 통계적으로 유의한 결과를 보여 주지 않고 있다. 낮은 통계적 유의성 수준에서 전반적으로 표고가 낮은 지역일수록 피해강도가 강한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존 대형 산불을 대상으로 한 연구결과와 일치하고 있다(Lee *et al.*, 2009). 울진지역은 경사가 급한 지역일수록 피해강도도 강한 것으로 나타났지만, 영덕지역은 이외는

Table 8. Confusion matrix between burn severity (BS) classified by field survey data and burn severity (BS) classified by SPOT5

BS classified by field survey		BS classified by SPOT5				Total
		Low	Moderate	High	Extreme	
Uljin	Low	3	-	-	-	3
	Moderate	-	-	2	-	2
	High	-	1	7	1	9
	Extreme	2	4	7	16	29
	Total	5	5	16	17	43
Yeongduk	Low	2	1	1	1	5
	Moderate	3	3	2	1	9
	High	-	2	6	8	16
	Extreme	-	1	4	9	14
	Total	5	7	13	19	44

반대로 경사가 완만한 지역에서 피해강도가 강한 것으로 나타났다. 2000년에 발생한 삼척산불 피해지역을 대상으로 한 Lee *et al.* (2009)의 연구에서는 산불피해강도와 경사와의 관계는 부의 관계를 갖는 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구에서 산불피해강도와 경사와의 관계는 비선형적 관계를 가지며, 산불에 민감한 소나무림의 분포 비율, 그리고 표고에 비해 산불피해강도가 상대적으로 낮은 영향력을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 나타난 울진지역의 일치하지 않는 결과는 경사에 선행하는 기상, 연료, 표고 등과 같은 여타 변수들의 복합적인 영향에 의한 것으로 해석할 수 있다.

현장조사자료와 산불피해강도와와의 관계를 각 지점별로 살펴보면, 울진과 영덕 모두 ‘수관열해(High)’ 지역과 ‘수관전소(Extreme)’ 지역에서 오분류가 가장 많은 것으로 나타났다(Table 8). 울진의 경우 8개, 영덕은 12개로 상대적으로 높았다. 영덕지역은 ‘피해경(Low)’에 가까워질수록 영상과 현장조사에서의 분류가 다른 경우가 많았다. 이것은 피해지의 이격거리와 현장에서의 조사자들의 주관적인 판단의 차이와 영상에서 오분류로 인한 피해강도 등급의 분류상의 문제인 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 2011년 발생한 100ha 이상의 대형산불 피해지 2지역을 대상으로 산불피해강도를 평가하기 위해 현장조사와 SPOT5 영상자료의 분석을 병행하였으며, 영상자료 분석 시 산불피해지역의 피해강도를 가장 적절하게 평가할 수 있는 영상분류기법들을 비교 분석하여 최적의 피해강도 평가방법을 선정하였다.

대형산불 피해지역의 최적의 피해강도 평가기법으로는 현장조사에서 획득한 트레이닝 지역의 정보를 이용한 최대우도법을 적용하였을 때 가장 좋은 결과를 보였다. 대형산불 피해지 2개 지역을 대상으로 최대우도법을 적용하였을 때의 산불피해강도 정확도 검증 결과는 평균 전체정확도 88.38%와 Kappa coefficient 0.8147로 나타나 산불피해강도 평가가 최고로 잘 된 것으로 나타났다. 이는 현장조사 자료를 Training site로 반영한 결과이며, 분류정확도는 최대우도법(MLC), NDVI, 최소거리법(MIN) 순으로 나타났다. 또한 NDVI 분석결과도 피해강도의 상관성이 높아 현장조사

미 수행으로도 신속하게 산불피해지의 피해강도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

따라서 산불직후 사전평가는 NDVI 자료를 우선 활용하고, 정밀 피해강도 평가는 현장조사 결과를 반영한 최대우도법을 적용하여 산불피해지 복구계획 수립을 위한 기초자료로 활용함은 물론 정확한 피해면적과 피해강도의 산출, 연소된 연료량 추정을 통해 산불로 인한 온실가스 배출량 추정(Won, 2008; Won *et al.*, 2012) 등 다양한 분야에서 산불피해지의 평가가 가능해 질것으로 사료된다.

대형산불 피해지 현장조사 결과와 위성영상자료에서 추출한 피해강도(BS)의 상관관계를 분석한 결과, 울진산불 피해지는 $r = -0.544$, 영덕산불 피해지는 $r = -0.616$ 으로 나타났다. 이러한 결과는 2007년 울진 피해지의 검증결과 $r = 0.461$ 보다는 조금 높게 나타났지만(Korea Forest Research Institute, 2008), 2000년 발생한 삼척산불 피해지역($r = 0.832$, $p < 0.01$)의 검증결과(Lee *et al.*, 2009)에 비해 낮은 수준이었다. 이는 산불피해지 지형과 산불크기 등에 따른 차이인 것으로 판단된다. 결론적으로 본 연구결과를 토대로 추후 더 많은 산불피해지에 현장 적용함으로써 산불피해 평가 결과를 검증하고 문제점 보완을 통해 산불피해평가체계가 확립된다면 국내 산불피해지 평가는 보다 정확하고 신속하게 이루어질 수 있을 것이다.

적 요

본 연구는 2011년 100ha 이상의 대형산불 피해지인 울진과 영덕지역을 대상으로 하였으며 산불피해강도를 평가하기 위해 현장조사와 고해상도 위성영상자료 분석을 병행하였다. 위성영상자료 분석 시 산불피해지역의 피해강도를 가장 적절하게 평가할 수 있는 영상분류기법들을 비교 분석하여 최적의 피해강도 평가방법을 선정하였다. 대형산불 피해지역의 최적의 피해강도 평가기법으로는 현장조사에서 획득한 트레이닝 지역의 정보를 이용한 최대우도법을 적용하였을 때 가장 좋은 평가결과를 보였다. 산불피해강도의 정확도 검증 결과, 평균 전체정확도는 88.38%와 Kappa coefficient는 0.8147로 나타났다. 분류정확도는 최대우도법, NDVI, 최소거리법 순으로 나타났다. 산불피해강도 현장조사 결과와 위성영상자료에서 추출한 피해강도의 상관관계는 울진산불 피해지에서 $r = -0.544$, 영

덕산불 피해지는 $r = -0.616$ 으로 나타났다.

REFERENCES

- 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.
- Cocke, A. E., P. Z. 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**(2), 189-198.
- Duffy, D. A., J. Epting, J. M. Graham, T. S. Rupp, and A. D. McGuire, 2007: Analysis of Alaskan burn severity patterns using remotely sensed data. *International Journal of Wildland Fire* **16**(3), 277-284.
- Hammill, K. A., and R. A. Bradstock, 2006: Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: influence of vegetation type and inferring fire intensity. *International Journal of Wildland Fire* **15**(2), 213-226.
- Jensen J. R., 2000: *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resources Perspective* (2nd ed.) Prentice Hall, NJ, USA. 204p.
- Key, C. H., and N. C. Benson, 2002: Fire effects monitoring and inventory protocol-landscape assessment. USDA Forest Service Fire Science Laboratory, Missoula, MT. 1-16.
- Key, C. H., and N. C. Benson, 2006: Landscape Assessment. In 'FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System'. Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., Gangi, L.J. eds. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, pp. LA-1-55. (Fort Collins, CO)
- Korea Forest Research Institute, 2008: The field survey manual for surveying ecosystem change at the forest fire area. Research report 340. (In Korean)
- Korea Forest Service, 2013: The annual report of forest fire statistics in 2012. (In Korean)
- Lee, H. J., J. M. Lee, M. S. Won, and S. W. Lee, 2012: Development and validation of Korean composite burn index (KCBI). *Journal of Korean Forest Society* **101**(1), 163-174. (In Korean with English abstract)
- Lee, S. W., M. B. Lee, Y. G. Lee, M. S. Won, J. J. Kim, and S. K. Hong, 2009: Relationship between landscape structure and burn severity at the landscape and class levels in Samchuck, South Korea. *Forest Ecology and Management* **258**, 1594-1604.
- Lentile, L. B., Z. A. Holden, A. M. S. Smith, M. J. Falkowski, A. T. Hudak, 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**, 319-345.
- Morgan, P., C. C. Hardy, T. Swetnam, M. G. Rollins, and L. G. Long, 2001: Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire* **10**(3), 329-342.
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, 2007: A quantitative analysis of severity classification and burn severity for the large forest fire areas using normalized burn ratio of Landsat imagery. *The Korean Association of Geographic Information Studies* **10**(3), 80-92. (in Korean with English abstract)
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, and Y. M. Son, 2008: Estimation of non-CO₂ greenhouse gases emissions from biomass burning in the Samcheok large-fire area using Landsat TM imagery. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 17-24. (in Korean with English abstract)
- Won, M. S., K. S. Koo, M. B. Lee, W. K. Lee, and K. Y. Kang, 2012: Estimation of Non-CO₂ GHGs Emissions by Analyzing Burn Severity in the Samcheok Fire, South Korea. *Journal of mountain science* **9**(6), 731-741.
- National wildfire coordinating group, 2005: Glossary of wildland fire terminology. US National Wildfire coordination Group Report. PMS-205, Ogden, UT.
- Ortiz, M. J., Formaggio, A. R., and Epiphano, J. C. N., 1997: Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS and historical database. *International Journal of Remote Sensing* **18**, 95-105.
- Roy, D. P., L. Boschetti and S. N. Trigg, 2006: Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **3**(1), 12-116.
- 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**(3), 397-408.