

MODIS Fire Spot 정보와 5km 기상 재분석 자료를 활용한 접근불능지역의 산불기상위험지수 산출 모형 개발

원명수^{1*} · 장근창¹ · 윤석희¹

Development of Fire Weather Index Model in Inaccessible Areas using MOD14 Fire Product and 5km-resolution Meteorological Data

Myoung-Soo WON^{1*} · Keun-Chang JANG¹ · Suk-Hee YOON¹

요 약

본 연구는 북한 및 비무장지대 등 접근불능지역에 대한 기상에 의한 산불발생예측 알고리즘을 개발하고, 실제 현장과 현업에서 활용할 수 있는 실시간 산불위험예보 체계를 개발하는데 있다. 산불기상위험지수 산출 모형 개발을 위해 자료의 취득과 검증을 위한 현장조사가 불가능하다는 연구적 한계가 존재하므로, 이를 해결하기 위해 MODIS 위성자료를 활용하여 접근이 불가능한 지역의 산불발화지점(fire spot)을 과학적 근거를 가지고 추정하였다. 추출된 산불발화지점을 대상으로 기상청에서 생산된 과거 기상 재분석자료(5km 해상도)를 활용하여 산불발화지점에 대한 기상특성을 추출하여 데이터베이스화 하였다. 접근불능지역의 산불발화지점에서 추출된 기상요소들은 산불발생과 기상요인들과의 통계적 상관성과 산불발생 유무(산불발생 1, 산불 미발생 0)를 추정할 수 있는 로지스틱 회귀모형을 활용하여 실시간 기상변화에 의한 산불기상위험지수(Fire Weather Index, FWI)를 개발하였다. FWI 모형의 예측정확도는 66.6%로 나타나 모형의 적합도는 비교적 높은 것으로 나타났다. 이 연구결과는 남·북한의 산불 방지를 위한 정책 입안자들의 의사결정에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

주요어 : 산불위험예보, 산불기상위험지수, 로지스틱 회귀분석, 북한

ABSTRACT

This study has developed a forest fire occurrence probability model for inaccessible

2018년 08월 23일 접수 Received on August 23, 2018 / 2018년 09월 30일 수정 Revised on September 30, 2018 / 2018년 09월 30일 심사완료 Accepted on September 30, 2018

1 국립산림과학원 기후변화생태연구과 Division of Forest Ecology and Climate Change, National Institute of Forest Science

* Corresponding Author E-mail : forestfire@korea.kr

areas such as North Korea and Demilitarized Zone and we have developed a real-time forest fire danger rating system that can be used in fire-related works. There are limitations on the research that it is impossible to conduct site investigation for data acquisition and verification for forest fire weather index model and system development. To solve this problem, we estimated the fire spots in the areas where access is impossible by using MODIS satellite data with scientific basis. Using the past meteorological reanalysis data(5km resolution) produced by the Korea Meteorological Administration(KMA) on the extracted fires, the meteorological characteristics of the fires were extracted and made database. The meteorological factors extracted from the forest fire ignition points in the inaccessible areas are statistically correlated with the forest fire occurrence and the weather factors and the logistic regression model that can estimate the forest fires occurrence(fires 1 and non-fires 0). And used to calculate the forest fire weather index(FWI). The results of the statistical analysis show that the logistic models($p < 0.01$) strongly depends on maximum temperature, minimum relative humidity, effective humidity and average wind speed. The logistic regression model constructed in this study showed a relatively high accuracy of 66%. These findings may be beneficial to the policy makers in Republic of Korea(ROK) and Democratic People's Republic of Korea(DPRK) for the prevention of forest fires.

KEYWORDS : *Forest Fire Danger Rating, Fire Weather Index, Logistic Regression, Inaccessible Areas*

서론

최근 전 지구적인 기후변화 추세와 관련하여 한반도내에서 나타나고 있는 기후변화 경향에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다(Choi *et al.*, 2006; Sung *et al.*, 2010). 이들 연구에서 공통적으로 밝히고 있는 점은 기온 및 강수변화로 대표되는 기후변화 신호가 전 지구적인 경향성과 맞물려 한반도에서도 뚜렷이 나타나고 있다는 것이다.

산불은 일차적인 원인으로 다양한 인위적 요인에 의하여 시작되지만 이와 같은 실화가 산림에 피해를 줄 정도로 발화, 연소, 확산되기 위해서는 기온, 습도, 바람과 산림내 가연성 물질의 함수율 등 연소환경을 구성하는 기상적 요인과 깊은 상관관계를 가지고 있다(Cunningham and Martell, 1972; Lee *et al.*, 2004; Won *et al.*, 2006). 산불은 일반화재와 같이 연료, 산소, 열에 의하여 발생되지만 산불발생위험은 임상, 연

료의 종류, 연료의 배열 및 밀도와 같은 연료의 조건과 습도, 기온, 풍속과 같은 기상요인 그리고 사면방위나 고도와 같은 지형적 영향에 의하여 복합적으로 발생한다(Davis and Brown, 1959).

우리나라는 최근 20년간 연평균 450여건의 산불이 발생하고 있다. 이 중 85%에 해당하는 산불이 건조기인 1월~5월에 발생하였으며 100ha 이상의 대형산불(Kang *et al.*, 2016)로 인해 산림과 재산피해를 입었다. 현재도 이러한 대형산불이 지구촌 곳곳에서 끊임없이 발생하고 있으며, 특히 지구온난화로 인해 최근에는 피해규모가 더욱 대형화되고 있는 추세이다. 세계 각국은 첨단과학기술을 도입하여 산불발생 위험을 조기에 예측하여 산불피해를 저감시킬 수 있는 노력을 다하고 있다. 이러한 노력 중 하나가 산불위험예보시스템과 선진화된 수치모델을 이용하여 산불상황을 실시간으로 모니터링하여 산불을 신속하고 효과적으로 예방·진화할 수 있는 방법들을 개발하여 실용화하고 있다.

국내는 국립산림과학원에서 이러한 산불발생 위험을 효과적으로 예측하기 위하여 실시간 변하는 기상요인과 임상, 지형 등과 같은 산불발생 특성들을 이용하여 산불발생 위험 정도를 예측하고 예보할 수 있는 국가산불위험예보시스템(www.forestfire.nifos.go.kr)을 개발하여 운영하고 있다(Lee *et al.*, 2004, 2005; Won *et al.*, 2010a, 2010b, 2012, 2016). 산불연구 분야의 선진국이라 할 수 있는 미국과 캐나다에서도 기상변화와 숲의 환경조건에 따라 산불의 발생과 확산 등 위험정도를 예측하여 예보하는 시스템을 오래 전부터 개발하여 운영하고 있다. 미국은 산림청(US Forest Service, USFS)에서 산불평가시스템(Wildland Fire Assessment System, WFAS)을, 캐나다 산림청(Canadian Forest Service, CFS)에서는 산불정보시스템(Canadian Wildland Fire Information System, CWFIS)을 통해 전지역에 산불위험을 예보하고 있다.

북한의 산림면적은 전체면적인 1,228만ha의 약 77%에 해당하는 948만ha로 남은 산림면적의 약 1.5배에 이른다. 북한의 산림면적은 1980년대 말 이후 10년간 약 51만ha(전체 산림면적의 5%)가 감소하는 등 자연재해인 산불과 산사태로 인해 대규모 산림피해를 입고 있는 것으로 보고된 바 있다(Korea Forest Research Institute, 2008). 미항공우주국(NASA)에서 지난 2015년 4월 27일 촬영한 MODIS 영상에서 북한 함경북도 무산군, 화성군, 함경남도 리원군, 흥원군, 단천, 강원도 통천군 등 10여 곳에서 대형 산불이 발생한 것으로 포착된 바 있다. 이는 3월 말에 발생한 산불이 한 달 넘게 계속해서 확산되어 산불로 인한 연무가 일본 북부지역까지 영향을 미친 것으로 나타났다(Korea Centre for Atmospheric Environment Research, 2012). 산림청에서는 지난 10년간('06~'15) 비무장지대에서 연평균 8건 가량의 산불이 발생하여 남하한 것으로 파악하고 있다(Korea Forest Service, 2015). 북한의 산불발생 현황은 정보의 제한으로 정확히 파악할 수는 없지만 미항공우주국과 국립해양대기국(NOAA)에서 관

측하는 위성자료를 통해 산불발생위치(fire spot) 정보를 어느 정도 파악할 수 있다. 최근 북한에서 발생한 산불이 비무장지대로 남하하는 경우가 많아 이에 대한 대처 및 대응이 필요하며 북한을 포함한 접근불능지역의 산불발생위험을 사전에 예측하여 대형산불 방지 및 산불로 인한 피해를 최소화할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 북한과 접경지역 등 접근이 불가능한 지역을 대상으로 MODIS 위성자료와 기상청에서 생산되는 5km 공간해상도의 기상정보를 활용하여 산불기상위험지수 산출 모형을 개발하여 한반도의 실시간 산불위험예보 체계를 구축하는데 목적이 있다.

자료 및 방법

1. MODIS 위성자료를 활용한 산불발생지점

추출

접근불능지역에 대한 실시간 산불위험예보 기반 구축을 위해 위성으로부터 관측된 최근 5년간(2011~2015년)의 산불발생위치 정보 DB를 구축하였다. 본 연구에서는 지구감시계획(Earth Observing System Program)에 의해 발사된 Terra 위성의 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 센서로부터 관측된 산불탐지 자료(MOD14)를 활용하였다. MODIS 자료는 705km 상공에서 태양동주기 궤도로 지구를 돌며 하루에 두 번 지구를 연속적으로 관측하고 있다. MOD14 산불탐지 자료는 분광특성에 기초하여 산불발생 여부를 탐지하며(Giglio *et al.*, 2003), 1km 공간해상도로 산불발생지역에 대한 정보를 제공한다. 이 연구에서 사용된 MOD14 자료는 Swath 형식의 자료로 관측범위는 2,340×2,030km이며, 산불발생지역(Fire mask), 자료 품질 정보(Algorithm QA), 최대방사열에너지(Maximum fire radiative power) 등 다양한 정보를 제공한다. Swath 형식의 MOD14 자료의 지리적 위치 정보를 부여하기 위해 MOD03 geolocation fields 정보를 함께 활용하였다. 본 연구에서 활용한 MODIS 위성정보

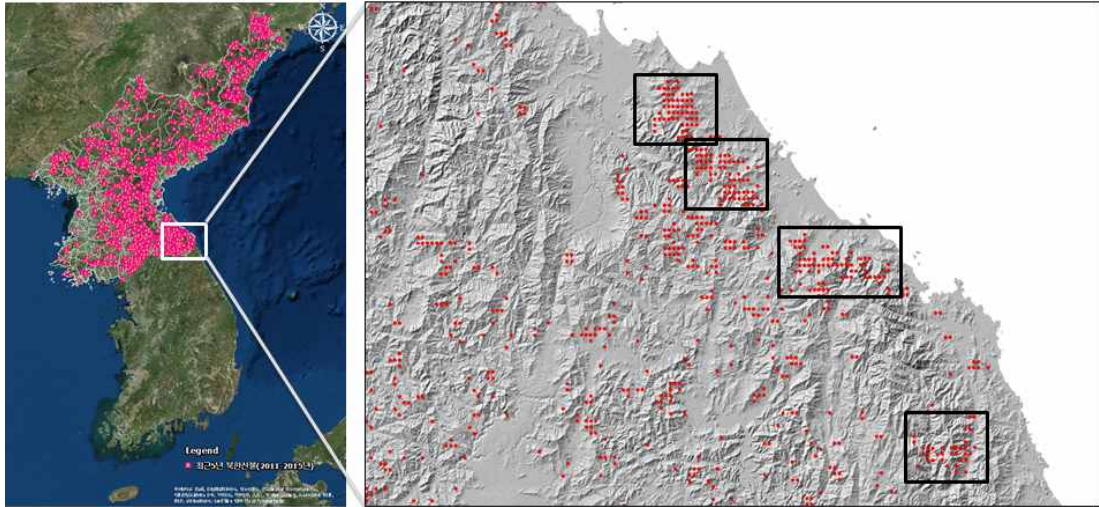


FIGURE 1. Spatial distribution of forest fire occurrence in North Korea

는 미항공우주국에서 운영하고 있는 LAADS Web(Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System Web) 포털에서 2011년부터 2015년까지 5년간의 자료를 수집하였다. MOD14 산출물의 산불발생지역 자료는 총 10가지로 분류된 정보를 제공한다. 본 연구에서는 산불이 탐지된 정보 중 중간 이상의 신뢰도를 갖는 자료(nominal, high confidence)만을 이용하였다. 이 자료를 바탕으로 산불자료 생산의 품질을 검사하여 최종적으로 산불발생 추정지점들을 추출하였다(그림 1).

2. 산불발화지 탐지를 위한 가설 수립

앞선 분석을 통해 접근불능지역에 대한 2011년부터 2015년까지 5년간 산불발생지점의 데이터베이스를 구축하였다. 위성으로부터 관측된 산불발생지점 정보는 산불발생위치 DB를 구축하기에 좋은 기초자료이지만 산불위험예측 모형을 개발하기 위해서는 실제 산불이 시작된 발화지점에 대한 위치 특성이 중요하다. 하지만 실제 본 연구에서 수집한 위성정보 기반의 산불발생위치 정보에는 동일 픽셀에서 연속적으로 산불로 특정된 정보가 산출되거나, 같은 시기에 촬영된 영상 내 산불발생지가 넓게 분포하는 특

징이 나타나기도 한다. 이러한 특징은 산불이 오랫동안 유지되거나 확산되어 대형화 되었을 때 나타날 수 있다. 그림 1의 우측에 표시된 강원도 4개 지역은 다른 지역에 비해 시·공간적으로 산불이 연속적으로 탐지되면서 극심한 대형 산불로 인한 피해가 컸을 것으로 추정되고 있다. 따라서 산불발생위험예보 모형을 개발하기 위해서는 산불확산 등의 영향에 의해 발생 가능한 산불발생위치의 넓은 분포 경향을 제거한 실제 발화지점의 정보의 산출이 필요하다. 본 연구에서는 MOD14 위성정보로부터 산출된 산불발생지점의 발화지점을 특정하기 위해 다음과 같은 가설을 수립하였다. 첫째, 특정 픽셀에서 시계열적으로 산불이 탐지되었을 때, 최초로 탐지된 시점의 산불지점을 발화지점과 발생시기로 간주한다. 둘째, 동일 픽셀에서 서로 다른 시기(5일 이상)의 산불이 탐지되었을 경우에는 개별 산불로 간주한다. 셋째, 발화지점을 중심으로 발화시점 이후 4일까지 산불확산 유무를 파악하여 최초 발화지점을 추정하기 위해 발화 시점부터 1일 이후까지 3×3픽셀 영역을 설정한 후 fire spot을 제거하고, 2일 이후부터는 5×5픽셀 영역을 점검한다. 이 때 fire spot 정보를 제거 시 UV는 동서와 남북 방향의 바람 성분을

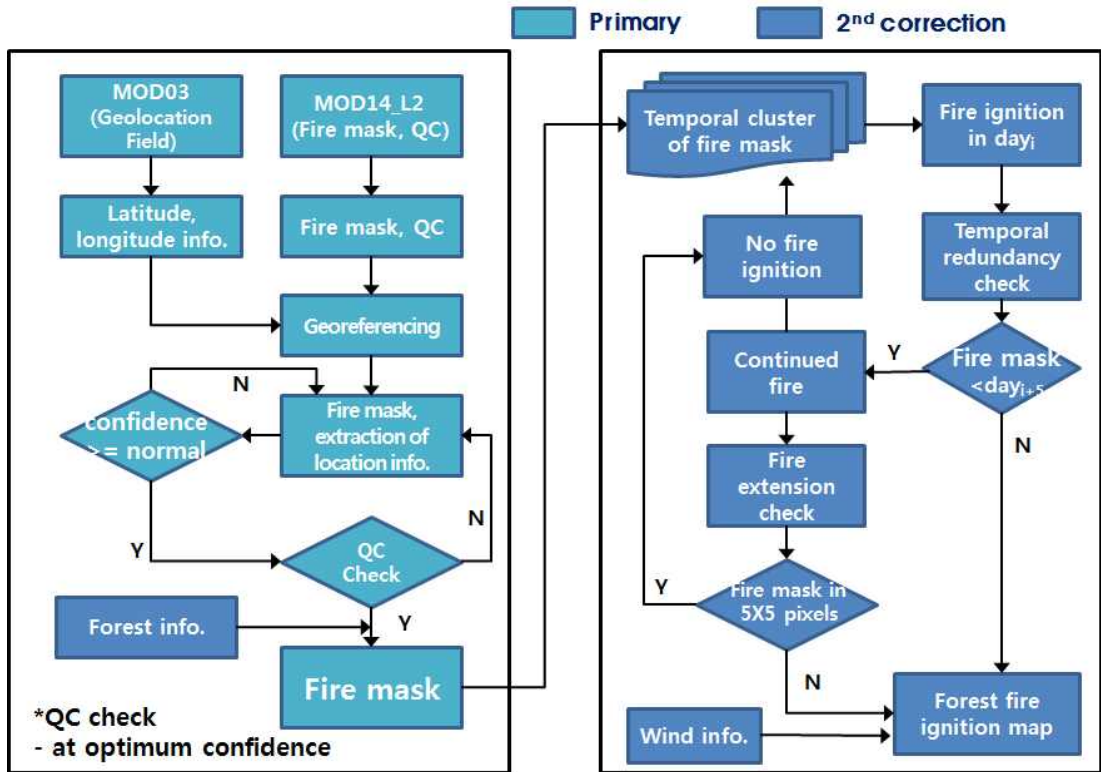


FIGURE 2. Processing flowchart for extracting fire spot of MOD14 product on the basis of the hypothesis

갖는 벡터 정보이기 때문에 fire spot별 UV 벡터 값으로 풍속과 풍향을 계산한 후 동일 산불 확산으로 판단되는 픽셀을 제거한다. 마지막으로 구름에 의한 자료의 결측 시 fire spot 자료를 파악한다. 그림 2는 MOD14 자료로부터 산불발생지점을 산출한 후 품질관리를 거쳐 최종적으로 산불발생지역을 선정하기 위한 처리 과정을 나타낸 것이다. 그림 2에서도 잘 나타나 있듯이 MOD14 산불 정보로부터 산불 자료를 추출하기 위해 두 번의 자료 품질을 확인하는 과정을 거쳤다.

3. 기상정보의 수집 및 처리

기상자료는 산불위험예보의 기반을 구축하기 위한 필수적인 정보이다. 본 연구에서는 산불발생지역에 대한 기상현황 정보를 획득하기 위해

접근불능지역에 대한 시간 단위의 격자형 기상 자료를 기상청으로부터 수집하였다. 한반도 전역을 포함하는 5km 공간해상도의 초단기 실황 재분석 기상자료는 산불발생지점에 대한 통계 분석을 위해 2011년부터 2015년까지 1시간 간격으로 생산된 자료를 수집하였다. 총 격자수는 37,697개로 동서로 149개, 남북으로 253개의 격자로 구성되어 있으며, 기준 격자점은 43, 136으로 위도 38.0 N과 경도 126.0 E에 해당한다(그림 3). 기상청 초단기 실황 재분석 기상 자료의 좌표체계는 Lambert Conic Conformal 체계로 인공위성 영상정보와 좌표체계를 맞추기 위해서 좌표변환을 수행하였다. 접근불능지역에 대한 산불위험예보를 위한 기상정보 DB를 구축하기 위해 기온, 습도, 바람 UV 벡터, 강수량 등 5가지 항목의 자료를 수집하였다. 시간 단위

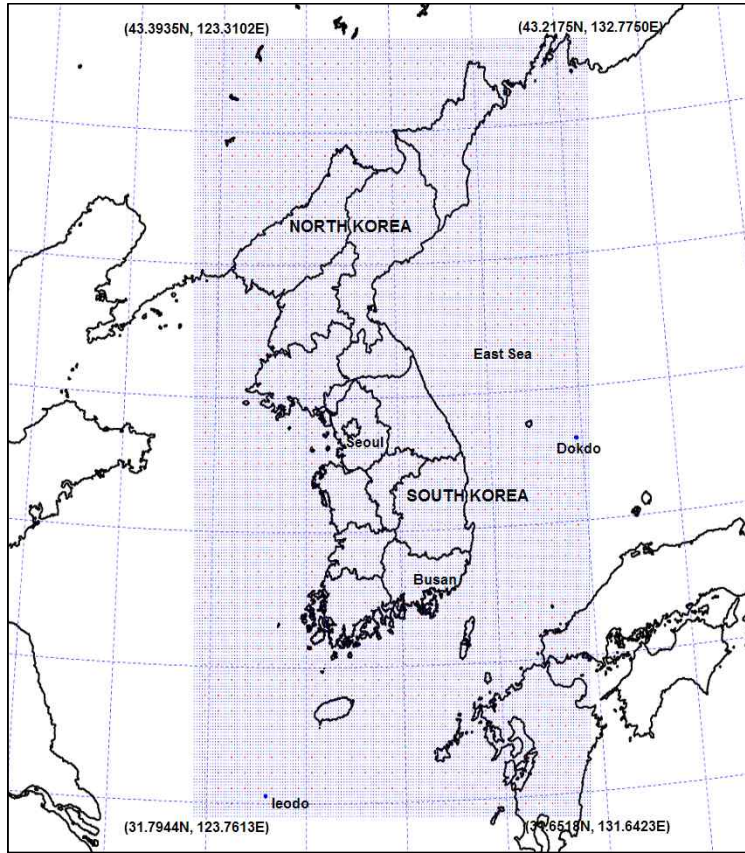


FIGURE 3. Domain of digital weather data. East/West 149×South/North 253, total 37,697 points.

의 ASCII 형식을 갖는 방대한 양의 자료 전처리를 위해 프로그래밍을 통한 자동화 처리 방법을 고안하여 적용하였다. 풍속은 바람 UV벡터 자료를 이용하여 산출하였다.

4. 접근불능지역의 DWI 개발을 위한 통계 모형 선정

본 연구에서는 접근불능지역의 산불발생위험도를 예측하기 위하여 산불발생과 관련이 있는 기상요인으로 기온, 습도, 풍속 등 기상정보를 이용하여 일일 산불위험지수(Daily Weather Index, DWI)를 개발하였다. 모형 개발을 위해 2011년부터 2015년까지 최근 5년간 MOD14 product에서 추출한 산불발화지점(fire spot)

자료를 이용하여 산불발생에 영향을 주는 기상요인을 구명하기 위하여 산불발생 유무를 종속변수(Dependent variable)로, 산불발생 관련 기상요인들을 독립변수(Independent variable)로 하여 로지스틱 회귀모형(Logistic regression model)을 적용하여 산불발생확률을 추정하였다.

특정일의 산불발생확률모형은 시계열 기상자료(산불발생과 연관성이 규명된 기상요인)와 산불발생의 유무를 나타내는 더미변수(Dummy variables)를 이용하여 산불발생확률모형을 개발하였다. 즉, 산불발생의 유무인 더미변수를 종속변수로 놓고, 산불발생과 영향이 있는 기상요인들을 독립변수로 주었을 때의 회귀모형(Regression model)은 다음 식 1과 같이 표현

될 수 있다.

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

산불발생추정모형의 종속변수인 산불발생유무의 현황자료는 2011년에서 2015년까지 5년간의 산불발생 현황자료를 이용하였다. 설명변수인 해당지역의 일별 기상변수는 크게 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온, 일평균상대습도, 일최소상대습도, 실효습도, 일평균풍속, 일최대풍속 등을 이용하였다. 실효습도는 당일과 전일들의 상대습도에 가중치를 붙여 얻어지는 평균습도로, 본 연구에서는 적용한 실효습도는 식 2와 같이 당일의 상대습도를 포함하여 5일간 상대습도의 누적치를 이용하였으며, 실효습도 계수(r)는 0.7을 사용하였다(Hong, 1987).

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

여기서 H_e 는 실효습도, H_0 은 당일의 상대습도, H_n 은 n일 전의 상대습도, r: 실효습도 계수(0.7)를 의미한다.

결과 및 고찰

1. 접근불능지역에서 추정된 산불발생 특성

MOD14로부터 추출된 접근불능지역의 산불 정보는 2011년부터 2015년까지 5년간 하루에 두 건씩 총 3,650개의 영상으로부터 산출되었다. 일차적으로 MOD14로부터 추출된 3,637건의 fire spot 정보는 그림 2의 가설에 의해 동일 산불로 추정된 지점들을 제거했을 경우 총 1,469건으로 약 60%가 줄어 든 것으로 나타났다(그림 4).

가장 많은 산불이 발생한 것으로 추정되는 2014년은 2월부터 4월까지 북한의 평균 강수량이 23.5mm로 32년 만에 가장 적은 강수량이

관측되면서 극심한 가뭄 현상의 영향인 것으로 추정된다(Korea Meteorological Administration, 2015). 추정된 연도별 산불발생을 월별로 분석한 결과, 3월부터 5월까지 산불이 집중적으로 발생한 것으로 나타났다(표 1). 특히, 최근 5년 동안 동일하게 4월에 산불이 집중적으로 발생하였는데, 이러한 결과는 Lee *et al.*(2016)이 수행한 16년간(2000~2015년) 한반도 산불발생 GIS 데이터베이스 구축 연구에서 분석된 결과와 동일한 것으로 나타났다. 이러한 접근불능지역의 월별 산불발생 경향은 2월부터 발생빈도가 서서히 높아지기 시작하면서 5월에는 점차 발생빈도가 낮아지는 남한의 봄철 산불발생 패턴과 유사한 것으로 나타났다(An *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2006; Won *et al.*, 2011, 2011; Yoon *et al.*, 2016). 최근 5년간 북한의 월별 산불발생은 4월이 64.3%를 차지하여 가장 높은 빈도를 보였으며, 다음으로 5월(18.7%)과 3월(11.2%) 순으로 산불이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 시기적으로는 3월과 4월에 산불발생이 집중되는 남한과 비교하여 1개월 가량 늦은 4월과 5월에 산불이 다발하는 경향을 보였다.

가설에 의해 재분석된 최근 5년간 접근불능지역의 산불발생 공간분포를 파악하기 위해 1km 공간해상도로 커널밀도분석(Kernel density analysis)을 수행한 결과, 대다수의 산불이 강원도와 함경도 등 백두대간 지역을 중심으로 집중되는 경향을 보였다(그림 5). 이는 매년 봄철에 불어오는 북서 계절풍의 영향으로 강원도 태백산맥에서 편 현상으로 인해 동해안 일대가 고온 건조해지면서 산불발생위험성이 높아져 산불 발생빈도가 높았을 것으로 판단된다. 최근 5년간 북한의 행정구역별(3개 시·9개 도) 산불발생 빈도는 강원도가 총 381건(25.9%)으로 가장 높았고, 다음으로 함경남도과 함경북도가 각각 248건(16.9%), 234건(15.9%)으로 나타났다.

특이한 점은 내륙지역뿐만 아니라 남·북한의 접경지역에서도 산불이 빈번하게 발생하고 있다는 것이다. 남·북한이 접경하고 있는 비무장지대에서도 많은 산불이 탐지되었으며, 중국과 인접한 함경북도 회령 부근에서도 많은 산불이 탐

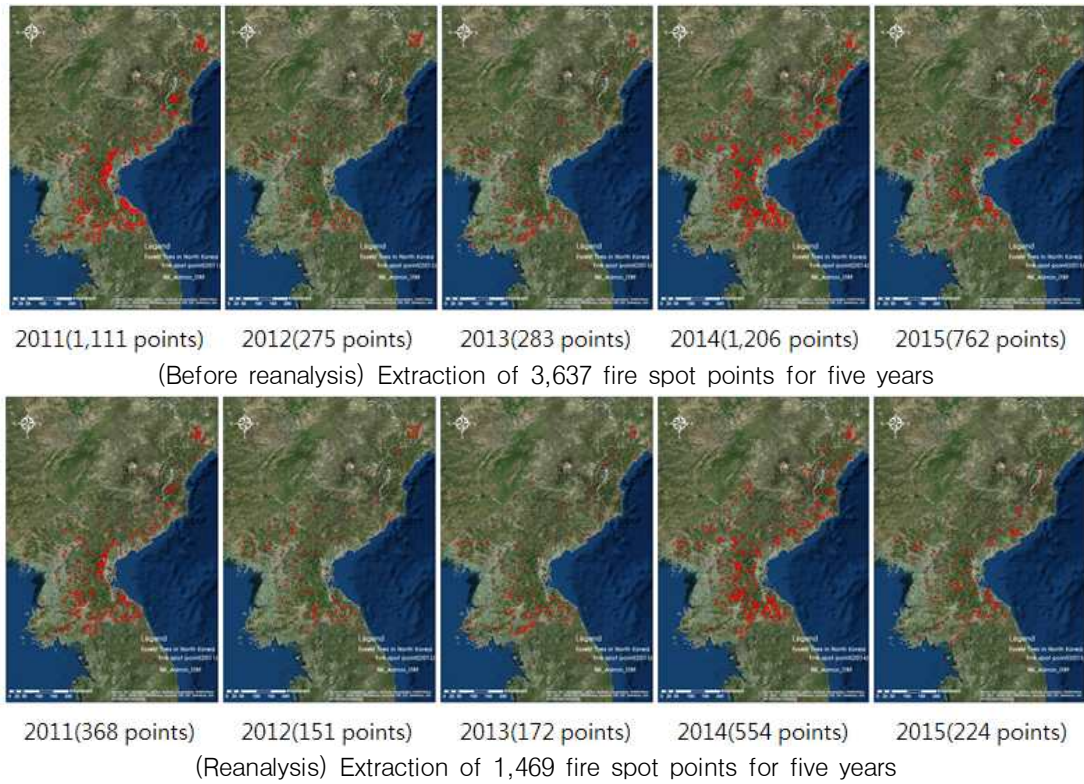


FIGURE 4. Fire spot points extracted from MOD14 product by year

TABLE 1. Monthly estimates of forest fire in North Korea extracted from MOD14 product(from 2011 to 2015)

	2011		2012		2013		2014		2015	
	Fire	Ratio(%)	Fire	Ratio(%)	Fire	Ratio(%)	Fire	Ratio(%)	Fire	Ratio(%)
Jan	3	0.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.4
Feb	5	1.4	8	5.3	2	1.2	0	0.0	2	0.9
Mar	46	12.5	4	2.6	22	12.8	32	5.8	61	27.2
Apr	260	70.7	67	44.4	74	43.0	424	76.5	120	53.6
May	28	7.6	71	47.0	57	33.1	91	16.4	27	12.1
Jun	0	0.0	0	0.0	5	2.9	2	0.4	8	3.6
Jul	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	0.5	0	0.0
Aug	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.2	0	0.0
Sep	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.2	1	0.4
Oct	15	4.1	0	0.0	7	4.1	0	0.0	4	1.8
Nov	10	2.7	1	0.7	5	2.9	0	0.0	0	0.0
Dec	1	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Total	368	100.0	151	100.0	172	100.0	554	100.0	224	100.0

지되었다. 이러한 결과로 비취볼 때 접근불능지역의 내륙지역뿐만 아니라 접경지역에서도 많은

산불이 발생하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 비무장지대의 경우 우리나라 안보와

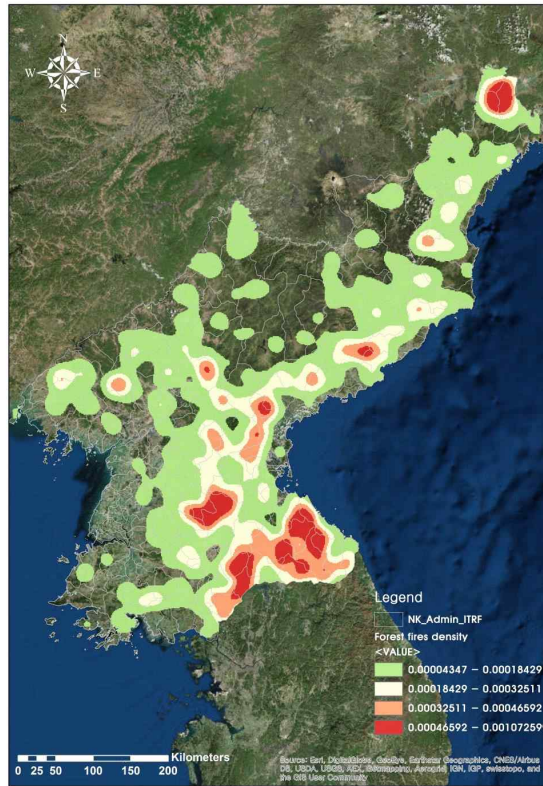


FIGURE 5. Frequency of forest fire in North Korea from 2011 to 2015.

밀접하게 연관되어 있으므로 산불예방 및 관리를 위한 과학적인 기초정보의 생산이 필요하다고 판단된다.

2. 접근불능지역의 산불기상위험지수 산출 모형 개발

접근불능지역에 대한 산불기상위험지수(Fire Weather Index, FWI) 산출을 위해 재분석을 통해 추출된 총 1,469개 산불발화지점을 대상으로 산불 발생과 관련이 있는 기온, 습도, 풍속 등의 기상정보를 추출하였다. 본 연구에서는 산불 발생에 영향을 미치는 기상요인을 구명하기 위해 로지스틱 회귀모형(Logistic regression model)을 이용하였으며 종속변수(Dependent variable)와 독립변수(Independent variable)

는 산불발생 유무와 산불발생 관련 기상요인으로 설정하였다. 기상에 의한 산불발생확률모형에 대한 기상입력 변수의 선정은 상관분석을 통해 기상청 5km 재분석 자료에서 획득 가능한 기상요소들 중 산불이 발생한 날에서 높은 상관성을 갖는 기온(평균, 최고, 최저), 상대습도(평균, 최소), 실효습도, 풍속(평균, 최대), 강수량을 이용하였다. 기상에 의한 산불발생확률모형 입력자료 간의 상관관계는 표 2와 같이 나타났다.

접근불능지역의 산불기상위험지수 산출 모형은 산불발생위치에서의 시계열 기상자료와 산불발생의 유무 정보로부터 로지스틱 회귀모형을 이용하여 산출하였다. 입력 자료는 재분석된 1,469개의 발화지점에 대한 산불발생일의 기상정보와 산불발생 전·후 3일 간의 비 발생일 정

TABLE 2. Estimated correlation matrix between weather variables that affect the outbreak of forest fires (T1D_avg: average temperature of the fire day(°C), T1D_max: maximum temperature of the fire day(°C), T1D_min: minimum temperature of the fire day(°C), RH1D_avg: average relative humidity of the fire day(%), EH1D_avg: average effective humidity of the fire day(%), WS1D_avg: average wind speed of the fire day(m/s)).

Parameter	T1D_avg	T1D_max	T1D_min	RH1D_avg	RH1D_min	EH1D_avg	WS1D_avg	WS1D_max
Coefficient	-0.0536**	-0.1104**	0.2036**	-0.2282**	0.3213**	-0.4296**	-0.4152**	0.1234**

**p<0.01

TABLE 3. The result of logistic regression analysis between forest fire occurrence and weather variables.

Variables	Coefficient estimated	Std. E	Wald-value	Pr>χ²
Intercept	-2.7425	0.2587	112.3371	<.0001
T1D_avg	-0.0664	0.0444	2.2346	0.1349
T1D_max	0.0905	0.0247	13.4266	0.0002
T1D_min	0.0116	0.0230	0.2545	0.6139
RH1D_avg	-0.0050	0.0061	0.6909	0.4059
RH1D_min	-0.0517	0.0056	84.1784	<.0001
EH1D_avg	0.0334	0.0065	25.8035	<.0001
WS1D_avg	0.1283	0.0273	22.1316	<.0001
WS1D_max	-0.0077	0.0140	0.3035	0.5817

보 10,283개를 이용하였다. 접근불능지역에 대한 로지스틱 회귀모형을 분석한 결과, 산불발생에 영향을 주는 기상인자는 일 최고기온, 일 최저상대습도, 실효습도, 평균 풍속이 99% 신뢰수준에서 유의한 것으로 나타났다(표 3). 산불 발생과 기상 요소간의 관계는 일 최소상대습도는 음(-)의 관계를 보였으며, 일 최고기온과 평균 풍속은 양(+)의 관계를 보였다. 다시 말하면 북한에서의 산불발생확률은 상대습도가 낮고 기온이 상승하고 풍속이 강할수록 높아지는 것으로 나타나 일반 기대이론과 부합하는 것으로 나타났다. 추정모형의 적합도는 X2-값과 표본 내 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 X2-값은 1,207.6659로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며 표본 내 추정모형의 예측력은 66.6%로 분석되었다. 또한 산불발생에 영향을 미치는 기상요인들의 추정모형에 대한 적합도는 일

최고기온이 13.4266, 일 최소상대습도 84.1784, 실효습도 25.8035, 평균풍속 22.1316로 99% 신뢰 수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 결과적으로 북한의 산불기상위험지수 산출 모형은 식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$Pr = [1 + \exp\{-(2.745 + (0.0905 \times \text{일최고기온}) - (0.0517 \times \text{일최저상대습도}) + (0.0334 \times \text{실효습도}) + (0.1283 \times \text{평균풍속}))\}]^{-1} \quad (3)$$

3. 접근불능지역의 FWI 추정 확률구간의 설정 및 모형의 신뢰도 검증

최근 5년간 접근불능지역에서 산불이 발생한 것으로 추정되는 지점들을 대상으로 기상청 5km 해상도의 기상자료(기온, 습도, 풍속)를 독립변수로, 산불발생 일을 종속변수(발생일 1, 비발생일 0)로 설정하여 확률모형으로 변환할 수 있는 로지스틱 모형을 적용하여 통계적으로 유의

TABLE 4. Estimated interval rate of fire weather index(FWI) in North Korea

Ratio interval	FWI	Estimated interval rate
10%	1	[.00000 ~ .11138]
20%	2	[.11139 ~ .16559]
30%	3	[.16560 ~ .21032]
40%	4	[.21033 ~ .25141]
50%	5	[.25142 ~ .29238]
60%	6	[.29239 ~ .33452]
70%	7	[.33453 ~ .37828]
80%	8	[.37829 ~ .43005]
90%	9	[.43006 ~ .49471]
100%	10	[.49472 ~ .10000]

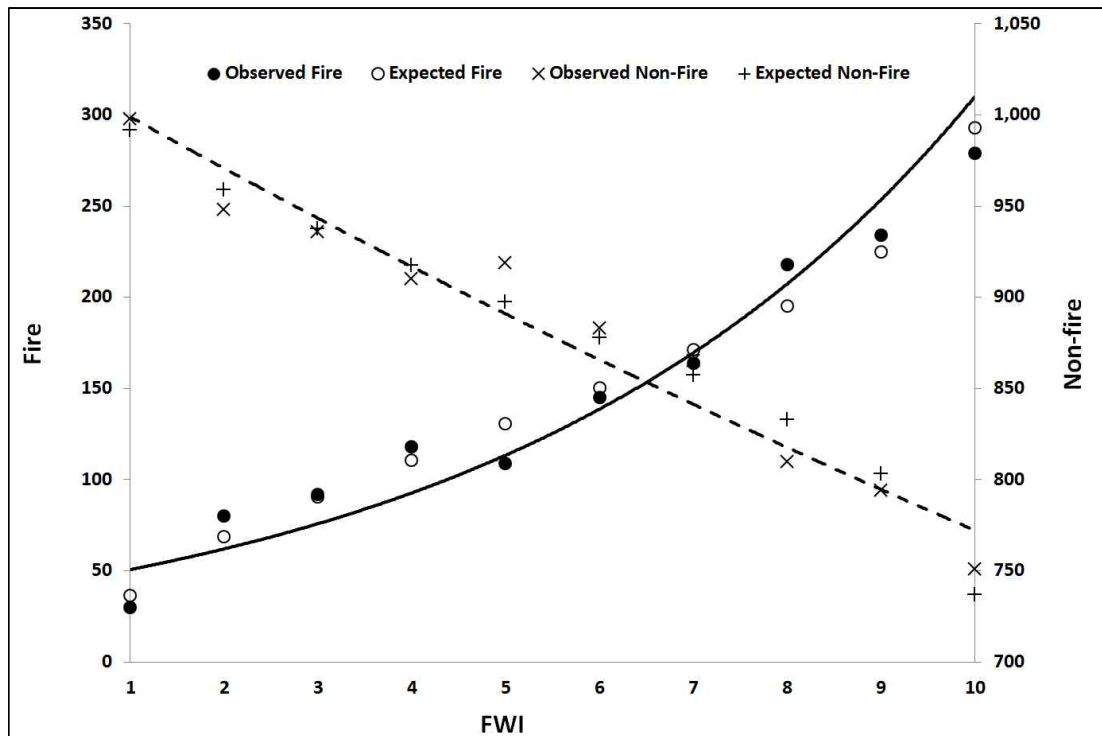


FIGURE 6. The verification of fire weather index(FWI) model.

한 FWI 산출 모형을 개발하였다. 접근불능지역에 대한 FWI 추정 확률구간의 설정은 본 연구를 통해 얻어진 전체 예측치를 이용하여 10%

구간별 백분위수를 추정하였고, 해당 예측 확률구간을 지수화하여 설정하였다(표 4).

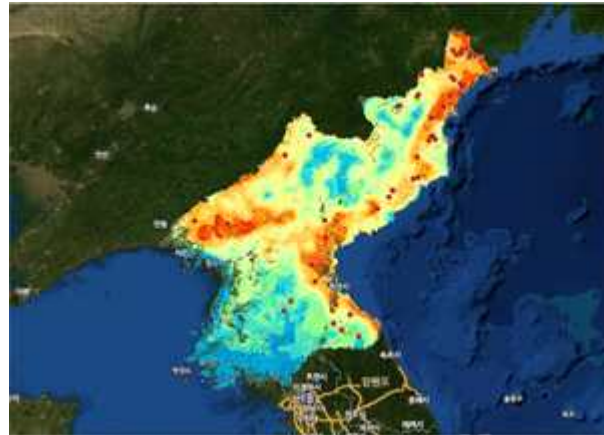
여기서는 이들 FWI 추정모형이 얼마나 예측

력이 뛰어난 가를 검토하기 위하여 분석에 이용된 시계열 기상인자를 추정모형에 대입하여 산불기상위험지수를 계산하는 사후검정 분석을 실시하였다. 추정된 FWI를 산불발생일과 비발생일로 구분하여 모형의 신뢰성을 검정하였다. 그 결과는 그림 6과 같다. 실제로 기상에 의한 산불발생위험도를 판정할 수 있는 지표인 FWI가 높아질수록 산불이 발생하는 날이 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 개발된 추정모형이 산불에 취약한 기상환경으로 변할수록 산불발생의 위험정도를 매우 잘 예측할 수 있는 모형이라는 것을 의미한다. 실제로 산불이

발생한 날의 확률이 실제로 산불이 발생하지 않았던 날보다 추정 예측값이 높다는 것을 확인할 수 있다.

4. FWI 산출모형을 적용한 산불위험지도 작성

접근불능지역을 대상으로 개발한 산불기상위험지수 산출 모형을 이용하여 실시간 기상변화에 의한 산불위험지도를 작성하였다. 지도 작성을 위해 산불이 다발하였던 2014년 4월 중 산불이 가장 많이 발생하였던 4월 15일(51건)과 25일(70건), 함경북도를 제외한 북한 전지역의 강수로 인해 산불이 적게 발생하였던 4월 27일

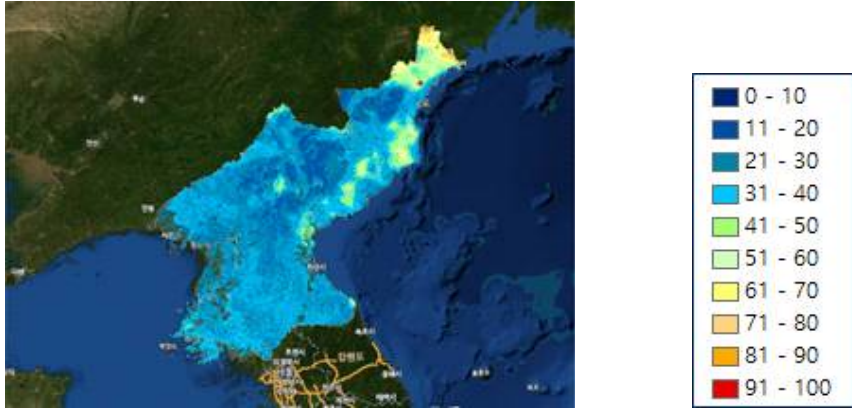


(a) 2014.4.15. KST 1500



(b) 2014.4.25. KST 1500

FIGURE 7. A case study of forest fire hazard map by fire weather index model in North Korea



(c) 2014.4.25. KST 1500

FIGURE 7. Continued


(1건)을 대상으로 하였으며, 산불위험지수를 1부터 100까지로 환산하여 연구를 수행하였다. 2014년 4월 15일에 51건의 산불이 발생한 것으로 추정되는 지점의 산불위험지수는 전반적으로 높게 나타났으며 모델에서 예측된 산불위험 등급별로 산불발화지점에 대한 정확도를 평가한 결과(그림 7), ‘매우 높음(86 이상)’ 지역에서 13.7%, ‘높음(66~85)’ 지역에서 60.8%, ‘보통(51~65)’ 지역에서 11.8%, ‘위험낮음(51 미만)’ 지역에서 13.7%로 나타났다. 이 시기에는 산불위험등급이 ‘보통’ 이상에서 실제 산불 발생예측 정확도가 86.3%였다. 총 70건의 동시다발적인 산불이 발생한 것으로 추정되는 2014년 4월 25일에는 산불발생지점별 산불위험등급은 ‘매우 높음’이 7.1%, ‘높음’ 60.8%, ‘보통’ 24.3%, ‘위험 낮음’이 8.6%로 나타났으며, 보통 이상 등급에서의 모델 정확도는 91.4%로 나타났다. 반면 접근불능지역에 강우가 탐지되었던 2014년 4월 27일은 단 1건의 산불이 발생한 것으로 추정되었으며, 산불발생지점의 산불위험지수는 58.0으로 산불위험등급은 보통으로 나타났다.

결 론

본 연구는 북한 및 비무장지대 등 접근불능지

역의 산불기상위험지수(FWI) 산출 모형 개발을 위해 MODIS 산불 자료를 활용하여 산불발생정보를 수집하였다. Terra MODIS로부터 산출된 산불정보(총 3,637개)로부터 산불 확산 등으로 인한 중복된 산불발생지점을 제거함으로써 5년간(2011~2015년)의 산불발화지점(총 1,469개) 정보를 최종 추출하였다. 최근 5년간 접근불능지역에서 발생한 산불의 공간분포 경향은 백두대간을 중심으로 강원도와 함경남·북도에서 산불발생빈도가 높게 나타났으며, 비무장지대(DMZ)에서도 다수의 산불이 발생한 것으로 나타났다. 특히, 봄철 시기인 2월부터 산불발생이 증가하기 시작하면서 4월에는 가장 높은 산불발생빈도를 보이다가 5월부터는 감소하는 경향을 보였다. 산불기상위험지수 모형 개발을 위해 기상청으로부터 수집한 한반도 5km 초단기 실황 재분석 자료를 이용하여 산불발생지점에 대한 기상변수를 추출하였다. 그리고 재분석된 산불발생지점을 대상으로 추출한 기상정보를 기반으로 로지스틱 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 산불 발생에 영향을 주는 주요한 기상인자는 일최고기온, 일최저상대습도, 실효습도, 평균풍속으로 나타났으며, 모두 99%의 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 추정결과 X^2 -값은 일최고기온이 13.4266, 일최소상대습도 84.1784, 실효습도 25.8035, 평균풍속

22.1316으로 99% 신뢰수준에서 유의성이 있었으며, 표본내 예측력은 재분석 전·후가 동일한 68.6%로 모형의 적합도는 비교적 높은 것으로 나타났다. 접근불능지역에 대한 산불기상위험지수의 설정은 본 연구를 통해 얻어진 전체 예측치를 이용하여 10% 구간별 백분위수를 추정하였고, 해당 예측 확률구간을 지수화하여 설정하였다. 모형에 의한 추정된 산불발생일과 비발생일의 산불기상위험지수 빈도를 비교한 결과, 접근불능지역의 산불발생위험예측이 잘 수행되고 있음을 최종 확인되었다.

최근 북한의 강원도 등을 포함한 접근불능지역에서 발생하는 대형산불과 비무장지대에서 남하하는 산불이 빈번하여 이에 대한 대응이 필요한 실정이다. 향후 한반도 산불위험예보 정보는 국토안보 및 재해 유관부처 등에서 재해감시, 군 작전 정보는 물론 DMZ 인근 지자체에서 봄철 건조기에 남하하는 산불 위험성을 실시간으로 모니터링하여 대응할 수 있는 등 다양한 분야에서 활용도가 높은 자료로 부처간의 협업을 통해 신뢰성 있는 산불정보 생산과 공동 활용이 요구된다. 

REFERENCES

- An, S.H., M.S. Won, D.H. Kim, Y.H. Kang, M.B. Lee and S.Y. Lee. 2005. Classification of forest fire risk and hazard regions in Uiseong-gun. *Journal of the Korean Association of Geographical Information Studies* 8(2):117-124 (안상현, 원명수, 김동현, 강영호, 이명보, 이시영. 2005. 의성군 지역 산불발생 및 대형화 위험 지역 구분. *한국지리정보학회지* 8(2):117-124).
- Cunningham, A.A. and D.L. Martell. 1972. A stochastic model for the occurrence of man-caused forest fires. *Canadian Journal of Forest Research* 3:282-287.
- Choi, G., J. Kim and M.S. Won. 2006. Spatial Patterns and Temporal Variability of the Haines Index related to the Wildland Fire Growth Potential over the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society* 41(2):168-187 (최광용, 김준수, 원명수. 2006. 한반도 산불 확장 잠재도와 관련된 Haines Index의 시·공간적 특징. *대한지리학회지* 41(2):168-187).
- Davis, K.P. and A.A. Brown. 1959. Fire in the Forests. In: *Forest Fire Control and Use Second Edition*. McGraw-Hill. pp.3-259.
- Giglio L., J. Descloitres, C.O. Justice and Y.J. Kaufman. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87:273-282.
- Hong, S.K. 1987. *Meteorology and fire*. Kyohak Research Press. pp.67-71 (홍성길. 1987. 기상과 화재. *교학연구사*).
- 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 characteristics in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 6(4):242-249 (이시영, 한상열, 원명수, 안상현, 이명보. 2004. 기상특성을 이용한 전국 산불발생확률모형 개발. *한국농림기상학회지* 6(4):242-249).
- Lee, S.Y., M.S. Won and S.Y. Han. 2005. Developing of forest fire occurrence danger index using fuel and topographical characteristics on the condition of ignition point in Korea. *Korean Institute of Fire Science & Engineering* 19(4):75-79 (이시영, 원명수, 한상열. 2005. 산불발화지점의 임상 및 지형특성을 이용한 산불발생위험지수 개발. *한국화재소방학회지* 19(4):75-79).
- Lee, S.J., M.S. Won, K.C. Jang, B.D. Lee,

- S.W. Byun, K.J. Kim and Y.W. Lee. 2016. Construction of GIS Database for wildfire in the Korean Peninsula using MODIS data. *Journal of the Korean Cartographic Association* 16(3):129-137 (이수진, 원명수, 장근창, 이병두, 변상우, 김광진, 이양원. 2016. MODIS 위성자료를 이용한 한반도 산불발생 GIS 데이터베이스 구축. *한국지도학회지* 16(3):129-137).
- National Institute of Forest & Science, Korea Forest Service. Korean Forest Fire Danger Rating System. www.forestfire.nifos.go.kr (산림청 국립산림과학원. 국가산불위험예보시스템. www.forestfire.nifos.go.kr).
- Kang, S.C., M.S. Won and S.H. Yoon. 2016. Large fire forecasting depending on the changing wind speed and effective humidity in Korean red pine forests through a case study. *Journal of the Korean Association of Geographical Information Studies* 19(4):146-156 (강성철, 원명수, 윤석희. 2016. 사례분석을 통한 소나무림에서의 풍속과 실효습도 변화에 의한 대형산불위험예보. *한국지리정보학회지* 19(4):146-156).
- Korea Centre for Atmospheric Environment Research. 2012. Study on detection of forest fires and air-pollution using satellites p.125 (고려대기환경연구소, 2012. 인공위성을 이용한 산불 탐지 및 대기오염 관측에 관한 연구보고서. 125쪽).
- Korea Forest Research Institute. 2008. Degraded forest survey of North Korea with SPOT imagery. p7 (국립산림과학원, 2008. 위성영상자료를 이용한 북한지역 산림 황폐지 실태 파악. 7쪽).
- Korea Forest Service. 2015. Statistical Yearbook of Forestry. 44 (산림청. 2015. 임업통계연보. 제44권).
- Korea Meteorological Administration. 2015. Abnormal Climate Report 2014 p.169(기상청. 2015. 2014 기상이후 보고서. 169쪽)
- 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 (성미경, 임규호, 최은호, 이윤영, 원명수, 구교상. 2010. 기후변화에 따른 한반도 산불발생의 시공간적 변화 경향. *대기* 20(1):27-35).
- Won, M.S., K.S. Koo and M.B. Lee. 2006. An analysis of forest 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 (원명수, 구교상, 이명보. 2006. 우리나라의 봄철 10일 간격 온습도 변화에 따른 산불발생위험성 분석. *한국농림기상학회지* 8(4):250-259).
- Won, M.S., S.Y. Lee, M.B. Lee and S. Ohga. 2010a. 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., M. Danesh, K.S. Koo, M.B. Lee and M.Y. Shin. 2010b. Meteorological determinants of forest fire occurrence in the fall, South Korea. *Journal of Korean Forest Society* 99(2):163-171.
- 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 the Korean Association of Geographical Information Studies* 14(3):150-162 (원명수, 윤석희, 구교상, 김경하, 2011. 1990년대와 2000년대 건조계절의 산불발생 시공간 변화 분석.

- 한국지리정보학회지 14(3):150-162).
- Won, M.S., M.B. Lee, W.K. Lee and S.H. Yoon. 2012. Prediction of forest fire danger rating over the Korean Peninsula with the digital forecast data and daily weather index(DWI) model. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 14(1):1-10 (원명수, 이명보, 이우균, 윤석희. 2012. 디지털예보자료와 Daily Weather Index(DWI) 모델을 적용한 한반도의 산불발생위험 예측. 한국농림기상학회지 14(1):1-10).
- Won, M.S., S.H. Yoon and K.C. Jang. 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 (원명수, 윤석희, 장근창. 2016. 2000년대 기후변화를 반영한 봄철 산불발생확률모형 개발. 한국농림기상학회지 18(4):199-207).
- Yoon, S.H. and M.S. Won. 2016. Correlation analysis of forest fire occurrences by change of standardized precipitation index. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 19(2): 14-26 (윤석희, 원명수. 2016. SPI 변화에 따른 산불발생과의 관계 분석. 한국지리정보학회지 19(2):14-26). **KAGIS**