

로지스틱 회귀모형을 이용한 수관화확산확률식의 개발

유계선¹ · 이병두^{1*} · 원명수¹ · 김경하¹

Development of Crown Fire Propagation Probability Equation Using Logistic Regression Model

Gye-Sun RYU¹ · Byung-Doo LEE^{1*} · Myoung-Soo WON¹ · Kyong-Ha KIM¹

요 약

수관화는 대형산불의 주된 확산유형으로 빠른 확산속도와 높은 산불강도의 특성을 보이며 많은 피해를 입힌다. 이 연구에서는 수관화 피해를 사전에 예측하기 위해서 수관전소 피해를 입은 지역의 지형·임상·기상 특성을 분석하여 수관화확산확률식을 개발하였다. 영덕·울진·고령·예천에서 일어난 4개의 산불피해지를 대상으로 하였으며, 총 18개의 공간 변수를 구축한 뒤 기타연소지에 대한 수관전소지의 비를 이용하여 각 변수별 구간 가중치를 구하고 로지스틱 회귀모형을 이용하여 변수와의 상관계수를 산출하였다. 그 결과, 수관화확산확률은 임상이 침엽수림일 때, 250m 이상에서 고도가 높아질수록, 기복이 심할수록, 사면향은 남서 또는 남동사면일 경우, 능선일수록, 일사량이 많아질수록 높게 나타났다. 고도와 경사가 낮은 곳에서는 교란현상이 많이 나타나 일정한 패턴을 보이지 않았다. 이 확률식을 통해 수관화 위험지를 사전에 분석할 수 있고, 산불방지 숲 가꾸기 지역 선정 및 진화 우선 지역 선정 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

주요어 : 산불, 수관화, 산불위험, 산불지도

ABSTRACT

Crown fire, the main propagation type of large forest fire, has caused extreme damage with the fast spread rate and the high flame intensity. In this paper, we developed the probability equation to predict the crown fires using the spatial features of topography, fuel and weather in damaged area by crown fire. Eighteen variables were collected and then classified by burn severity utilizing geographic information system and remote sensing. Crown fire ratio and logistic regression model were used to select related variables and to estimate the weights for the classes of each variables. As a results, elevation, forest type, elevation relief ratio, folded aspect, plan

2013년 9월 5일 접수 Received on September 5, 2013 / 2013년 11월 27일 수정 Revised on November 27, 2013 / 2014년 3월 7일 심사완료 Accepted on March 7, 2014

1 국립산림과학원 산림방재연구과 Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

* Corresponding Author E-mail : byungdoo@forest.go.kr

curvature and solar insolation were related to the crown fire propagation. The crown fire propagation probability equation may can be applied to the priority setting of fuel treatment and suppression resources allocation for forest fire.

KEYWORDS : Forest Fire, Crown Fire, Forest Fire Risk, Forest Fire Map

서 론

최근 한반도의 평균기온 상승과 강우일수 감소로 인한 가뭄기간의 증가(NIER, 2011), 그리고 탈 수 있는 연료가 되는 임목의 다량 축적 등은 기상과 연료 측면에서 산불에 대한 위험이 과거보다 증가하고 있다는 것을 보여준다. 최근 발생했던 대형산불인 2000년 동해안산불과 2005년 양양낙산사산불, 2013년 포항산불 등은 넓은 면적의 산림뿐만 아니라 역사적으로 의미 있는 문화재, 도심지에 사는 주민들에게도 막대한 피해를 끼쳤다. 이러한 맥락에서 특정 지점에서 발생한 산불이 얼마나 큰 피해를 남길 것인가를 예측하는 연구의 중요성은 더욱 커지고 있다.

전 세계적으로는 2003년 호주 캔버라 산불, 2007년 그리스와 미국 캘리포니아 산불, 2009년 호주 빅토리아 산불, 2013년 인도네시아 산불 등 2000년 이후 그 피해의 규모와 범위(the scale and scope of impacts)를 예측하기 어려운 대형산불이 보다 빈번하게 발생하고 있다(Tedim *et al.*, 2013; Williams, 2013). 대형산불(Mega-fire)이라는 용어는 미국에서 당시 최악의 산불 시점으로 기록되었던 2002년 이후 대중화되어 사용되고 있으며(Williams *et al.*, 2011), 많은 경우 연료가 끝나는 지점이나, 강우에 의해서 산불이 진화되는 등 사람의 노력으로는 진화가 어렵다는 공통점을 보여준다(Tedim *et al.*, 2013). 수치적으로는, 미국의 경우 전체 산불 발생 건수의 1~2%에 해당하는 대형산불이 전체 산불진화 비용의 85%를 차지하며, 전체 피해면적의 95% 이상을 차지할 만큼 전체 예산지출 및 피해면적이 단일

대형산불에 의해 주도되고 있다(Williams *et al.*, 2011). 이는 대형산불에 대한 사전 예측과 대비가 무엇보다 선행되어야 함을 보여준다.

이처럼 사회·문화·경제뿐만 아니라 생태적으로도 많은 피해와 교란을 일으키는 산불은 기본적으로 지형·기상·연료의 상호작용에 의해서 발생 및 확산된다(Pyne *et al.*, 1996). 일반적으로 불이 발생하는 원리와 마찬가지로 산불이 발생되나, 산불에서는 탈 수 있는 물질, 즉 연료의 상태가 중요하다. 탈 수 있는 연료가 존재하더라도 습기를 많이 머금고 있으면 불이 붙을 가능성은 낮다. 지형적으로는 물이 많이 모일 수 있는 장소, 또는 햇볕이 들지 않아 습한 곳에서는 산불이 발생하기 어려우며, 반대로 지형적으로 습하지는 않지만, 강수가 며칠 연속해서 내린 곳에서는 당분간 산불이 발생하기 어렵다. 또한 경사가 급하고 바람이 강하게 불어온다면 강한 속도로 산불이 확산된다. 이처럼 산불은 지형과 기상·연료의 종류 및 상태에 따라 그 발생과 확산을 달리한다. 만약 각각의 요소가 산불 확산에 어떠한 영향을 미치는지 정량화 할 수 있다면 보다 산불을 효과적으로 관리할 수 있을 것이다. 이러한 맥락에서 산불 분야에서는 지형·기상·연료의 세 요소를 이용하여 산불의 발생 및 확산위험확률(Hessburg *et al.*, 2007; Dillon *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012), 연료처리에 따른 위험도 변화(Bessie and Johnson, 1995) 등 산불위험을 예측하고 저감하려는 다각도의 노력을 하고 있다.

최근 위성 영상을 이용한 산불피해지 분류 연구는 지형·기상·연료인자가 산불피해강도(burn severity)에 어떠한 영향을 미치는지 보다 잘 연구할 수 있도록 돕고 있다. Key and Benson(2002)은 산불 전후로 획득한 위성 영상의 정규탄화지수(NBR)의 차이, Chafer *et*

al.(2004)은 정규식생지수(NDVI)의 차이를 이용한 산불피해강도 분류법을 고안하여 산불 피해도를 정량화하였다. Won(2013)는 산불피해지 현장에서 수집된 평가지수 및 위치정보를 근거로 위성 영상의 분석 결과와 비교·검증할 수 있는 산불피해강도 평가지수(Korean Composite Burn Index, KCBI)를 고안하였다. 산불피해강도 평가지수는 식생의 하층·중층·상층의 피해도를 측정하여 점수화하는 방법으로, 점수 구간에 따른 등급 분류 및 현장의 위치정보를 이용한 위성영상의 분류가 가능하다. Won(2013)의 분류방법에 따르면, 수관이 타서 잎사귀가 떨어져 없는 상태인 수관전소(Extreme), 열에 의해 노랗게 변한 상태인 수관열해(High), 수관보다는 지표층의 피해가 우세한 피해중(Moderate), 지표층의 피해만 존재하는 피해경(Low), 피해를 입지 않은 미피해지(Unburn)의 5등급으로 산불피해지역을 구분할 수 있다.

한편 산불의 확산은 태우는 연료의 위치에 따라 지표화, 지중화, 수간화, 수관화로 구분되는데, Rothermel(1991)은 이 중 수관화(crown fire)로 확산될 경우에 가장 빠르고 강렬하다고 하였다. 수관화는 나무의 수관으로 산불이 전이, 또는 확산 되어가는 형태를 말한다. 이는 지표 연료만을 태우는 지표화에 비해서 보다 많은 열(heat)을 발생시키며, 열 기둥(heat column)이 높아서 주변의 가연 물질을 보다 빠르게 연소시킬 수 있다. 또한 비화(fire brand)로 발전될 가능성도 높기 때문에, 수관화 전이 및 확산 가능성이 높은 곳이 밀집되어 있는 곳이 대형산불로 커질 가능성 또한 높다고 할 수 있다.

본 연구에서는 과거 산불시 수관화 확산으로 인하여 극심한 수관전소 피해를 입은 지역의 지형·기상·연료인자의 공간 데이터를 구축하여 피해도와의 상관성을 도출함으로써, 수관화로 진행될 수 있는 가능성을 예측하는 수관화 확산확률식을 구하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 수관화확산을 예측하기 위한 방법으로 과거 피해지의 수관전소비를 이용하여, 수관전소비란 기타연소지(수관전소지를 제외한 산불피해지)에 대한 수관전소지의 면적비(ratio)로서, 산불피해를 입은 지역의 지형과 기상·연료에 해당하는 공간 변수를 구축하고, 각 변수 구간별로 대비가 되는 두 요소(수관전소와 기타연소)의 비를 이용하여 가중치를 결정하는 방법을 이용하였다.

먼저 산불 피해를 입은 지역을 대상으로 산불피해강도(burn severity)를 분석한 뒤, 피해강도가 가장 높은 수관전소에 해당하는 셀의 변수 구간별 기타연소지에 대한 수관전소비를 구하여 구간별 가중치를 분석하였고, 이를 바탕으로 로지스틱 회귀모형을 이용해 변수별 회귀계수를 산출하여 수관화확산확률식을 도출하였다(그림 1).

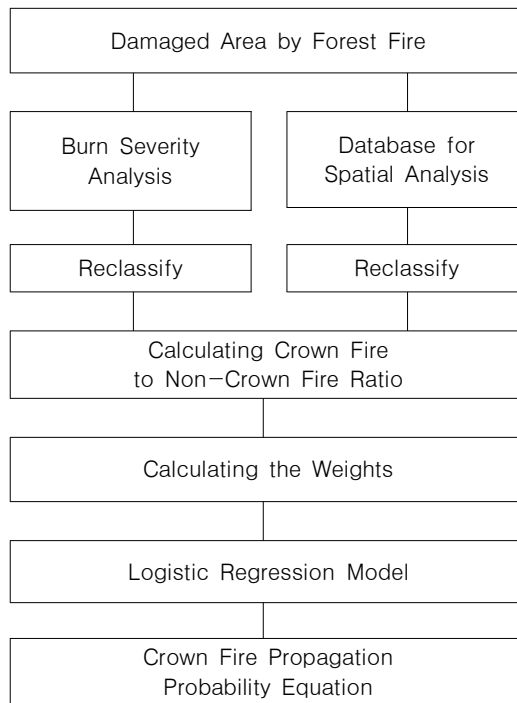


FIGURE 1. Research process

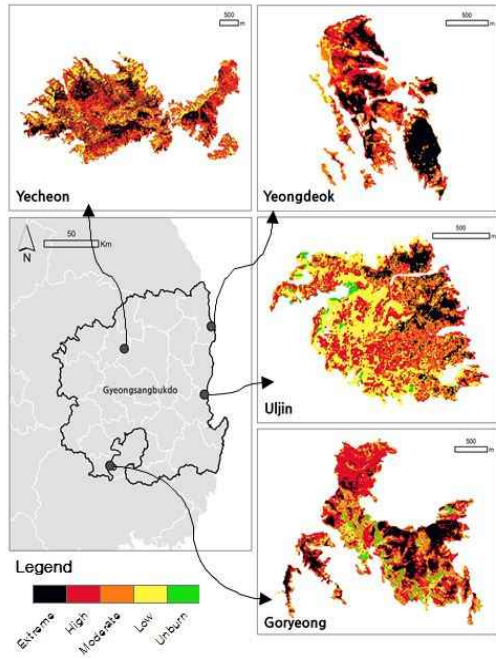


FIGURE 2. Study sites

1. 산불피해강도 분류 방법 및 연구 지역

산불피해강도는 Won(2013)의 산불피해강도 평가지수를 이용하여, 수집한 현장의 피해도와 좌표값을 기준으로 감독분류인 최대우도법(Maximum Likelihood)을 적용하여 위성영상 분류를 하였다. 즉, 수관전소·수관열해·피해중·피해경·미피해지 5단계의 트레이닝 데이터를 확보하여 감독분류를 하였으며, 이를 수관전소지만의 특성을 분류하기 위해 수관전소지

와 기타연소지의 2단계로 재분류하였다.

연구대상 산불은 자료 획득이 상대적으로 용이하며 동 시기의 데이터를 다량 확보할 수 있었던 2011년 4월 산불을 대상으로 하였다. 경상북도는 경사가 급한 산지가 많으며 봄철 건조한 바람이 자주 발생하여 산불이 빈번히 발생한다. 특히 2011년 봄철에는 경상북도의 산불 피해가 많았으며, 이 중에서 상대적으로 넓은 면적의 피해를 입은 영덕·울진·고령·예천의 산불을 연구대상으로 하였다(그림 2). 획득한 위성영상 및 산불에 관한 정보는 표 1에서 보는 바와 같다.

2. 예측변수의 선정

수관화를 예측하기 위한 변수로 산불발생 및 전이, 확산에 영향을 미치는 것으로 알려진 지형·임상·기상 인자에서 각각 10개, 4개, 4개의 변수를 선정하여, 총 18개의 공간데이터를 구축하였다(표 2).

연료인자는 총 4개를 구축하였으며, 산불의 연료 역할을 하는 임분을 설명해주는 요소로서 먼저, 임상(forest type)은 4차 임상도를 이용하여 침엽수림·활엽수림·혼효림·미입목지의 4종류로 구분하였다. 수관화는 정유물질 함유하고 있는 소나무 등 침엽수림에서 많이 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 다른 인자에 비해서 가장 높은 설명력을 나타낼 것으로 예상된다(Ormeno *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011a). 수관단위체적당 탈 수 있는 수관층의 연료를 의미하는 수관연료밀도(crown bulk

TABLE 1. Basic statistics for forest fire

Ignition	Suppression	Fire	Cause	Satellite image
2011.04.01.12:25	2011.04.02.09:25	Yecheon	Agricultural activity	2011.04.12. (Rapid eye, 5m)
2011.03.30.15:05	2011.04.02.10:00	Uljin	Mountain visitor	2011.04.15. (SPOT-5, 5m)
2011.04.01.21:10	2011.04.02.09:25	Yeongdeok	Waste burning	2011.04.15. (SPOT-5, 5m)
2011.03.30.15:55	2011.03.31.12:50	Goryeong	Welding a shed	2011.04.12. (Rapid eye, 5m)

TABLE 2. Dependent variables for crown fire propagation probability equation

	Variables	Reference
Fuel	Forest type(4type)	Korea Forest Service
	Crown bulk density	Kim <i>et al.</i> , 2011b.
	Crown base height	Kim <i>et al.</i> , 2011b.
	Crown fuel load	Kim <i>et al.</i> , 2011b.
Weather	Heat load Index	McCune and Keon, 2002.
	Solar radiation	National Institute of Meteorological Research, Feb. to Apr., 1998–2008. Cell size 4km
	Solar insolation	Fu and Rich, 2002. Feb. to Apr., 2011. Unit=WH/m ²
	Wind speed	National Institute of Meteorological Research, Cell size 1km
Topography	Aspect	Using DEM, Cell size 10m
	Slope	Using DEM, Cell size 10m
	Slope cosine aspect	Stage, 1976. slope*cosine(aspect)
	Slope sine aspect	Stage, 1976. slope*sine(aspect)
	Folded aspect	McCune and Keon, 2002. 180- aspect-225
	Elevation	Using DEM, Cell size 10m
	Elevation relief ratio	Matt, 2008. 3×3 cell. (mean-min)/(max-min)
	Curvature	Using DEM, Cell size 10m
Plan curvature	Using DEM, Cell size 10m	
Profile curvature	Using DEM, Cell size 10m	

density, kg/m³)와 수관연료량(crown fuel load, ton/ha), 지표층에서 수관층까지의 높이인 수관 높이(crown base height)등은 수관화로의 가능성과 정도를 측정할 수 있는 요소로 여겨진다 (Sando and Wick, 1972; Mutch *et al.*, 1993). 수관연료량과 수관연료밀도는 Kim *et al.*(2011b)이 제시한 흉고직경(D)를 이용한 대수회귀식(수관연료량 $\ln Wt = \beta_0 + \beta_1 \ln D$, 수관 부위별로 적용)과 수관연료량을 수관의 체적으로 나누는 공식을 사용하였다.

기상인자는 총 4개로, 이 중 일사량은 식생의 건조도에 영향을 미쳐 산불이 쉽게 발화·확산되도록 돕는다. 단위면적당 얼마나 많은 양의 열을 받는지를 계산하기 위해 McCune and Keon(2002)의 HLI(heat load index)와 Fu and Rich(2002)의 일사량(solar insolation), 그리고 국립기상연구소(National Institute of Meteorological Research, NIMR)에서 획득한 태양력 지도(solar radiation) 등 일사량과 관련된 총 3개의 자료를 생성하여 가장 상관성이 높은 계산방법을 이용하기로 하였다.

바람은 산불의 확산속도 및 방향, 비화를 설명해주는 가장 설득력 있는 요소로 고려된다 (Sardoy *et al.*, 2007; Koo *et al.*, 2010). 본 연구에서는 국립기상연구소에서 획득한 풍력 지도(wind speed)의 2~4월 평균값을 이용하였다. 이외에 가뭄지수 및 상대습도 등도 산불과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으나 (Hessburg *et al.*, 2007; Holden *et al.*, 2009), 본 연구에서는 피해지 분석에 적합한 형태로 데이터를 구축하기가 어려워 제외되었다.

지형인자는 산불 이전의 숲의 연료 및 미기 후에 영향을 주며, 나아가 산불이 일어나면 산불의 강도와 진행방향에 영향을 주기에(Pyne *et al.*, 1996) 대형산불을 예측하는 또 다른 중요 인자로 인식된다. 기존 산불피해 예측 문헌에서 언급된 변수들 및 지형구분에 사용되는 여러 변수들을 참고로 하여, 사면향(aspect)·사면경사(slope)·고도(elevation)·사면곡률(curvature)·횡단곡률(plan curvature)·종단곡률(profile curvature) 외에 사면경사에 사면향의 영향을 곱한 Stage(1976)의 꼬싸인 경사

향(slope cosine aspect)과 싸인 경사향(slope sine aspect), NE-SW축을 중심으로 양측이 같은 값을 지니도록 변환한 McCune and Keon(2002)의 변환 사면향(folded aspect), Matt *et al.*(2008)의 상대적인 고도차를 구하는 기복률(elevation relief ratio) 등 총 10개의 변수를 구축하였다.

공간분석에 사용된 데이터는 모두 10×10m 해상도로 구축하였으며, DEM은 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도의 등고선을 이용하여 구축하였다. 국립기상연구소에서 획득한 2개의 자료는 기상관측장비의 양적 한계로 각각 1km(풍력), 4km(태양력)의 해상도로 구축되었다.

3. 변수별 가중치 분석 및 모형 검증

각 인자의 구간별 예측률을 구하기 위해 변수를 각각 몇 개의 구간으로 분류하였다. 임상은 침엽수, 활엽수, 혼효림, 그리고 미입목지의 4구간으로 분류하였으며, 고도는 50~100m 단위로, 기복률은 0.4~0.6 사이에 대부분의 지역이 포함되기 때문에 그 사이 값을 동간으로 구분하였다. 방위 관련 인자(aspect, folded aspect)는 8방위로 구분하였으며, 수관연료밀도·수관높이·수관연료량·HLI·일사량·싸인 경사향·코싸인 경사향·사면곡률·횡단곡률·종단곡률 등은 각 구간이 동일한 빈도수를 갖도록 Quantile 분류를 이용하였다.

수관전소비는 변수의 각 구간에서의 기타연소지(b)에 대한 수관전소지(a)의 비(a/b)를 지

도대수를 이용하여 계산하였다. 전체 구간의 평균과 표준편차를 이용하여 구간별 수관전소비를 표준화하였으며, 다시 0~100의 값을 지니도록 변환하였다. 이러한 계산을 통해서 나타난 수관전소비는 그 값이 높을수록 구간의 수관화확산확률이 높다고 할 수 있다. 마지막으로 최종 변수별 상관계수는 로지스틱 회귀모형을 이용하였다. 통계 분석은 SAS 9.1.3의 로지스틱 회귀분석 절차를 이용하여 진행하였고, 변수 선택이 용이하도록 5% 유의수준에서 stepwise 방법을 이용하였다. 이러한 방법으로 변수 및 변수 구간별 가중치를 분석을 하여 최종 수관화확산확률식을 도출하였다. 또한 포항(2010)과 서산(2012) 산불피해지를 연구대상지와 같은 방법으로 산불피해도를 분류한 뒤, 도출된 식을 적용한 결과와 비교함으로써 검증을 진행하였다.

결과 및 고찰

1. 산불피해강도 분류 결과

Won(2013)의 분류 방법을 이용하여 선정된 4개 지역의 산불피해강도를 5단계로 분류한 뒤, 가장 극심한 피해를 입은 수관전소지의 특성을 구명하기 위하여 다시 수관전소지와 기타피해지로 분류한 결과는 그림 3 및 표 3과 같다.

예천이 수관전소지 199.5ha, 기타연소지 671.9ha, 총 871.5ha로 가장 피해면적이 넓은 것으로 분석되었다. 수관전소비율은 영덕

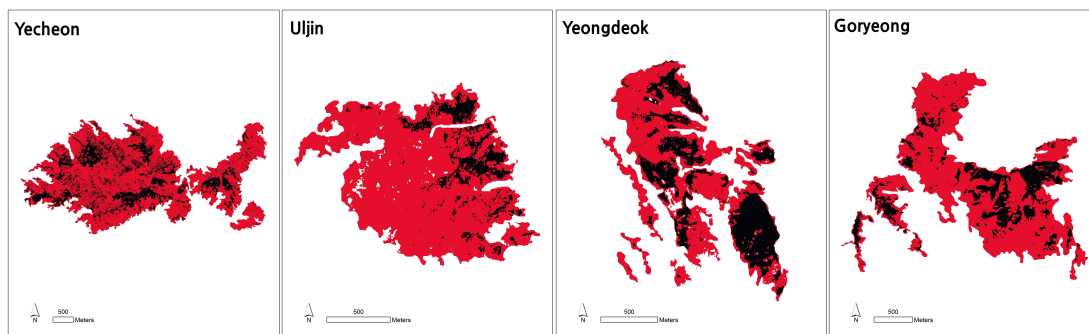


FIGURE 3. Result of fire severity classification(black: crown fire, red: non-crown fire)

TABLE 3. Descriptive statistics of fire severity classification

unit : ha(%)

Forest fire	Crown fire		Non-Crown fire		Total
Yecheon	199.5	(22.9%)	671.9	(77.1%)	871.5
Uijin	16.7	(11.6%)	127.0	(88.4%)	143.7
Yeongdeok	46.9	(35.1%)	86.9	(64.9%)	133.8
Goryeong	60.9	(21.0%)	229.3	(79.0%)	290.2

35.1%, 예천 22.9%, 고령 21.0%, 울진 11.6%로, 평균 22.6%의 수관전소율을 보였다. 영덕은 전체 연소면적에 비해서 수관전소 비율이 가장 높게 나타나고 있으며, 반면 울진은 전체 대상지역 중에서 가장 적은 수관전소 면적과 비율을 보이고 있다.

2. 예측변수 구간별 수관전소비 및 로지스틱 회귀분석 결과

18개 변수의 구간별 수관전소비와 그에 의한 가중치를 구한 결과는 표 4와 같으며, 이를 토대로 로지스틱 회귀분석을 한 결과 채택된 변수는 표 5와 같다. 연료인자 1개, 기상인자 1개, 지형인자 6개로 총 8개의 변수가 선정되었다.

연료인자 중에서는 임상만이 선택 되었으며, 침엽수림>혼효림>미입목지>활엽수림 순으로 가중치가 결정되었다. 예상대로 침엽수림의 영향이 크게 나타났으며, 그 다음으로 혼효림이 나타났다. 한편 활엽수림 보다는 오히려 미입목지가 높게 분석되었다. 이는 활엽수림 자체의 연료가 적고, 미입목지에 대한 연료 관리가 제대로 이루어지지 않아 연소물질이 많이 분포하기 때문으로 추정된다. 한편 수관연료량·수관연료 밀도·수관높이 등은 채택되지 않았으나, 이는 데이터 구축시 사용되었던 4차 임상도의 해상도 문제로 사료되기에, 보다 정밀한 임상데이터의 확보가 필요하다. 하지만 이를 위해 획득한 5차 임상도에는 울진과 영덕의 DB구축 시기가 산불피해 시기보다 뒤늦어 산불피해지로 반영됨에 따라 적용이 불가능하였다.

기상인자 중에서는 Fu and Rich(2002)의 방법으로 구한 일사량(solar insolation)이 선택되었으며, 일사량이 높은 구간에서의 수관전

소율이 높지만 전 구간에 걸쳐 비례하지는 않는다. 1~2구간 즉, 저 일사량군에서는 지형 및 임상 등 다른 요소의 영향으로 변이가 발생하는 것으로 파악된다. 다른 기상인자는 채택되지 않았는데, 이는 산불피해지는 좁은 공간에서도 변이가 다양하게 나타나므로 10m 단위로 분석이 진행되었으나, 기상인자는 최소 1km 단위로 구축되어 그 패턴을 분석하는 데 한계가 있는 것으로 판단된다. HLI는 10m 단위로 구축되었으나 최종 채택되지 못하였다.

지형인자는 총 10개 중에서 사면향·코짜인 경사향·사면곡률·종단곡률을 제외하고 나머지 6개의 변수가 선정되었으나, 사면경사와 싸인 경사향 등 사면의 기울기를 반영한 변수의 회귀계수는 낮게 분석되었다.

가장 높은 결정력을 지닌 변수는 고도와 기복률로, 고도(elevation)는 250~500m 구간에서는 고도에 비례하여 수관전소비가 높아지며, 500m 이상에서는 고도에 반비례하는데 이는 침엽수림의 분포와 연관이 있는 것으로 사료되어 추가 분석이 요구된다. 한편, Holden *et al.*(2009)의 연구결과에서는 고도에 비례하여 피해가 극심한 지역의 면적이 계속적으로 증가한다. 0~250m 구간에서는 특정한 방향성이 나타나지 않았으며, 이는 다른 요소들에 의해서 교란이 발생한 것으로 사료된다.

상대적인 고도 차를 계산한 기복률(elevation relief ratio)도 높은 설명력을 지닌 것으로 나타났으며, 구간별로는 기복률이 클수록 수관전소비도 높게 나타났다. 변환 사면향(folded aspect)은 남동 또는 남서 사면에서의 수관전소비가 높으며, 북사면에 가까울수록 수관전소비는 작아진다. 횡단곡률(plan curvature) 또한 값이 높아질수록 그에 비례하

TABLE 4. Range and weights of each dependent variable for crown fire propagation probability equation

Variables			Variables		
Range	Ratio	Weights	Range	Ratio	Weights
Forest type			Slope sine aspect		
coniferous	1.258	100	< -24	1.170	90
mixed	0.910	68	-24 - -16	1.001	25
Deciduous	0.155	0	-16 - -8	0.955	7
others	0.506	32	-8 - 0	0.936	0
Crown bulk density			0 - 8	0.960	9
< 0.19	0.8	55	8 - 16	0.974	15
0.19-0.24	1.5	100	16 - 24	1.014	30
0.24-0.40	1.4	90	> 24	1.195	100
Crown base height			Slope cosine aspect		
< 3.460	0.837	58	< -24	1.174	93
3.46-4.16	1.456	100	-24 - -16	1.004	30
4.16-5.22	1.345	92	-16 - -8	0.943	7
5.22-6.81	0.000	0	-8 - 0	0.973	18
> 6.81	0.498	34	0 - 8	1.014	33
Crown fuel load			8 - 16	0.925	0
< 2718.60	0.838	55	16 - 24	0.970	17
2718.60-7797.55	1.535	100	> 24	1.192	100
7797.55-16510.19	1.375	90	Curvature		
Heat load Index			< -3.00	0.703	0
< 0.55	0.975	22	-3.00 - -1.50	0.862	30
0.55-0.65	0.953	0	-1.50 - -0.75	0.943	46
0.65-0.76	1.051	100	-0.75 - 0.50	0.964	50
0.76-0.86	1.018	67	0.00 - 0.75	1.032	63
> 0.86	0.993	41	0.75 - 1.50	1.110	78
Solar insolation			1.50 - 3.00	1.139	83
< 181032	1.033	48	> 3.00	1.226	100
181032-220257	0.777	15	Plan curvature		
220257-254252	0.662	0	< -3.00	0.678	0
254252-286940	0.742	10	-3.00 - -1.50	0.809	20
286940-320935	0.972	40	-1.50 - -0.75	0.882	31
> 320935	1.438	100	-0.75 - 0.50	0.967	44
Aspect			0.00 - 0.75	1.025	53
0 - 45	0.827	16	0.75 - 1.50	1.116	67
45 - 90	0.747	6	1.50 - 3.00	1.151	72
90 - 135	1.042	44	> 3.00	1.331	100
135 - 180	1.462	100	Profile curvature		
180 - 225	1.332	83	< -3.00	1.162	100
225 - 270	1.096	52	-3.00 - -1.50	1.113	90
270 - 315	0.850	19	-1.50 - -0.75	1.065	81
315 - 360	0.705	0	-0.75 - 0.50	1.059	80
Folded aspect			0.00 - 0.75	1.005	69
0.0 - 22.5	0.743	0	0.75 - 1.50	0.935	55
22.5 - 45.0	0.813	13	1.50 - 3.00	0.832	35
45.0 - 67.5	0.889	27	> 3.00	0.653	0
67.5 - 90.0	0.919	33	Elevation		
90.0 - 112.5	1.066	60	0 - 50	0.663	39
112.5 - 135.0	1.280	100	50 - 100	0.958	57
135.0 - 157.5	1.229	91	100 - 150	0.702	42
157.5 - 180.0	1.179	81	150 - 200	0.844	50
Slope			200 - 250	0.891	53
0 - 5	1.089	69	250 - 300	1.038	62
5 - 10	0.860	22	300 - 400	1.333	79
10 - 15	0.751	0	400 - 500	1.685	100
15 - 20	0.791	8	500 - 600	0.555	33
20 - 25	0.843	19	600 - 700	0.399	24
25 - 30	0.980	47	> 700	0.000	0
< 30	1.240	100	Elevation relief ratio		
			< 0.40	0.376	0
			0.40 - 0.45	0.739	32
			0.45 - 0.50	0.972	53
			0.50 - 0.55	1.086	63
			0.55 - 0.60	1.147	68
			> 0.60	1.511	100

TABLE 5. Result of logistic regression model for crown fire propagation probability equation

	Estimate	Standard error	Wald chi-square	Pr > Chisq
Intercept	-3.5135	0.1669	443.4316	<.0001
Elevation	0.0158	0.0014	128.0506	<.0001
Plan curvature	0.0045	0.0010	19.2352	<.0001
Elevation relief ratio	0.0107	0.0010	111.2945	<.0001
Folded aspect	0.0050	0.0007	53.5175	<.0001
Slope	0.0022	0.0006	11.2590	0.0008
Slope sine aspect	0.0018	0.0006	7.2687	0.0070
Solar insolation	0.0024	0.0006	15.2045	<.0001
Forest type	0.0150	0.0013	137.9679	<.0001

여 높아진다. 즉, 능선에 가까울수록 수관전소비가 높아지는 것으로 분석되었다. 이는 Lee *et al.*(2008)의 연구결과에서도 산지능선에서의 산불피해도가 높다는 것을 증명한 바 있다.

사면경사(slope)는 15도 이상에서 경사에 비례해 높아지는데, 이는 Holden *et al.*(2009)의 연구결과에서도 16도 이상의 경사에서 산불피해도가 높은 것으로 분석되었다. 한편, 15도 이하의 경사에서는 오히려 낮을수록 피해도가 높다. 고도와 마찬가지로 낮은 고도 및 경사에서는 다른 요인들에 의해 결정적인 패턴이 나타나지 않는 것으로 해석하는 것이 바람직하다.

한편, 일반적으로 많이 적용되는 사면경사(slope)보다 기복률(elevation relief ratio)의 설명력이 높게 나타난 것으로 미루어볼 때, 인접한 DEM의 사면경사를 바로 이용하는 것보다는 주변의 평균 및 최소, 최대 고도를 고려한 상대적인 비를 활용하는 것이 산불의 확산 또는 피해를 예측하는 데 보다 적합한 것으로 사료된다.

싸인 경사향(Slope sine aspect)은 같은 경사라 할지라도 사면향이 서쪽일 때 보다는 동쪽일 때 더 많은 피해를 입고, 경사가 약할 때 이런 경향이 더 강하게 나타나며, 경사가 심해지면 상대적으로 그 차이는 크지 않다. 싸인 값보다는

코사인 값에 의한 즉, 동서보다는 남북 사면에서의 전소비 차이가 클 것이라 예상하였지만, 남북 사면에서는 일정한 패턴이 나오지 않았다.

결과적으로 일정 고도 이상일 때, 즉 250m 이상에서 높아질수록 수관전소 확률이 높으며, 임상은 침엽수림일 때, 기복이 심할수록, 또한 사면향은 남서 또는 남동 사면일 경우, 능선일수록, 일사량이 많을수록, 사면경사가 15도 이상에서 높아질수록, 낮은 경사에서는 동쪽 사면일 경우에 수관전소비율이 높은 것으로 해석된다. 대체적으로 낮은 고도와 경사를 보이는 곳에서는 교란현상이 많이 나타나 일정한 패턴을 보이지 않는다.

로지스틱 회귀분석 결과 선정된 변수의 회귀계수는 고도 > 임상 > 기복률 > 변환 사면향 > 횡단곡률 > 일사량 > 사면경사 > 싸인 경사향의 순으로 분석되었다. 이를 통해, 일정 고도 이상에서 현재 분포하고 있는 연료가 수관화확산 확률을 가장 잘 설명해주며, 산불의 확산 및 연료 분포에 영향을 주는 기복률 등의 지형요인, 다음으로 연료의 건조 상태 순으로 수관전소에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 역으로, 연료가 건조되어 있을 때에는 기복이 큰 능선을 타고 수관화확산이 주도되며, 이는 침엽수림

TABLE 6. Crown fire propagation probability equation for other forest fire

Forest fire	Crown fire	Non-crown fire
Pohang	0.60	0.49
Susan	0.54	0.52

이 분포되어 있는 지역에서만 나타난다고 할 수 있다. 그렇기 때문에 Lee *et al.*(2002)의 연구 결과처럼, 임상 연속성이 높고, 사면장이 길수록 더욱 더 큰 규모의 산불이 일어나게 되는 것으로 판단할 수 있다.

3. 수관화확산확률식의 검증

로지스틱 회귀분석을 통해 도출된 수관화확산확률식을 검증하기 위해, 2010년 포항과 2012년 서산에서 일어난 산불피해지의 위성영상 분류 결과에 대입한 결과는 표 6과 같다. 포항의 수관전소지는 평균 0.60, 기타 연소지는 평균 0.49의 수관화확산확률을 보였으며, 서산의 수관전소지는 평균 0.54, 기타 연소지는 평균 0.52로 분석되었다. 수관전소지의 확률이 두 지역 모두 높게 분석되었다. 포항의 수관화확산확률이 보다 높게 나타났으며, 서산의 경우에는 확연한 차이가 드러나지 않았다. 이는 연구대상지와 포항이 지리적으로 비슷한 환경의 근거리에 위치하고 있으나, 서산과는 먼 거리이기 때문에 예측률이 낮게 나왔을 가능성이 있다. 이는 향후 보다 많은 산불 피해지를 대상으로 데이터를 수집하여 그 경향성을 파악할 필요가 있으며 이를 통해 정확도를 개선할 수 있을 것이다.

결론

본 연구에서는 대형산불로 변질 위험이 잠재되어 있는 지역을 선별할 수 있는 방안의 하나로써 수관화확산확률식을 개발하였다. 2011년 산불 피해를 입은 예천·울진·영덕·고령 산불을 대상으로 총 18개의 예측 변수를 생성하여 각 변수 구간별로 수관전소비를 이용하여 구간 가중치를 구하였고, 이를 토대로 로지스틱 회귀분석을 실시하여 각 변수의 회귀계수를 구하였다. 분석 결과, 고도·임상·기복률의 설명력이 높았으며, 연료가 일단 건조한 조건에 놓일 경우 기복이 큰 능선의 침엽수림을 따라 수관화확산이 이루어지는 것으로 분석되었다. 연료 변수의 경우, 데이터의 한계로 임상을 제외

한 다른 변수는 채택되지 않았기에 앞으로 연료를 세밀하고도 다양하게 표현할 수 있는 보다 많은 방법을 개발해야 할 것으로 사료된다. 한편, 사면경사(slope)보다는 기복률(elevation relief ratio)의 설명력이 높아 향후 산불확산 및 피해예측 분야에 적용시 예측력을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 현재 경상북도에 한정되어 있는 산불피해지의 범위를 넓히고, 보다 많은 피해지와 고해상도의 기상 및 연료 자료를 이용한다면 정확도를 개선할 수 있을 것이다. 한편 전국 풍속 및 침엽수림의 임상 연속성 자료에 개선된 수관화확산확률식을 적용한다면 대형산불 위험지를 예측할 수 있을 것이며, 이는 연료저감을 위해 실시하는 산불방지 숲가꾸기 지역 선정 및 진화자원 배치에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 국립산림과학원 리서치 펠로우십의 지원에 의해 이루어진 것임. [KAGIS](#)

REFERENCES

- Bessie, W.C. and E.A. Johnson. 1995. The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forest. *Ecology* 76:747-762.
- Chafer, C.J., M. Noonan and E. Mcnaught. 2004. The post-fire measurement of fire severity and intensity in the christmas 2001 Sydney wildfires. *International Journal of Wildland Fire* 13:227-240.
- Dillin, G.K., Z.A. Holden, P. Morgan, M.A. Crimmins, E.K. Heyerdahl and C.H. Luce. 2011. Both topography and climate affected forest and woodland burn severity in two regions of the western US, 1984 to 2006. *Ecosphere*

- 2(12):1-33.
- Fu, P. and P.M. Rich. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture* 37:25-35.
- Hessburg, P.F., K.M. Reynolds, R.E. Keane, K.M. James and R.B. Salter. 2007. Evaluating wildland fire danger and prioritizing vegetation and fuels treatments. *Forest Ecology and Management* 247(2007):1-17.
- Holden, Z.A., P. Morgan and J.S. Evans. 2009. A predictive model of burn severity based on 20-year satellite-inferred burn severity data in a large southwestern US wilderness area. *Forest Ecology and Management* 258: 2399-2406.
- Key, C.H. and Benson, N.C. 2002. Fire effects monitoring and inventory protocol-landscape assessment. USDA Forest Service Fire Science Laboratory, Missoula, MT. pp.1-16.
- Kim, S.Y., B.D. Lee, Y.O. Seo, M.N. Jang and Y.G. Lee. 2011a. Effects of forest tending work on the crown fuel characteristics of pinus densiflora S. et Z. stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 100(3):359-366 (김성용, 이병두, 서연옥, 장미나, 이영진. 2011a. 숲 가꾸기 사업이 소나무림의 수관연료특성에 미치는 영향. *한국임학회지* 100(3):359-366).
- Kim S.Y., B.D. Lee, Y.O. Seo and Y.G. Lee. 2011b. Crown fuel characteristics and allometric equations of pinus densiflora stands in Youngju region. *Journal of Korean Forest Society* 100(2):266-272 (김성용, 이병두, 서연옥, 이영진. 2011b. 영주지역 소나무림의 수관 연료특성 및 수관연료량 추정. *한국임학회지* 100(2):266-272).
- Koo, E., P.J. Pagni, D.R. Weise and J.P. Woycheese. 2010. Firebrands and spotting ignition in large-scale fires. *International Journal of Wildland Fire* 2010(19):818-843.
- Lee, B.D., G.S. Ryu, S.Y. Kim and K.H. Kim. 2012. Development of forest fire occurrence probability model using logistic regression. *Journal of Korean Forest Society* 101(1):1-6 (이병두, 유계선, 김선영, 김경하. 2012. 로지스틱 회귀모형을 이용한 산불발생확률모형 개발. *한국임학회지* 101(1):1-6).
- Lee, B.D., M.S. Won, K.M. Jang and M.B. Lee. 2008. Analysis of the relationship between landform and forest fire severity. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(1):58-67 (이병두, 원명수, 장광민, 이명보. 2008. 지형과 산불피해도와의 관계 분석. *한국지리정보학회지* 11(1):58-67).
- Lee, S.Y., Y.S. Kang, S.H. An and J.S. Oh. 2002. Characteristic analysis of forest fire burned area using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 5(1):20-26 (이시영, 강용석, 안상현, 오정수. 2002. GIS를 이용한 산불피해지역 특성분석. *한국지리정보학회지* 5(1):20-26).
- Matt D.R. 2008. Constraining the altitudinal range of sub-horizontal denudation surfaces in Wales, U.K., using the elevation relief ratio. *Revista Geografica Academica* 2(2):26-40.

- McCune B. and K. Dylan. 2002. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science* 13:603-606.
- 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 Mountain: a management strategy for fire-adapted ecosystems. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GTR-310, pp.14.
- NIER(National Institute of Environmental Research). 2011. A report of the climate change in Korea 2010 (국립환경과학원. 2011. 한국 기후변화 평가 보고서 2010).
- Ormeno E., B. Cespedes, I.A. Sanchez, A. Velasco-Garcia, J.M. Moreno, C. Fernandez and V. Baldy. 2009. The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management* 257(2009): 471-482.
- Pyne, S.J., Patricia L. Andrews and Richard D. Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons, INC, pp.49.
- Rothermel, R.C. 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-RP-438, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, pp.46.
- 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, pp.10.
- Sardoy, N., C. Jean-Louis, B. Porterie and A.C. Fernandez-Pello. 2007. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame* 150(2007):151-169.
- Stage, A.R. 1976. An expression for the effect of aspect, slope, and habitat type on tree growth. *Forest Science* 22:457-460.
- Tedim, F., R. Remelgado, D. Borges, S. Carvalho and Joao Martins. 2012. Exploring the occurrence of mega-fires in Portugal. *Forest Ecology and Management* 294(2013):86-96.
- Williams, J. 2011. Findings and implications from a coarse-scale global assessment of recent selected mega-fires. 5th International Wildland Fire Conference Sun City, South Africa, May 9-13, 2011, 19pp.
- Williams, J. 2012. Exploring the onset of high-impact mega-fires through a forest land management prism. *Forest Ecology and Management* 294(2013):4-10.
- Won, M.S. 2013. Analysis of burn severity in large-fire area using satellite imagery. Ph.D. Thesis, Univ. of Korea, Seoul, Korea. 113pp (원명수. 2013. 위성영상을 이용한 대형산불지역의 피해강도 분석 연구. 고려대학교 대학원 박사학위 논문. 113쪽). 