

봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형 개발

원명수* · 장근창 · 윤석희

국립산림과학원 기후변화생태연구과

(2018년 2월 28일 접수; 2018년 10월 22일 수정; 2018년 12월 19일 수락)

Development of the National Integrated Daily Weather Index (DWI) Model to Calculate Forest Fire Danger Rating in the Spring and Fall

Myoungsoo Won*, Keunchang Jang and Sukhee Yoon

Division of Forest Ecology and Climate Change, National Institute of Forest Science, 57 hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-712, Korea

(Received February 28, 2018; Revised October 22, 2018; Accepted December 19, 2018)

ABSTRACT

Most of fires were human-caused fires in Korea, but meteorological factors are also big contributors to fire behavior and its spread. Thus, meteorological factors as well as topographical and forest factors were considered in the fire danger rating systems. This study aims to develop an advanced national integrated daily weather index(DWI) using weather data in the spring and fall to support forest fire prevention strategy in South Korea. DWI represents the meteorological characteristics, such as humidity (relative and effective), temperature and wind speed, and we integrated nine logistic regression models of the past into one national model. One national integrated model of the spring and fall is respectively $[1+\exp\{-(2.706+(0.088*T_{mean})-(0.055*Rh)-(0.023*Eh)-(0.014*W_{mean}))\}^{-1}]^{-1}$, $[1+\exp\{-(1.099+(0.117*T_{mean})-(0.069*Rh)-(0.182*W_{mean}))\}^{-1}]^{-1}$ and all weather variables significantly ($p<0.01$) affected the probability of forest fire occurrence in the overall regions. The accuracy of the model in the spring and fall is respectively 71.7% and 86.9%. One integrated national model showed 10% higher accuracy than nine logistic regression models when it is applied weather data with 66 random sampling in forest fire event days. These findings would be necessary for the policy makers in the Republic of Korea for the prevention of forest fires.

Key words: Forest fire, Forest fire danger rating, National Integrated Daily Weather Index (DWI), Logistic regression model



* Corresponding Author : Myoungsoo Won
(forestfire@korea.kr)

I. 서 론

최근 이상 기후 현상으로 인하여 봄철 가뭄이 심해져 산불위험시기이 앞당겨지고, 기후변화로 인한 상대 습도 감소, 기온 상승, 산불 기간의 강수량 감소로 인해 산불위험은 증대되는 추세이다. 따라서 봄철 건조기에 발생하는 산불로 인한 국가적인 피해를 최소화하고 산불을 효율적이고 체계적으로 관리하는 것이 필요하다. 우리나라는 최근 20년간 연평균 448건의 산불이 발생하였다. 이 중 85%에 해당하는 산불이 1월~5월 건조기에 발생하고 있다. 또한 봄철은 대륙성 계절풍으로 인해 강풍을 동반한 건조한 바람의 영향으로 전국에 동시 다발적인 산불이 많이 발생한다. 가을철은 봄철과 마찬가지로 이동성 고기압이 자주 나타나지만 강풍과 건조한 정도는 봄철에 비해 덜한 것이 특징이다(KMA, 2004). 이러한 계절적 특성으로 인해 우리나라에서는 가을철보다는 봄철에 더 많은 산불이 발생하고 대형산불이 잦다. 따라서 봄철과 가을철 기상특성을 반영한 산불발생확률 모형을 필요로 한다.

정부는 국가위기관리 기본지침에 따라 2005년 1월 1일부터 모든 위기상황을 ‘관심→주의→경계→심각’의 4단계로 표준화해 대응하고 있다. 2004년 9월 대통령훈령으로 제정된 국가위기관리 기본지침에 규정된 위기상황의 4단계 구분 및 대응조치가 2005년부터 본격 시행됨에 따라 정부는 각 단계의 경보색상을 제일 낮은 단계인 ‘관심’은 청색, ‘주의’는 황색, ‘경계’는 오렌지색, ‘심각’은 적색으로 통일하였다(KFRI, 2007).

산불연구 분야의 선진국이라 할 수 있는 미국과 캐나다에서도 기상변화와 숲의 환경조건에 따라 산불의 발생과 확산 등 위험 정도를 예측하여 예보하는 시스템을 오래 전부터 개발하여 운영하고 있다. 미국은 산림청(US Forest Service, USFS)에서 산불평가시스템(Wildland Fire Assessment System, WFAS)을(<https://www.wfas.net>), 캐나다 산림청(Canadian Forest Service, CFS)에서는 산불정보시스템(Canadian Wildland Fire Information System, CWFIS)을 통해 전지역에 산불위험을 예보하고 있다(<http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/home>).

국내에는 국립산림과학원에서 2003년부터 개발하여 운영하고 있는 산불위험예보시스템(<http://forestfire.nifos.go.kr>)은 시군구별 실시간 산불위험정보를 인터넷을 통하여 전국에 인터넷으로 서비스해 오고 있다. 산불위험예보시스템의 자동화로 인하여 국가차원의 산불 대항화 방지 및 산불피해를 최소화하는데 크게

기여하고 있다. 또한 지자체 산불담당자가 실시간으로 산불위험정보를 모니터링 함으로써 산불감시 인력 및 진화자원을 효율적으로 배치하여 산불피해를 저감하는데 중요한 역할을 담당해 왔다. 그러나 기후변화에 따라 과거 20년 동안의 산불발생 패턴이 크게 변화됨에 따라 현재 진행되고 있는 기후변화에 대응하기 위한 산불발생확률모형의 개선이 필요한 시점이 되었다. Won *et al.*(2016)은 우리나라의 산불발생확률 변화의 주원인인 기상변화와 산불발생과의 관련성을 구명하기 위하여 1991년부터 2010년까지의 전국 기상대의 일별 기상자료들(기온, 습도, 운량, 풍속, 강우량, 강우 후 경과일 등) 중 유의성이 높은 4개의 기상인자(최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속)만을 추출하여 최근의 기후변화를 반영한 산불발생위험예측모형을 개발한 바 있다. 국립산림과학원에서는 2012년부터 과거 2000년대의 기후변화 패턴을 고려하여 국가산불위험예보시스템을 고도화하였다. 현재 운영되고 있는 산불위험예보시스템은 ①2000년대 기후변화를 반영한 권역별 산불발생 알고리즘을 개발하여 적용하였으며, ②전국 76개 기상관측소의 실시간 기상현황을 5km 격자의 초단기 실태자료와 72시간 후까지 예측할 수 있는 동네예보 정밀기상자료를 활용하여 기상에 의한 산불발생확률을 계산하고, ③대면적의 소나무림 분포 지역과 건조현상과 강풍 등 악기상을 고려하여 대형산불위험 사전 예보제를 최초로 도입하여 자동화하여 전국에 실시간으로 서비스하고 있다. 이러한 산불위험예보 분석 결과들은 스마트폰을 이용하여 전국 어디서나 검색이 가능하도록 웹 서비스(<http://forestfire.nifos.go.kr/mobile>) 하고 있다.

Won *et al.*(2016)은 기후변화에 따른 1990년대와 2000년대의 봄철 산불발생 패턴이 크게 변화됨에 따라 현재 진행되고 있는 기후변화에 대응하기 위해 제 주도를 포함하여 전국을 9개 광역시도로 구분하여 산불발생확률모형의 변화를 비교하고, 2000년대 이후의 산불발생확률모형을 적용함으로써 우리나라에서의 기후변화로 인한 산불발생 변화를 산불위험예보시스템에 반영한 바 있다. 이들 연구는 한반도 평균 기후장 분포가 권역별로 기온, 습도, 풍속 등 기상변수의 변동에 따라 산불발생확률을 증가시킨다는 선행연구들(Lee *et al.*, 2004; Won *et al.*, 2006; Won *et al.*, 2010a; 2010b; Sung *et al.*, 2010)을 근거로 기상에 의한 산불발생확률 모형을 개발한 사례이다. 하지만 이들은 광역시도별 서로 다른 산불발생확률모형으로 인해

행정 경계 지역에서 산불위험지수와 위험등급(관심-주의-경계-심각 4단계)의 차이가 발생하여 광역자치단체와 기초자치단체간의 혼선을 유발할 수 있고, 인접 시군 경계지역에서의 산불 위험등급의 차이로 인해 산불 대응력이 떨어질 수 있다는 문제점이 제기된 바 있다. 다시 말해서 기존 개발한 산불위험예보시스템은 제주도를 포함하여 9개의 도별 산불발생확률모형이 개별로 존재하여 행정경계에서 산불위험등급이 단절되는 문제점이 존재하였다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 과거 9개 광역시도로 구분하였던 기상에 의한 산불발생확률 모형을 1개로 통합하여 산불대응력 강화와 산불담당자들의 혼선을 줄이고자 하였다.

따라서 본 연구는 9개의 독립된 산불발생확률모형을 산불발생위험이 높은 봄철과 가을철의 기상변화에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형으로 개선하여 효율적인 산불예방 업무를 지원하고자 한다.

II. 연구자료 및 방법

2.1. 분석자료

본 연구에서는 통계분석에 필요한 산불발생 지점의 기상자료 수집을 위해 봄철과 가을철의 기준을 산불이 많이 발생하는 시기로 국한하였다. 봄철은 1월부터 6월까지로, 가을철은 9월부터 12월까지로 구분하여 통계분석에 활용하였다. 봄철과 가을철에 대한 산불발생 추정모형의 종속변수인 산불발생 현황자료는 Table 1과 같이 2000년부터 2010년까지의 11년간 전국의 산불발생 통계를 이용하였다(<http://www.forest.go.kr>). 산불 비발생일의 자료는 산불조심기간 내의 자료로 국한하여 봄철은 2, 3, 4월만 적용하였으며, 가을철은 11월과 12월만 적용하여 통계분석에 활용하였다. 11년간 봄철 발생현황을 살펴보면 총 4,719건이 발생하였으며, 경상북도 지역의 발생건수가 938건(19.9%)으로 가장 높았으며, 다음으로 경기도 768건(16.3%), 경상

남도 740건(15.7%) 순으로 나타났다. 가을철은 11년 동안 총 772건의 산불 중 경상남도에서 209건(27.1%)이 발생하여 가장 높은 비율을 차지하였고, 경상북도 169건(21.9%), 강원도 127건(16.5%) 순으로 나타났다. 독립변수(설명변수)인 해당지역의 시간대별 기상변수는 크게 기온(평균, 최고, 최저), 상대습도(평균, 최소), 실효습도, 풍속(평균, 최대, 순간최대)을 이용하였으며, 실효습도(實效濕度)는 당일과 전일들의 상대습도에 가중치를 적용하여 얻어지는 평균습도로, 본 연구에서는 적용한 실효습도는 식(2)와 같이 당일의 평균상대습도를 포함하여 5일간의 평균상대습도의 누적치를 이용하였으며, 실효습도 계수는 0.7을 사용하였다(Hong, 1987).

$$He = \frac{H_0 + r(H_1) + r^2(H_2) + r^3(H_3) + r^4(H_4)}{1 + r + r^2 + r^3 + r^4} \quad (1)$$

He: The effective humidity, *H₀*: The average relative humidity of the day, *H_n*: The average relative humidity of days prior, *r*: Effective humidity coefficient(0.7)

2.2. 연구방법

특정일의 산불발생확률모형은 산불발생과 연관성이 높다고 규명된 시계열 기상자료(Won *et al.*, 2006; 2010; 2016)와 산불발생의 유무를 나타내는 더미변수(dummy variables)를 이용하여 개발하였다. 산불발생의 유무인 더미변수는 종속변수(dependent variable)로, 산불발생과 영향이 있는 기상요소들을 독립변수(independent variable)로 하여 로지스틱 회귀모형(logistic regression model) 변수들을 적용하여 산불발생확률을 추정(식1)하였다(Won *et al.*, 2010; 2016).

Table 1. The statistics of forest fire occurrences during the spring season (January to June) and the fall season (September to December) from 2000 to 2010

Class	Year											Total
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Spring	653 (13.8%)	693 (14.7%)	554 (11.7%)	229 (4.9%)	472 (10.0%)	430 (9.1%)	341 (7.2%)	392 (8.3%)	275 (5.8%)	487 (10.3%)	193 (4.1%)	4,719 (100%)
Fall	75 (9.7%)	92 (11.9%)	43 (5.6%)	42 (5.4%)	66 (8.5%)	83 (10.8%)	64 (8.3%)	26 (3.4%)	112 (14.5%)	80 (10.4%)	89 (11.5%)	772 (100%)

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_j X_j)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_j X_j)} \quad (2)$$

$P = 0$ (in case there is no forest fire) or 1 (in case forest fire occurs)

X_j = weather variables related forest fire (i.e. X_1 , X_2 , $X_3 \dots$ is respectively temperature, humidity, wind speed etc.)

본 연구에서는 우리나라 전역을 하나로 통합할 수 있는 봄철과 가을철의 기상변화에 따른 실시간 산불위험지수(daily weather index, DWI)를 개발하기 위해 산불발생과 관련이 있는 시간대별 기온(평균, 최고, 최저), 상대습도(평균, 최소), 실효습도, 풍속(평균, 최대, 순간최대) 등 9개 기상인자를 이용하였다. 분석에 이용된 기상자료는 기상청에서 관측하는 자동기상관측장비(AWS)의 기후정보를 활용하였으며 기상 데이터 베이스는 산림청에서 보유한 연도별 산불통계 대장의 발생위치 지번정보를 활용하여 산불발생지점과 가장 가까운 기상관측소의 해당시간대의 기상정보를 추출하여 통계분석에 활용하였다. 9개 기상변수들 중 산불발생에 기여하는 주요 변수들을 선택하기 위해 Stepwise 회귀분석의 후진선택법을 통해 99% 신뢰도에서 유의성이 있는 기상변수만을 선정하였다.

다음으로 과거 11년간의 봄철과 가을철에 발생한 산불발화점을 대상으로 인근 기상관측소의 시간대별 기상자료를 독립변수로 하고, 산불발생 유무(산불발생 1, 비발생 0)를 종속변수로 설정한 후 기상변화에 따라 산불발생 가능성을 추정할 수 있는 로지스틱 회귀모형을 적용하여 통계적으로 유의한 산불발생확률모형을 개발하였다. 본 논문에서는 봄철과 가을철의 전국 통합 산불발생확률 모형이 얼마나 예측력이 뛰어난가를 검토하기 위하여 2000년부터 2010년까지의 분석에 이용된 시계열 기상인자를 추정모형에 대입하여 산불발생확률들을 계산하는 사후검정을 실시하였다. 마지막으로 사후검정으로 예측된 과거의 전국 산불발생확률 예측치들을 이용하여 기상에 의한 산불위험지수를 설정하였다. 산불위험지수는 산불발생확률 모형에 대입하여 얻어진 최종 예측치를 이용하여 10% 구간별 백분위수를 등급화하여 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형 추정결과

본 연구에서 봄철 산불발생에 영향을 주는 기상변수로는 산불이 발생한 해당시간대의 1시간 평균기온, 1시간 평균 상대습도, 1시간 평균풍속과 실효습도였으며, 가을철은 1시간 평균기온, 1시간 상대습도, 1시간 평균풍속으로 나타났으며 모두 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 상대습도와 실효습도는 봄철과 가을철 모두 음(-)의 상관을 보여 습도가 낮아질수록 산불발생확률이 높아지고, 평균기온의 경우에는 정(+)의 상관으로 기온이 상승할수록 산불발생확률이 높아지는 것으로 나타났다. 반면 평균풍속과 산불발생확률의 관계는 음(-)의 상관을 보여 바람이 강하다고 해서 산불발생위험이 높아지지는 않는 것으로 나타났다. 이러한 전국 통합 모형의 결과는 Won *et al.*(2016)이 제시한 9개 권역의 산불발생확률모형들 중 강원도, 전라남도, 충청남도, 제주도 권역의 추정모형에서 나타난 평균풍속의 증가에 따라 산불발생위험도 함께 증가하는 것과는 다른 결과이다. 즉, 산불은 산림과 대기가 건조한 상태에서 미풍에도 발화 가능성이 높아질 수 있다는 것을 의미하며 강풍은 산불발생 후 대형화 요인으로 작용할 수 있다. 이는 건조계절에는 높은 기온과 건조현상에 따라 산불발생확률이 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 추정모형의 적합도는 χ^2 -값과 표본내 예측력 비율(percent of right prediction)로 검토할 수 있는데, 이는 실제 관측된 산불발생과 추정된 산불발생의 확률이 서로 일치하는 비율을 계산한 것으로서 모형 적합도에 대한 일종의 측정지표로서 의미를 갖는다. 전국 통합 모형 추정결과 χ^2 -값은 봄철과 가을철 각각 1,914.255와 102.502로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 봄철과 가을철 각각 71.7%와 86.9%로 나타나 모형의 적합도는 매우 높은 것으로 나타났다(Table 2).

따라서 우리나라에서 산불이 가장 많이 발생하는 건조계절인 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형은 Table 3과 같다.

Table 2. The estimation of national integrated daily weather index (DWI) model by logistic regression analysis

Variables	Spring			Fall		
	Coefficient	Std. E	Wald-value ^{a)}	Coefficient	Std. E	Wald-value ^{a)}
Mean Temperature	.088**	.003	709.906	.117**	.007	268.469
Relative humidity	-.055**	.003	460.631	-.069**	.004	374.845
Effective humidity	-.023**	.004	35.237	-	-	-
Mean wind speed	-.104**	.017	35.077	-.182**	.036	25.610
Constant	2.706**	.140	372.091	1.099**	.231	22.740
N ^{b)}	10,964			5,904		
-2 Log likelihood	12,104.020			4,011.676		
χ^2 -value	1,914.255**			102.502**		
% predict value	71.7			86.9		

a) The Wald-value is square of the t-value.

b) When two or more forest fires occurred on a specific day, sample size of forest fire was increased by the number of occurrences.

** p<0.01

Table 3. National integrated daily weather index (DWI) model to calculate the forest fire danger rating by Spring and Fall (T_{mean} : average temperature, Eh : effective humidity, Rh : relative humidity, W_{mean} : average wind speed)

Season	Model (Pr)
Spring	$[1+\exp\{-(2.706+(0.088*T_{\text{mean}})-(0.055*Rh)-(0.023*Eh)-(0.014*W_{\text{mean}}))\}]^{-1}$
Fall	$[1+\exp\{-(1.099+(0.117*T_{\text{mean}})-(0.069*Rh)-(0.182*W_{\text{mean}}))\}]^{-1}$

3.2. 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률모형의 개발

3.1.을 통해 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형을 개발하였다. 개발된 전국 통합 산불발생확률 모형이 얼마나 예측력이 뛰어난가를 검토하기 위하여 분석에 이용된 시계열 기상인자를 추정모형에 대입하여 추정된 확률들을 산불발생일과 비발생일로 구분하여 모형의 정확성과 신뢰성을 검정하였다. 그 결과는 Table 4와 같다. 실제로 산불이 발생한 날들의 평균 산불발생확률이 산불이 발생하지 않은 날들의 산불발생확률보다도 통계적으로 높다는 것이

99% 신뢰수준에서 유의성이 있는 것으로 확인되었다. 실제로 산불이 발생한 날의 확률이 실제로 산불이 발생하지 않았던 날보다 추정 예측값이 높다는 것을 확인할 수 있다.

앞에서 과거 11년간(2000-2010년) 봄철(1,2,3,4,5,6월)과 가을철(9, 10, 11, 12월)에 발생한 산불발화지점의 기상자료를 이용한 산불발생확률 모형이 효과적으로 산불발생위험을 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 여기에서는 전국 통합 산불발생확률모형에서 사후검정으로 예측된 과거의 산불발생확률 예측치를 이용하여 산불위험지수를 설정하였다. 산불위험지수의 설

Table 4. Verifying confidence of the national integrated daily weather index(DWI) model by spring and fall

Event	Spring					Fall				
	N	Mean	Std. D	t-value	p-value	N	Mean	Std. D	t-value	p-value
Non-fire	6,225	0.328	0.208			5,126	0.117	0.100		
Fire	4,739	0.569	0.218	58.507	0.00**	778	0.228	0.141	21.028	0.00**
Total	10,964					5,904				

** p<0.01

정은 과거 11년간의 봄철과 가을철의 기상자료를 전국 통합 확률모형에 대입하여 얻어진 확률들의 총 예측치를 이용하여 10% 구간별 백분위수를 추정하고 해당 예측 확률구간을 지수화 하여 설정하였다. 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. The probability interval of the national integrated daily weather index(DWI) model by spring and fall

Interval ratio	DWI	Estimated probability interval	
		Spring	Fall
10%	1	[.0000 ~ .1183]	[.0000 ~ .0265]
20%	2	[.1184 ~ .1878]	[.0266 ~ .0409]
30%	3	[.1879 ~ .2571]	[.0410 ~ .0575]
40%	4	[.2572 ~ .3320]	[.0576 ~ .0750]
50%	5	[.3321 ~ .4089]	[.0751 ~ .0968]
60%	6	[.4090 ~ .4932]	[.0969 ~ .1258]
70%	7	[.4933 ~ .5861]	[.1259 ~ .1601]
80%	8	[.5862 ~ .6862]	[.1602 ~ .2072]
90%	9	[.6863 ~ .7820]	[.2073 ~ .2859]
100%	10	[.7820 ~ 1.000]	[.2860 ~ 1.000]

Table 5에서 설정한 DWI의 확률구간을 전국 통합 산불발생확률모형으로 산출한 산불발생일과 비발생일의 산불위험지수 예측치에 적용하여 봄철과 가을철의 기상에 의한 산불위험지수를 산출하였다(Fig. 1 and Fig. 2). 산불위험지수 산출 시 DWI 확률구간에 10을 곱하여 1부터 100까지 정수값을 갖도록 하였다. 실제로 산불이 발생한 날들의 DWI는 높은 반면, 실제

로 산불이 발생하지 않은 날의 DWI는 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 DWI가 산불발생의 위험도를 매우 잘 예측할 수 있는 모형이라는 것을 의미한다. 즉, 전국 통합 모형은 산불이 가장 많이 발생하는 봄철의 경우 DWI가 상승할수록 산불이 발생하는 날이 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다. 우리나라 기상특성으로 인해 봄철에 비해 산불발생 빈도가 적은 가을철의 경우 DWI가 상승하더라도 봄철에 비해 산불이 발생하는 날이 심하게 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 전국 통합 모형을 적용한 산불위험예보 개선 결과

본 연구를 통해 개발된 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형으로부터 예측된 결과는 Fig 3과 Fig. 4와 같다. Fig. 3은 제주도를 포함한 광역시도별 9개 모형을 적용하여 예측한 결과이며, Fig. 4는 행정경계에서 발생하는 산불위험지수의 차이를 1개의 전국 통합 모형을 적용하여 재산출한 예측 결과이다. Fig. 4에서 보듯이 1개의 전국 통합 모형을 적용할 경우 인접 행정경계에서 발생하는 위험등급의 차이를 해소하여 산불조심기간 중 발효되는 산불위험 단계별 조치사항의 이행에 혼란을 피할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 문제점 개선에 따른 산불위험예측 결과의 검증은 위해 2014년 산불이 가장 많이 발생한 날을 대상으로 산불이 발생한 지역의 산불위험지수를 평가하였다. 모형의 평가를 위해 3월 5일(산불 12건), 3월 11일(산불 13건), 4월 6일(산불 17건), 4월 8일(산불 13건), 4월 15일(산불 11건) 발생한 산불 66건을 표본

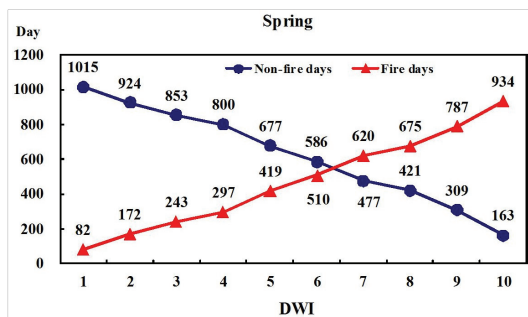


Fig. 1. DWI frequency of the forest fire occurrence and non-fire of the national integrated model by spring weather.

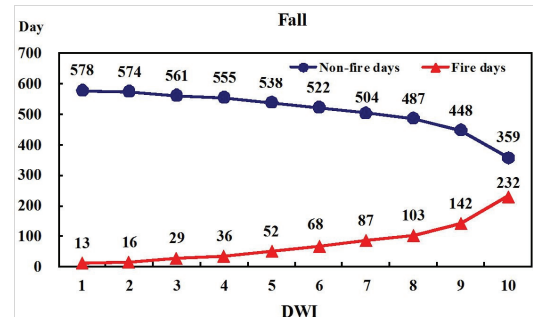


Fig. 2. DWI frequency of the forest fire occurrence and non-fire of the national integrated model by fall weather.

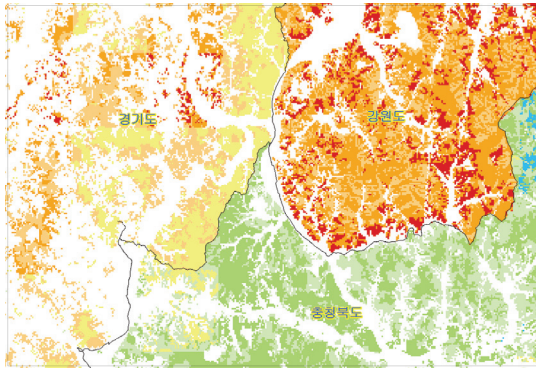


Fig 3. The result of forest fire danger rating by 9 daily weather index (DWI). Forest fire danger rating index multiply DWI by 10.

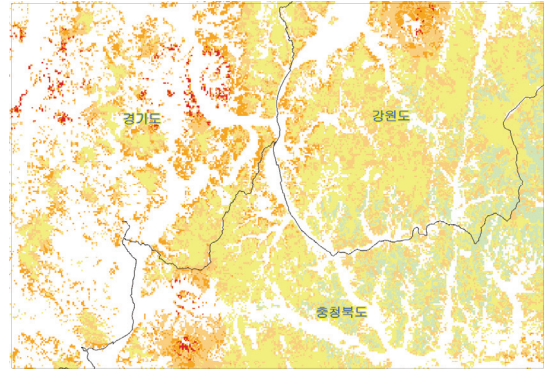


Fig 4. The result of forest fire danger rating by national integrated daily weather index (DWI). Forest fire danger rating index multiply DWI by 10.

을 대상으로 하였다. 이후 개선 전과 후의 산불발생확률 모형을 통해 예측한 지수를 비교하여 실제 산불이 발생한 지역 대비 산불위험지수의 정확도를 평가하였다. 정확도 평가 결과, 주의 단계인 산불위험지수 51 이상으로 예측된 지역에서 실제로 산불이 발생한 비율은 기존 9개 모형에서 74.2% (산불 49건), 새롭게 개발한 전국 통합 모형에서는 84.8% (산불 56건)가 발생하여 약 10%의 정확도 향상을 보였다(Table 6). Fig. 5는 과거 9개 광역시도별 산불발생확률모형과 문제점 개선을 위해 새롭게 개발한 전국 통합 산불발생확률모형을 이용하여 2014년 4월 6일 13시 30분 발표된 기상자료를 이용하여 예측한 전국 산불위험등급의 차이를 나타내는 예시 자료이다.

Table 6. The result of forest fire danger rating index between nine models and one national integrated model at the 66 forest fire ignition points

Forest fire danger rating index	9 model (Before)		Integrated model (After)	
	Fire	Ratio (%)	Fire	Ratio (%)
Low (Less than 51)	17	25.8	10	15.2
Moderate (51-65)	24	36.4	30	45.5
High (66-85)	24	36.4	24	36.4
Very high (81 or more)	1	1.5	2	3.0
Total	66	100.0	66	100.0

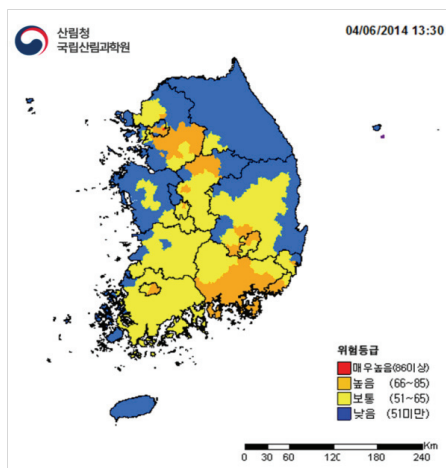
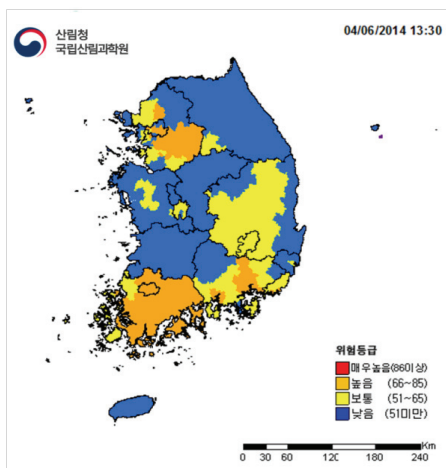


Fig. 5. The comparison of forest fire danger rating between nine models (left) and one national integrated model (right) in South Korea (Sample on the 13:30 April 6, 2014).

적 요

본 연구는 현 국가산불위험예보시스템에서 실시간으로 분석되는 기상에 의한 산불발생확률 모형의 문제점을 개선하기 위하여 수행하였다. 기존 시스템의 문제점은 제주도를 포함한 9개의 도별 산불발생확률모형으로 인해 행정경계 지역에서 산불위험등급(관심-주의-경계-심각 4단계)의 차이가 발생하여 산불담당자들간 혼선을 야기할 수 있고, 이로 인해 인접 시군 경계 간 산불대응력이 떨어질 수 있다는 것이다. 이의 해결을 위해 기존 9개의 산불발생확률모형을 하나로 통합하는 산불발생확률모형을 개발하여 신뢰도 검증과 실제로 산불이 발생한 지점에서 예측된 산불위험지수 값을 추출하여 정확도 평가를 실시하였다. 새롭게 개발한 기상에 의한 봄철과 가을철의 전국 통합 산불발생확률 모형(DWI)은 국립산림과학원에서 운영하는 국가산불위험예보시스템에 반영하여 예측모형을 개선하였다. 연구 결과, 봄철 산불발생에 영향을 주는 기상변수로는 해당 시간대의 평균기온, 상대습도, 일조시간, 평균풍속이었으며, 가을철은 평균기온, 상대습도, 평균풍속으로 나타났으며 모두 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 봄철과 가을철의 전국 통합 산불발생확률 모형은 각각 $[1+\exp\{-(-2.706+(0.088*T_{mean})-(0.055*Rh)-(0.023*Eh)-(0.014*W_{mean}))\}^{-1}]^{-1}$, $[1+\exp\{-(-1.099+(0.117*T_{mean})-(0.069*Rh)-(0.182*W_{mean}))\}^{-1}]^{-1}$ 으로 표본내 예측력은 봄철이 71.7%, 가을철은 86.9%로 나타나 모형의 적합도는 매우 높은 것으로 나타났다. 기존의 도별 9개 모형을 하나의 전국 통합 모형으로 적용할 경우 인접 행정경계에서 발생하는 위험등급의 차이를 해소하여 산불조심기간 중 발표되는 산불위험 단계별 조치사항의 이행에 혼란을 피할 수 있다는 장점이 있다. 새롭게 개발한 전국 통합 산불발생확률 모형(DWI)의 예측 결과 검증을 위해 2014년 봄철 발생한 산불 66건을 대상으로 산불위험지수의 정확도를 평가하였으며, 주의 단계인 산불위험지수 51이상으로 예측된 지역에서 실제로 산불이 발생한 비율은 기존 9개 모형에서 74.24% (산불 49건), 새롭게 개발한 전국 통합 모형에서는 83.33% (산불 55건)가 발생하여 약 9%의 정확도 향상을 보였다. 개발된 모형은 현재 운영중인 산림청 국립산림과학원의 국가산불위험예보시스템에 반영하여 산불이 가장 많이 발생하는 봄철과 가을철 건조시기의 산불발생위험을 정확히 예측하여 산불예방은 물론 진

화자원의 효율적인 배치를 통해 시간과 인적·경제적 비용을 절감하고 산불피해를 최소화 할 수 있는 선택과 집중의 산불정책에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- CFS (Canadian Forest Service): Canadian Wildland Fire Information System. <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/home>
- Choi, G., W. T. Kwon, and D. A. Robinson, 2006: Seasonal onset and duration in South Korea. *Journal of Korean Geographical Society* **41**(4), 435-456. (in Korean with English abstract)
- Clark, J. S., P. D. Royall, and C. Chumbley, 1996: The role of fire during climate change in an eastern deciduous forest at Devil's Bath, New York. *Ecology* **77**(7), 2148-2166.
- Flannigan, M. D., B. J. Stocks, and B. M. Wotton, 2000: Climate change and forest fires. *The Science of the Total Environment* **262**, 221-229.
- Hong, S. K., 1987: *Meteorology and Fire*, Kyohak Research Press, 67-71.
- KFS (Korea Forest Service): Forest fire statistics. <http://www.forest.go.kr> (2011. 3. 1.)
- KFRI (Korea Forest Research Institute), 2007: The Forest science information 189, 4-5.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2004: The Meteorology of Korea, 89-100.
- Kwak, H. B., W. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Won, K. S. Koo, B. D. Lee, and M. B. Lee, 2010: Caused-specific point pattern analysis of forest fire in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **99**(3), 259-266. (in Korean with English abstract)
- Kwon, W. T., 2005: Current status and perspective of climate change sciences. *Journal of Korean Meteorological Society* **41**, 325-336. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. Y., S. Y. Han, M. S. Won, S. H. An, and M. B. Lee, 2004: Developing of forest fire occurrence probability model by using the meteorological characteristic in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **6**(4), 242-249. (in Korean with English abstract)
- McCoy, V. M., and C. R. Burn, 2005: Potential Alteration by Climate Change of the Forest-Fire Regime in the Boreal Forest of Central Yukon Territory. *Arctic* **58**(3), 276-285
- Pinol, J., J. Terradas, and F. Lloret, 1998: Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate change* **38**, 345-357.

- Randerson, J. T., H. Liu, M. G. Flanner, S. D. Chambers, Y. Jin, P. G. Hess, G. Pfister, M. C. Mark, K. K. Treseder, L. R. Welp, F. S. Chapin, J. W. Harden, M. L. Goulen, E. Lyons, J. C. Neff, E. A. G. Schuur, and C. S. Zender, 2006: The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science* **314**, DOI:10.1126/science.1132075
- Sung, M. K., G. H. Lim, E. H. Choi, Y. Y. Lee, M. S. Won, and K. S. Koo, 2010: Climate change over Korea and its relation to the forest fire occurrence. *Atmosphere* **20**(1), 27-35. (in Korean with English abstract)
- USFS (United State Forest Service): Wildland Fire Assessment System. <https://www.wfas.net>
- Won, M. S., K. C. Jang, and S. H. Yoon, 2016: Developing Korean forest fire occurrence probability model reflecting climate change in the spring of 2000s. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 199-207. (in Korean with English abstract)
- Won, M. S., S. H. Yoon, K. S. Koo, and K. H. Kim, 2011: Spatio-temporal analysis of forest fire occurrences during the dry season between 1990s and 2000s in South Korea. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* **14**(3), 150-162. (in Korean with English abstract)
- Won, M. S., D. Miah, K. S. Koo, M. B. Lee, and M. S. Shin, 2010: Meteorological determinants of forest fire occurrence in the fall, South Korea. *Journal of Korean Forest Society* **99**(2), 163-171.
- Won, M. S., S. Y. Lee, M. B. Lee, and S. Ohga, 2010: Development and application of a forest fire danger rating system in South Korea. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University* **55**(2), 221-229.
- Won, M. S., K. S. Koo, and M. B. Lee, 2006: An analysis of forest fire occurrence hazards by changing temperature and humidity of ten-day intervals for 30 years in spring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 250-259. (in Korean with English abstract)