

2000년대 기후변화를 반영한 봄철 산불발생확률모형 개발

원명수* · 윤석희 · 장근창

국립산림과학원 기후변화연구센터

(2016년 11월 18일 접수; 2016년 12월 5일 수정; 2016년 12월 11일 수락)

Developing Korean Forest Fire Occurrence Probability Model Reflecting Climate Change in the Spring of 2000s

Myoungsoo Won*, Sukhee Yoon and Keunchang Jang

Center for Forest & Climate Change, National Institute of Forest Science,

57 hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-712, Korea

(Received November 18, 2016; Revised December 5, 2016; Accepted December 11, 2016)

ABSTRACT

This study was conducted to develop a forest fire occurrence model using meteorological characteristics for practical forecasting of forest fire danger rate by reflecting the climate change for the time period of 2000yrs. Forest fire in South Korea is highly influenced by humidity, wind speed, temperature, and precipitation. To effectively forecast forest fire occurrence, we developed a forest fire danger rating model using weather factors associated with forest fire in 2000yrs. Forest fire occurrence patterns were investigated statistically to develop a forest fire danger rating index using times series weather data sets collected from 76 meteorological observation centers. The data sets were used for 11 years from 2000 to 2010. Development of the national forest fire occurrence probability model used a logistic regression analysis with forest fire occurrence data and meteorological variables. Nine probability models for individual nine provinces including Jeju Island have been developed. The results of the statistical analysis show that the logistic models ($p < 0.05$) strongly depends on the effective and relative humidity, temperature, wind speed, and rainfall. The results of verification showed that the probability of randomly selected fires ranges from 0.687 to 0.981, which represent a relatively high accuracy of the developed model. These findings may be beneficial to the policy makers in South Korea for the prevention of forest fires.

Key words: Forest fire occurrence, Daily weather index, Forest fire danger rating, Climate change

I. 서 론

우리나라는 전국토의 64%가 산림으로 구성되어 있으며, 불에 잘 타는 침엽수가 43%로 가장 많아 산불발생의 위험성이 높다. 동시에, 대륙성 계절풍으로 인하여 봄·가을철 건조기가 지속되어 해풍·핀 현상 등 바람

의 영향으로 전국에 동시 다발적인 산불발생 경향이 상존하고 있다. 뿐만 아니라 매년 봄철에는 기후적으로 가장 건조하여 상대습도와 연료습도가 낮아지고 임내지피물이 매우 건조해 있으며, 산림 내 지피물의 식생은 아직 잎이 돌아나지 않기 때문에 산불이 집중된다. 우리나라는 최근 20년간 연평균 448건의 산불이 발생하였다. 이



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

중 85%에 해당하는 산불이 건조기인 1월~5월에 발생하고 있다. 뿐만 아니라 건조기에는 300ha 이상의 대형 산불이 총 11건으로 전부 봄철에 발생하였고 28,883ha의 산림과 재산피해를 가져왔다. 이러한 대형산불 중에서 약 82%(9건)의 산불이 4월에 집중적으로 발생하였고 20년간 전체 산불발생 대비 피해면적은 56%를 차지하여 봄철 대형산불로 인한 피해는 심각하다고 볼 수 있다. 최근 전지구적인 기후변화 추세와 관련하여 한반도 내에서 나타나고 있는 기후변화 경향에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다(Kwon, 2005; Choi *et al.*, 2006; Sung *et al.*, 2010). 이들 연구에서 공통적으로 밝히고 있는 점은 기온 및 강수변화로 대표되는 기후변화 신호가 전지구적인 경향성과 맞물려 한반도에서도 뚜렷이 나타나고 있다는 것이다.

외국의 여러 선행 연구들에서도 기후변화와 산불발생은 상호 작용한다고 알려져 있다. 다시 말해서 기후변화로 인한 기온 증가와 강수 패턴 변화로 산불의 발생률 증가 및 강도 강화 등이 나타나기도 하지만(Pinol *et al.*, 1998; Flannigan *et al.*, 2000; McCoy and Burn, 2005), 역으로 산불발생으로 인해 방출되는 온실가스와의 에어로솔의 증가, 지표반사가 다시 기후변화에 영향을 미치게 된다고 하였다(Clark *et al.*, 1996; Randerson *et al.*, 2006).

국내에서도 최근 한반도 내에서의 기후변화 추세와 산불발생 경향의 관련성을 분석하는 연구들이 발표되고 있다(Won *et al.*, 2006; Kwak *et al.*, 2010; Won *et al.*, 2010a and 2010b; Won *et al.*, 2011). 국내 연구 또한 외국에서 발표된 기존의 연구들과 마찬가지로 지구온난화와 관련된 기온 증가와 습도 감소 경향이 산불발생 빈도의 증가에 영향을 미친다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구는 기후변화에 따른 1990년대와 2000년대의 봄철 산불발생 패턴이 크게 변화됨에 따라 현재 진행되고 있는 기후변화에 대응하기 위한 산불발생확률모형의 변화를 비교하고, 2000년대 이후의 산불발생확률모형을 적용함으로써 우리나라에서의 기후변화로 인한 산불발생 변화를 산불예측에 현실적으로 반영하고자 수행하였다.

II. 연구자료 및 방법

본 연구에서는 전국 특정지역의 일일 산불발생위험도 예측하기 위하여 산불발생과 관련이 있는 습도, 기온, 풍속 등 기상정보를 이용하여 기후변화를 반영한 2000년대의 전국 9개 권역의 봄철 기상요소에 의한 일일 산

불발생위험지수(daily weather index, DWI)를 개발하였다. 첫 번째로 구체적인 개발방법은 전국 9개 광역지역별로 산불발생에 영향을 주는 기상요소를 규명하여 지역별로 산불발생의 유무를 종속변수(dependent variable)로 두고 산불발생관련 기상요소들을 독립변수(independent variable)로 하여 로지스틱 회귀모형(logistic regression model)을 적용하여 산불발생확률을 추정하였다.

2.1. 연구방법

특정일의 산불발생확률모형은 시계열 기상자료(산불발생과 연관성이 규명된 기상요소)와 산불발생의 유무를 나타내는 더미변수(dummy variables)를 이용하여 산불발생확률모형을 개발하였다. 즉, 산불발생의 유무인 더미변수를 종속변수(dependent variable)로 놓고, 산불발생과 영향이 있는 기상요소들을 독립변수(independent variable)로 주었을 때의 회귀모형(regression model)은 식 (1)과 같다.

$$Pr_j = \beta_0 + \beta_j X_j + \varepsilon_j \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$Pr_j = 0$ (If not a forest fire occurs) or 1 (If a forest fire occurs)

X_j = weather variables related forest fire (i.e. temperature, humidity, wind speed etc.)

식 (1)에서 모형의 오차(error term)의 기댓값 $E(\varepsilon_j)$ 를 0이라고 가정하면 반응함수는 특별한의미를 갖는다. 즉, 종속변수 Pr_j 는 0 또는 1의 값을 가지므로 베르누이(Bernoulli) 확률변수가 된다. 따라서 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$E(Pr_j) = 0 \cdot P[Pr_j = 0] + 1 \cdot P[Pr_j = 1] = Pr_j \quad (2)$$

반응함수 $E(Pr_j)$ 는 독립변수가 X_j 의 값을 가질 때, 종속변수가 $Pr_j = 1$ 이 되는 확률로 표현된다. 이처럼 종속변수가 지시변수로 나타나는 경우는 종속변수와 독립변수와의 관계를 확률적 모형으로 나타낼 수 있는 모형으로는 로짓이나 프로빗 모형이 널리 이용되는데, 로짓모형은 프로빗 모형보다도 간결하며 적합도가 높다. 따라서 본 연구에서는 로짓모형을 이용하여 산불발생확률모형을 개발하였다.

2.2. 분석자료

봄철에 대한 산불발생추정모형의 종속변수인 산불발생유무의 현황자료는 Table 1과 같이 2000년에서 2010년까지의 11년간 지역별 산불발생현황자료를 이용하였다. 11년간 봄철 발생현황을 살펴보면 경상북도 지역의 발생건수가 938건(19.9%)으로 가장 높았으며, 다음으로 경기도 768건(16.3%), 경상남도 740건(15.7%) 순으로 나타났다. 독립변수(설명변수)인 해당지역의 일별 기상변수는 크게 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속을 이용하였으며, 실효습도(實效濕度)는 당일과 전일들의 상대습도에 가중치를 붙여 얻어지는 평균습도로, 본 연구에서는 적용한 실효습도는 식 (3)과 같이 당일의 상대습도를 포함하여 3일간의 상대습도의 누적치를 이용하였으며, 실효습도계수는 0.7을 사용하였다.

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

H_e : The effective humidity,

H_0 : The relative humidity of the day,
 H_n : The relative humidity before n days,
 r : Effective humidity coefficient (0.7)

III. 결과 및 고찰

3.1. 봄철 건조계절의 평균 기후장 변화

기후변화와 산불발생간의 관련성에 대해 조사하기 위해서는 산불발생 조건과 기상인자의 관련성에 대한 이해가 필요하다. 현재까지의 여러 선행 연구들에서는 습도와 기온의 변화가 산불 발생에 주요한 인자임을 지적하고 있다. Lee *et al.*(2004)은 우리나라에서 지역에 따라 산불 발생에 미치는 기상변수를 분석하여 실효습도와 일최고기온, 평균풍속과 같은 기상변수의 변동이 산불발생확률을 증가시키는 요인이 됨을 보였다. Won *et al.*(2006)은 산불발생을 증가시키는 온도와 습도의 범위를 분석함으로써 기상 변동에 따른 산불발생위험성을 판정할 수 있도록 하였다. 우리나라는 봄철과 가을철의 서로 다른 기후특성으로 인해 산불발생 특성이 다르게

Table 1. The statistics of forest fire occurrences during the Spring time of the years from 2000 to 2010 for the regions; Gangwon (GW), Gyeonggi (GG), Chungnam (CN), Chungbuk (CB), Jeonnam (JN), Jeonbuk (JB), Gyeongnam (GN), Gyeongbuk (GB), Jeju (JJ)

Class	Year											Total
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
GB	115 (17.6%)	125 (18.0%)	94 (17.0%)	42 (18.3%)	116 (24.6%)	79 (18.4%)	52 (15.2%)	74 (18.9%)	52 (18.9%)	144 (29.6%)	45 (23.3%)	938 (19.9%)
GG	87 (13.3%)	134 (19.3%)	111 (20.0%)	67 (29.3%)	60 (12.7%)	64 (14.9%)	76 (22.3%)	74 (18.9%)	41 (14.9%)	41 (8.4%)	13 (6.7%)	768 (16.3%)
GN	55 (8.4%)	98 (14.1%)	70 (12.6%)	21 (9.2%)	88 (18.6%)	53 (12.3%)	67 (19.6%)	74 (18.9%)	54 (19.6%)	101 (20.7%)	59 (30.6%)	740 (15.7%)
JN	64 (9.8%)	66 (9.5%)	69 (12.5%)	37 (16.2%)	91 (19.3%)	81 (18.8%)	62 (18.2%)	72 (18.4%)	43 (15.6%)	57 (11.7%)	11 (5.7%)	653 (13.8%)
GW	124 (19.0%)	77 (11.1%)	44 (7.9%)	10 (4.4%)	45 (9.5%)	31 (7.2%)	19 (5.6%)	24 (6.1%)	17 (6.2%)	47 (9.7%)	28 (14.5%)	466 (9.9%)
CN	93 (14.2%)	82 (11.8%)	75 (13.5%)	19 (8.3%)	31 (6.6%)	41 (9.5%)	33 (9.7%)	24 (6.1%)	19 (6.9%)	19 (3.9%)	6 (3.1%)	442 (9.4%)
CB	59 (9.0%)	55 (7.9%)	45 (8.1%)	21 (9.2%)	20 (4.2%)	32 (7.4%)	20 (5.9%)	25 (6.4%)	21 (7.6%)	33 (6.8%)	26 (13.5%)	357 (7.6%)
JB	51 (7.8%)	54 (7.8%)	46 (8.3%)	12 (5.2%)	20 (4.2%)	49 (11.4%)	12 (3.5%)	24 (6.1%)	27 (9.8%)	45 (9.2%)	5 (2.6%)	345 (7.3%)
JJ	5 (0.8%)	2 (0.3%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	1 (0.2%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	1 (0.3%)	1 (0.4%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	10 (0.2%)
Total	653 (100%)	693 (100%)	554 (100%)	229 (100%)	472 (100%)	430 (100%)	341 (100%)	392 (100%)	275 (100%)	487 (100%)	193 (100%)	4,719 (100%)

Table 2. Climate change trend of dry season by four forest fire climate Zones

	Temperature	Relative humidity	Accumulated Precipitation	Precipitation day
Gyeonggi	++ (+2.5°C)	-- (-12%)	- (-80mm)	- (-6 days)
Gangwon	+ (+1.5°C)	- (-8%)	+ (0mm)	+ (0 days)
Chungcheong, Jeolla	+ (+1.5°C)	- (-8%)	-- (-100mm)	- (-8 days)
Gyeongsang	++ (+2.0°C)	-- (-10%)	-- (-100mm)	- (-4 days)

나타난다. 이러한 이유로 Won *et al.* (2010a and 2010b)은 1990년대 봄철과 가을철의 산불발생확률모형을 분리하여 국가산불위험예보시스템에 적용한 바 있다. 이들 연구에서는 권역별로 산불발생에 영향을 주는 기상 변수가 서로 다르지만 1990년대 봄철의 경우 대체로 실효습도와 최고기온, 풍속에 많은 영향을 받으며, 가을철의 경우는 실효습도와 평균기온과 크게 관련이 있음을 보였다. Sung *et al.* (2010)의 연구에서는 1973년 이후의 한반도 평균 기후장 분포에서 남부 지방이 건조계절 동안 대체로 고온·건조한 경향이 강한 것으로 나타났으며, 호남과 영남지역의 강수량은 적은 특성을 보였다. 특히, 영남지역은 습도가 전국 평균에 비하여 가장 낮고, 강수량이 적으며, 강수일수 또한 적은 분포를 나타내어 기후적으로 산불위험도가 높은 지역으로 판단해 볼 수 있다. 호남지역과 강원지역은 전국 평균에 비하여 높은 강수량과 강수일수로 기후적으로 산불위험성이 타 지역에 비해 양호한 특성을 보였다. 권역별로 기후변화 경향이 다르며, 특히 경기지역은 기온증가와 습도 감소폭이 크

며, 충청과 호남지역은 강수량과 강수일수 감소가 두드러졌다. 특히 영남지역은 기온 상승과 습도, 강수량의 감소폭이 큰 것으로 나타났다(Table 2). 하지만 강원지역은 모든 기상요소에서 변화폭이 비교적 낮아 산불발생 환경 측면에서 다른 지역보다 안정적인 것으로 사료된다. 향후 권역별 기후변화 특성과 산불발생 경향을 비교함으로써 산불발생에 영향을 미치는 권역별 주요 기후인자를 선별할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 1990년대와 2000년대의 산불발생 변화

기후변화에 따른 1990년대와 2000년대의 지역별 산불발생 빈도의 변화를 비교하기 위해 1991년부터 2010년까지 총 8,802건의 산불발생위치를 공간 분석한 결과, 2000년대에는 1990년대에 비해 지역별 산불발생빈도가 증가하였고, 지역별 공간 분포도 대도시를 중심으로 인근 주변 지역으로 확대되면서 백두대간을 중심으로 동서로 분할되어 발생하는 경향을 보였다. 1990년대에는 서울, 부산, 대구, 울산, 광주, 대전과 같은 광역 대도시

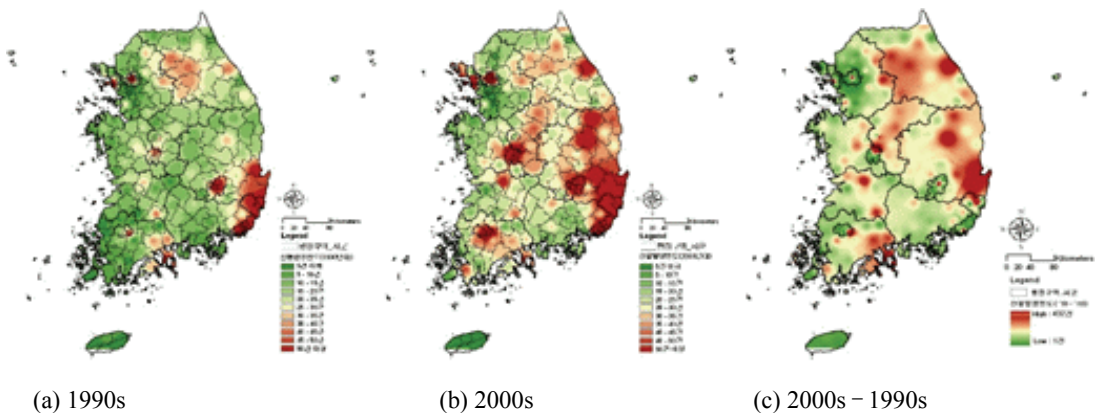


Fig. 1. Change in frequency of forest fire occurrence between 1990s and 2000s.

를 중심으로 산불발생 빈도가 높게 나타났으며, 강원 영서와 영남 동해안 일대, 대구 주위의 중소 도시를 중심으로 집중되어 발생하는 경향을 보였다(Fig. 1(a)). 2000년대에는 1990년대와 마찬가지로 산불발생빈도가 광역 대도시를 중심으로 발생하는 경향을 보였을 뿐만 아니라 대도시 주변을 포함한 인근 지역으로 뚜렷하게 확대되는 경향을 보이면서 전체 발생비율 또한 증가하는 결과를 보였다. 특히, 강원 영서에서 영동 지역인 강릉 일대로 산불발생빈도 영역이 확대되는 경향을 보였고, 가장 집중적으로 발생했던 영남 동해안 일대에서는 경북 내륙으로 산불발생빈도의 공간적인 영역이 확대되는 경향을 보였다(Fig. 1(b)). 이러한 결과는 산을 찾는 사람들이 많아지면서 산불발생확률과 건수가 증가되었을 것으로 추정된다. 우리나라의 산불은 입산자실화와 소각행위 등 대부분 인간활동과 관련하여 발생하며, 그 중 가장 큰 비중을 차지하는 입산자실화의 공간적 분포가 인구밀도가 높은 대도시 인근지역에서 높게 나타나는 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다(Kwak *et al.*, 2010; Won *et al.*, 2011).

3.3. 2000년대 봄철 기상에 의한 산불발생확률 모형개발

봄철 기상에 의한 일일 산불발생확률은 전국 9개 광역 지역별로 산불발생에 영향을 주는 기상변수를 구명하여 지역별로 각각 산불발생의 유무를 종속변수로 기상요소들을 독립변수로 하여 로지스틱 회귀모형을 적용하였다. 이때, 각 지역별로 어떤 특정 산불발생일의 경우에는 단지 1건이 발생한 경우가 아니라 2건 이상 다수가 발생

한 경우에는 특정일은 산불발생확률이 매우 높다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 특정일의 경우에는 기상변수(독립변수)는 동일하게 두고 발생건수만큼 표본수를 늘여 분석하였다. 제주도를 제외한 8개 광역지역의 2000년에서 2010년까지의 자료와 제주도는 1991년에서 2010년까지의 산불 발생에 대한 시계열 기상자료는 1월부터 6월까지 산불 미발생에 대한 시계열 기상자료는 2월부터 4월까지 자료를 활용하여 시계열 기상자료와 산불발생의 유무를 로지스틱 회귀분석 이용하여 산불발생확률모형을 추정하였으며, 모형 추정 결과는 Table 3과 같다.

강원도 지역에서는 산불발생에 영향을 주는 기상변수로는 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속으로 나타났으며, 모두 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 상대습도 및 실효습도의 부호가 음(-)으로 나타나 상대습도 및 실효습도가 낮으면 낮을수록 산불발생위험이 증가하는 것으로 나타났으며, 최고기온과 평균풍속의 경우에는 부호가 정(+)으로 최고기온 및 평균풍속이 증가하면 산불발생확률이 증가하는 것으로 나타나 일반 기대이론과 부합하는 것으로 나타났다. 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. 추정결과 χ^2 -값은 396.070로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 80.7%로 나타나 모형의 적합도는 매우 높은 것으로 나타났다. 경기도 지역에서는 유의성 있

Table 3. Forest fire occurrence probability model in Spring, 2000s (Tmax : maximum temperature, Eh : effective humidity, Rh : relative humidity, Wmean : average wind speed)

Regions	Model (Pr)	(%) predict value
Gyeonggi	$[1+\exp\{-(-2.507+(0.112*T_{max})-(0.061*Rh)-(0.123*W_{mean}))\}]^{-1}$	73.6
Gangwon	$[1+\exp\{-(1.932+(0.109*T_{max})-(0.047*Rh)-(0.057*Eh)+(0.646*W_{mean}))\}]^{-1}$	80.7
Gyeongnam	$[1+\exp\{-(4.713+(0.076*T_{max})-(0.055*Rh)-(0.023*Eh)-(0.572*W_{mean}))\}]^{-1}$	74.4
Gyeongbuk	$[1+\exp\{-(-2.030+(0.052*T_{max})-(0.062*Rh)+(0.038*Eh)-(0.320*W_{mean}))\}]^{-1}$	68.7
Jeonnam	$[1+\exp\{-(1.931+(0.087*T_{max})-(0.055*Rh)-(0.014*Eh)+(0.329*W_{mean}))\}]^{-1}$	70.1
Jeonbuk	$[1+\exp\{-(-0.281+(0.127*T_{max})-(0.042*Rh))\}]^{-1}$	73.5
Chungnam	$[1+\exp\{-(-0.188+(0.113*T_{max})-(0.041*Rh)+(0.182*W_{mean}))\}]^{-1}$	70.6
Chungbuk	$[1+\exp\{-(-0.857+(0.127*T_{max})-(0.066*Rh)+(0.038*Eh))\}]^{-1}$	72.8
Jeju*	$[1+\exp\{-(-6.224+(0.040*T_{max})+(0.399*W_{mean}))\}]^{-1}$	98.1

는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 평균풍속으로 나타났으며, 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 상대습도 및 평균풍속의 부호가 음(-)으로 나타나 상대습도 및 평균풍속이 낮으면 낮을수록 산발발생위험이 증가하는 것으로 나타났으며, 최고기온의 경우에는 부호가 정(+)으로 최고기온 및 평균풍속이 증가하면 산발발생확률이 증가하는 것으로 나타났으며, 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 253.417로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 73.6%로 나타났다. 경상남도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속이 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 286.912로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 74.4%로 나타났다. 경상북도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속이 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 94.951으로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 68.7%로 약간 낮게 나타났다. 전라남도 지역에서도 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 평균풍속이 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 실효습도는 통계적으로 유의하지 않으나 중요변수로 간주하여 모형에 포함시켰으며, 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 183.538로 통계적으로 유의하였으며, 표본내 예측력은 70.1%로 나타났다. 전라북도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온과 상대습도가 나타났으며, 모두 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 151.032로 통계적으로 유의하였으며, 표본내 예측력은 73.5%로 나타났다. 충청남도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 평균풍속으로 나타났으며, 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 이론적인 기대치와 부합하

는 부호를 보이고 있다. 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 158.623로 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 70.6%로 나타났다. 충청북도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 상대습도, 실효습도가 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 추정모형의 적합도는 x^2 -값이 150.225로 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 72.8%로 높게 나타났다. 마지막으로 제주도 지역에서는 유의성 있는 독립변수로는 최고기온, 평균풍속이 모형에 포함되었으며, 표본내 예측력은 98.1%로 나타내고 있으나 발생 건수에 대한 자료 부족으로 미발생 건수에 대한 예측력이라 볼 수 있으며 추정모형의 적합도는 계산되지 않는다.

3.4. 2000년대 봄철 산발발생확률모형의 신뢰성 검증

전국 9개 광역도별 각각 기상대의 일별 기상자료(기온, 습도, 풍속)를 독립변수로 산발발생일을 종속변수(발생일 1, 비발생일 0)로 설정하여 확률모형으로 변환할 수 있는 로지스틱 모형을 적용하여 통계적으로 유의한 산발발생확률모형을 개발하였다. 여기서는 이들 추정확률모형이 얼마나 예측력이 뛰어난가를 검토하기 위하여 제주도를 제외한 8개 지역은 2000년부터 2010년간과 제주도 지역은 1991년부터 2010년간의 분석에 이용된 시계열 기상인자를 추정모형에 대입하여 산발발생확률들을 계산하는 사후검정분석을 실시하였다. 추정된 확률들을 산발발생일과 비발생일로 구분하여 모형의 정확성과 신뢰성을 검증하였다. 그 결과는 Table 4와 같다. 실제로 산불이 발생한 날들의 평균 산발발생확률이 산불이 발생하지 않은 날들의 산발발생확률보다도 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.

Table 4. Reliability evaluation of estimating forest fire occurrence probability model; Gangwon (GW), Gyeonggi (GG), Chungnam (CN), Chungbuk (CB), Jeonnam (JN), Jeonbuk (JB), Gyeongnam (GN), Gyeongbuk (GB), Jeju (JJ)

Regions	GW	GG	CN	CB	JN	JB	GN	GB	JJ
Mean of non-fire days	.245	.444	.331	.273	.433	.269	.413	.562	.018
Mean of fire days	.674	.700	.545	.507	.643	.492	.692	.697	.052
t-value	28.090**	20.778**	16.782**	17.039**	17.494**	16.193**	21.889**	13.972**	2.031*

** significant at 99% level, * significant at 95% level.

3.5. 2000년대 봄철 기상에 의한 일일 산불발생 위험지수(DWI)의 개발

3.4.에서 전국의 지역별 기상자료를 이용한 산불발생 확률모형이 효과적으로 산불발생위험을 예측할 수 있다는 것이 확인되었다. 여기에서는 지역별 산불발생확률 모형에서 사후검정으로 예측된 과거의 지역별 산불발생 확률 예측치들을 이용하여 산불발생위험지수를 설정하였다. 산불발생위험지수의 설정은 과거 11년간(2000-2010년)의 봄철(1·2·3·4·5·6월)의 지역별 기상 자료를 지역별 확률모형에 대입하여 얻어진 확률들의 총 예측치를 이용하여 10% 구간별 백분위수를 추정하고 해당 예측 확률구간을 지수화하여 설정하였다. 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서 설정한 DWI를 지역별 산불발생확률모형에서 사후검정으로 예측된 과거의 지역별 산불발생확률 예측치에 적용하여 기상에 의한 2000년대 봄철 일일 산불발생위험지수(DWI)를 산출하였다(Table 6). 실제로 산불이 발생한 날들의 DWI는 높은 반면, 실제로 산불

Table 5. Daily weather index(DWI) in Spring, 2000s

Ratio interval	DWI	Estimated interval rate
10%	1	[.0000 ~ .0162]
20%	2	[.0163 ~ .0916]
30%	3	[.0917 ~ .2030]
40%	4	[.2031 ~ .3218]
50%	5	[.3219 ~ .4342]
60%	6	[.4343 ~ .5535]
70%	7	[.5536 ~ .6527]
80%	8	[.6528 ~ .7443]
90%	9	[.7444 ~ .8346]
100%	10	[.8347 ~ 1.000]

이 발생하지 않은 날의 DWI는 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 DWI가 산불발생의 위험정도를 매우 잘 예측할 수 있는 모형이라는 것을 의미한다. 9개 도별 지역 간에 있어서 산불 발생건수가 많은 강원도, 경기도, 경상

Table 6. Distribution of DWI by weather data of the past dry season

Class	Fire frequency	Daily Weather Index(DWI)										Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GW	Fire	2	12	24	32	25	30	47	71	56	167	466
	Non Fire	37	169	139	94	58	41	40	17	13	12	620
GG	Fire	0	0	13	42	61	73	84	102	119	274	768
	Non Fire	0	9	71	93	102	79	59	41	35	29	518
GN	Fire	2	4	21	29	33	68	107	108	149	219	740
	Non Fire	5	49	83	78	90	67	75	45	41	18	551
GB	Fire	0	0	1	11	58	101	139	196	249	183	938
	Non Fire	0	0	13	62	63	74	98	110	69	16	505
JN	Fire	0	0	9	42	60	100	92	105	145	100	653
	Non Fire	0	19	75	89	93	101	59	54	33	16	539
JB	Fire	0	4	28	53	57	57	54	43	34	15	345
	Non Fire	0	105	219	117	81	49	44	21	12	3	651
CN	Fire	0	5	25	42	63	88	48	76	63	32	422
	Non Fire	0	45	145	151	108	52	49	40	16	2	608
CB	Fire	0	9	25	40	66	63	53	36	54	11	357
	Non Fire	1	121	186	120	79	51	51	29	8	0	646
JJ	Fire	12	14	2	1	0	1	0	0	0	0	30
	Non Fire	1,039	530	17	1	0	0	0	0	0	0	1,587
Total	Fire	16	48	148	292	423	581	624	737	869	1001	4719
	Non Fire	1082	1047	948	805	674	514	475	357	227	96	6225

남도, 경상북도, 전라남도 지역의 DWI는 산불 발생건수가 상대적으로 적은 전라북도, 충청남도, 충청북도, 제주도의 DWI보다도 높은 지수값에서 산불발생일의 빈도가 높은 것을 알 수 있다. 특히 제주도의 경우는 과거 산불 사례가 30건에 불과해 통계적으로 무의미한 결과를 보일 수도 있어 추후 보완연구가 필요하다.

적 요

본 연구는 기후변화에 따른 1990년대와 2000년대 봄철에 발생하는 산불의 공간적 분포가 크게 변화됨에 따라 현재 진행되고 있는 기후변화에 대응하기 위한 산불발생확률모형의 변화를 비교하고, 2000년대 이후의 산불발생확률모형을 적용함으로써 우리나라에서의 기후변화로 인한 산불발생 변화 예측을 현실적으로 반영하기 위해 수행하였다. 본 연구에서는 전국 특정지역의 일일 산불발생위험도 예측하기 위하여 산불발생과 관련이 있는 기상요소를 규명된 습도, 기온, 풍속 등 기상정보를 이용하여 기후변화를 반영한 2000년대의 전국 9개 권역의 봄철 기상요소에 의한 일일 산불발생위험지수(daily weather index, DWI)를 개발하였다. 첫 번째로 구체적인 개발방법은 전국 9개 광역지역별로 산불발생에 영향을 주는 기상요소를 규명하여 지역별로 산불발생의 유무를 종속변수(dependent variable)로 두고 산불발생 관련 기상요소들을 독립변수(independent variable)로 하여 로지스틱 회귀모형(logistic regression model)을 적용하여 산불발생확률을 추정하였다. 1970년대 이후 우리나라의 봄철 건조계절의 평균 기온 상승, 영남지역에서 기온은 상승하고 습도와 강수량의 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 반면 강원지역은 모든 기상요소에서 변화폭이 비교적 낮아 산불발생 환경 측면에서 다른 지역보다 안정적인 것으로 사료된다. 향후 권역별 기후변화 특성과 산불발생 경향을 비교함으로써 산불발생에 영향을 미치는 권역별 주요 기후인자를 선별할 수 있을 것으로 판단된다. 1990년대와 비교하여 2000년대의 산불의 패턴은 남북으로 분할되던 경향이 광역 대도시를 중심으로 인근 지역으로 확대되면서 백두대간을 중심으로 동서로 분할되는 경향을 보였다. 이러한 결과를 토대로 2000년대 봄철 기상에 의한 산불발생확률모형 개발을 수행하였다. 각 권역별 산불발생과 관련되는 기상요소로 경상남·북도, 전라남도 4개 권역은 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속, 경기도와 충청남도 2개 권역은 최고기온, 상대습도, 평균풍속, 충청북도는 최고기

온, 상대습도, 실효습도, 전라북도는 최고기온과 상대습도, 마지막으로 제주도는 최고기온과 평균풍속에서 95% 이상의 신뢰도에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 제주도를 제외한 모든 권역에서 99%의 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 표본내 예측력은 68.7~80.7%로 나타나 모형의 적합도는 매우 높은 것으로 나타났다. 개발된 모형은 현재 운영중인 산림청 국립산림과학원의 국가산불위험예보시스템에 반영하여 기후변화에 따른 2000년대의 산불발생위험을 정확히 예측하여 산불예방은 물론 진화차원의 효율적인 배치를 통해 시간과 인적·경제적 비용을 절감하고 산불 피해를 최소화할 수 있는 선택과 집중의 산불정책에 일조할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- 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 Devel's Bathtub, 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.
- 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**(2-1), 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

- costal 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**(5802), 1130-1132. 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)
- 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)
- Won, M. S., D. Miah, K. S. Koo, M. B. Lee, and M. S. Shin, 2010a: 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, 2010b: 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., 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)