

기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수의 우리나라 산불발생에 대한 민감도분석*

Sensitivity Analysis of Meteorology-based Wildfire Risk Indices and Satellite-based Surface Dryness Indices against Wildfire Cases in South Korea

공인학** · 김광진*** · 이양원****
Kong, Inhak · Kim, Kwangjin · Lee, Yangwon

Abstract

There are many wildfire risk indices worldwide, but objective comparisons between such various wildfire risk indices and surface dryness indices have not been conducted for the wildfire cases in Korea. This paper describes a sensitivity analysis on the wildfire risk indices and surface dryness indices for Korea using LDAPS(Local Analysis and Prediction System) meteorological dataset on a 1.5-km grid and MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) satellite images on a 1-km grid. We analyzed the meteorology-based wildfire risk indices such as the Australian FFDI(forest fire danger index), the Canadian FFMC(fine fuel moisture code), the American HI(Haines index), and the academically presented MNI(modified Nesterov index). Also we examined the satellite-based surface dryness indices such as NDDI(normalized difference drought index) and TVDI(temperature vegetation dryness index). As a result of the comparisons between the six indices regarding 120 wildfire cases with the area damaged over 1ha during the period between January 2013 and May 2017, we found that the FFDI and FFMC showed a good predictability for most wildfire cases but the MNI and TVDI were not suitable for Korea. The NDDI can be used as a proxy parameter for wildfire risk because its average CDF(cumulative distribution function) scores were stably high irrespective of fire size. The indices tested in this paper should be carefully chosen and used in an integrated way so that they can contribute to wildfire forecasting in Korea.

Keywords: Wildfire risk index, Surface dryness index, Sensitivity analysis, Numerical weather prediction, Satellite remote sensing

* 본 연구는 기상청 국가기상위성센터 “정지궤도 기상위성 지상국 개발 (NMSC-2017-01)” 사업의 일환으로 ETRI에서 추진하는 “융합분야 활용기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

** 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보공학전공 석사과정 Pukyong National University (zzang1454@gmail.com)

*** 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보공학전공 박사과정 Pukyong National University (somakkj@gmail.com)

**** 교신저자, 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보공학전공 교수 Pukyong National University (modconfi@pknu.ac.kr)

1. 서론

우리나라의 산불은 낙뢰 등에 의한 자연발화보다는 인간활동 과정에서 발생하는 실화에 의한 경우가 대부분이다. 또한 계절적 특성이 뚜렷하여, 최근 5년 동안(2012~2016) 발생한 산불발생 빈도를 보면 2월부터 5월까지 봄철에 집중됨을 알 수 있는데, 이는 건조한 연료, 적은 강수량, 강한 바람, 입산자의 증가 때문이라고 할 수 있다(이시영 외 2001). 산불은 한번 발생하면 지세, 급수, 장비, 인원동원 등의 제약으로 인해 효과적인 진화가 어려워, 빠른 시간 내에 넓은 면적으로 확산되는 경우가 많다. 따라서 산불을 예방하는 것은 산림과 재산 보호에 있어 매우 중요하다.

산불은 기상인자의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 산림자원이 풍부한 해외주요국의 산불위험모형에서는 무강수 일수, 기온과 이슬점온도의 차이, 습도, 풍속 등을 이용하여 대기 및 지면의 건조도를 추정하고 이를 통해 산불위험도를 계산하는 것이 일반적이다. 호주의 FFDI(forest fire danger index)나 캐나다의 FFMC(fine fuel moisture code) 등이 정부기관에서 제공되는 대표적인 산불위험지수이다. 이들은 각국의 산림환경에 맞추어 경험적으로 계수가 설정되었으므로 우리나라에서의 적용가능성에 대해서는 객관적인 성능평가가 필요하다.

우리나라의 경우 이시영 외(2004)와 원명수 외(2012)의 연구에서는 기상인자와 산불발생 이력자료를 이용한 로지스틱 회귀모형을 수립하여 산불위험도를 산출하는 성과를 거두었으며, 이 모형은 산림청의 산불위험예보시스템에 적용되어 운용 중에 있다. 그러나 아직까지는 점단위의 기상자료를 공간내삽으로 격자화하여 입력자료로 사용하고 있는데, 지표면의 공간이질성이 반영되지 않은 물리적 거리기반의 격자형 기상자료를 입력변수로 사용하여 산불위험도를 산출한다는 점에서는 개선의 여지가 있다.

최근 학계에서 시도되고 있는 또 다른 방법으로서, 위성센서의 지면반사도로부터 식생지수나 수분지수를 계산하고 이를 이용하여 산불위험도를 평가하는 연구도 이루어지고 있다. 위성기반의 식생지수로는 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 위성센서에서 산출된 NDVI(normalized difference vegetation index)나 EVI(enhanced vegetation index)가 주로 활용된다. 식생상태의 변화를 산림의 건조도 및 산불위험도로 연결시키는 방법(Bisquert et al. 2014)과 더불어, 식생지수 NDVI와 수분지수 NDWI(normalized difference water index)를 결합하여 지면건조도를 평가하는 NDDI(normalized difference drought index) (Gu et al. 2007), 그리고 NDVI와 LST(land surface temperature)를 결합한 형태인 TVDI(temperature vegetation dryness index) (Sandholt et al. 2002) 등이 제시되어 활용되고 있다.

2013년부터 공개되고 있는 기상청의 국지예보모형(Local Analysis and Prediction System: LDAPS)은 1.5km 해상도의 지면특성정보를 반영한 격자형 기상자료를 매3시간마다 생산하고 있다. 지면, 대류, 복사 등의 물리과정을 모사하고 3차원 변분법을 통해 시공간적으로 불규칙하게 분포하는 관측자료를 예보모형

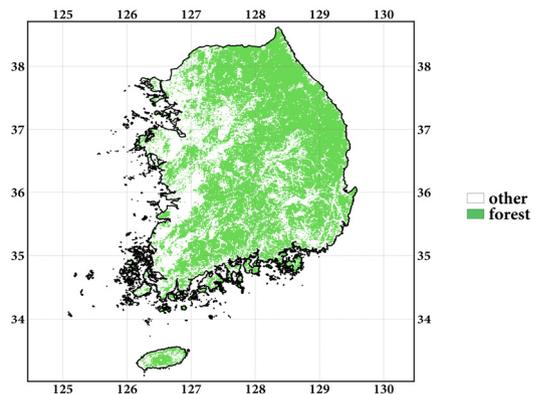


Figure 1. Study area classified by land cover type

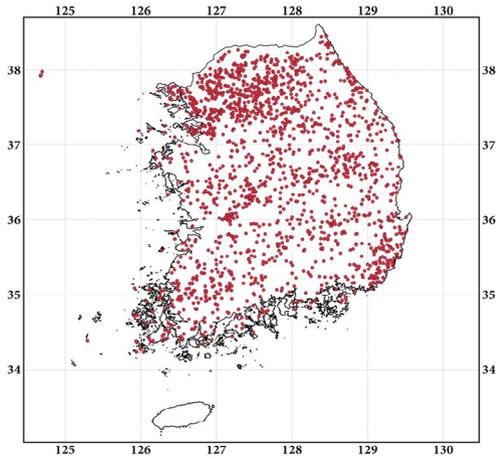


Figure 2. Spatial distribution of wildfire occurrences (2013.01.29.~2017.05.31.)

에 동화시켜 정확도를 향상시켰으므로(Walters et al. 2017), 기상자료 기반의 산불위험도 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

현재 세계적으로 다양한 기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수가 존재하고 있으나, 우리나라의 산불발생에 대한 적용가능성을 객관적인 평가한 연구는 아직 보고된 바가 없다. FFDI, FFMC 등의 기상기반 산불위험지수와 NDDI, TVDI 등의 위성기반 지면건조지수는, 로지스틱 회귀모형을 이용하여 산불

발생 확률을 0에서 1 사이 값으로 예측하는 우리나라 산림청의 산불위험예보시스템과는 다소 다른 접근법이기에 때문에, 우리나라 산불예보의 발전을 위하여 오히려 더욱 면밀히 분석해볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 1.5km 격자의 LDAPS 기상자료 및 1km 격자의 MODIS 위성자료를 활용하여 각종 기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수를 산출하고 우리나라 산불발생에 대한 민감도분석을 수행하고자 한다. 기상기반 산불위험지수로는 호주정부의 FFDI, 캐나다정부의 FFMC, 미국정부의 HI(Haines index)와 함께 학술연구에서 제시된 MNI(modified Nesterov index), 그리고 위성기반 지면건조지수로는 NDDI와 TVDI를 산출하고, 최근 4-5년간 우리나라의 주요 산불발생 자료를 이용하여 이들 6개 지수의 민감도분석을 수행하여, 이 지수들의 우리나라 산불발생에 대한 적용가능성을 종합적으로 분석하였다.

2. 연구지역과 사용자료

연구지역은 북위 33.027 ~ 38.8도, 동경 124.453 ~ 130.474도 사이의 우리나라 산림 영역으로 설정하였다(Figure 1). 또한 분석에 사용된 수치예보자료와 위성영상의 정보는 Table 1과 같이 요약된다. 기상기반

Table 1. Summary of data used in this study

Source: MODIS Products Table 2017

Data Type		Product characteristics	Resolution	
			Spatial	Temporal
Satellite Products (MODIS)	Surface Reflectance Level 3(MOD09A1)	Bands 1-7 at 500-meter resolution in an 8-day gridded level-3 product in the Sinusoidal projection	1km	8-day
	Land Surface Temperature Level 3(MOD11A2)	Composed from the daily 1-kilometer LST product (MOD11A1) and stored on a 1-kilometer Sinusoidal grid as the average values of clear-sky LSTs during an 8-day period	1km	8-day
	Land Cover Type Level 3(MCD12Q1)	Five global land cover classification systems including IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme)	1km	Yearly
Numerical Weather Prediction	LDAPS(Local Data Assimilation and Prediction System)	78 meteorological variables on a 1.5-km grid with 781 rows and 602 columns	1.5km	3-hourly

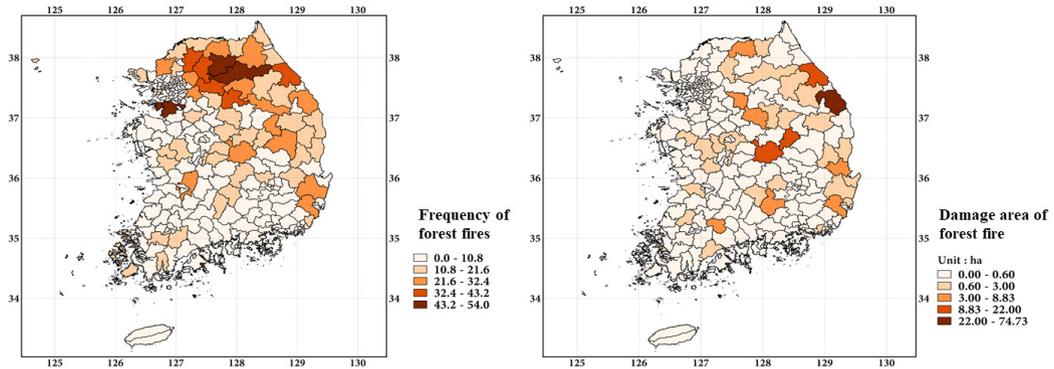


Figure 3. Frequency of wildfire occurrences and the size of burned area according to Si-Gun-Gu (2013.01.29.~2017.05.31.)

산불위험도를 계산하기 위해서는 기온, 습도, 강수량, 풍속 등의 변수가 필요한데, 본 연구에서 사용한 LDAPS 자료는 1.5km 공간해상도로 매3시간(1일 8회)의 실황장 및 36시간 예측장을 제공한다. 지면부근 기상상태를 나타내는 단일면 자료와 함께 고도에 따른 기상상태를 나타내는 등압면 자료를 사용하였으며, 연구기간은 LDAPS 자료와 MODIS 자료가 공통적으로 존재하는 2013.01.29 ~ 2017.05.31로 설정하였다. 위성기반 지면건조도의 계산에는 MODIS의 MOD09A1과 MOD11A2 산출물을 사용하였다. MOD09A1은 500m 해상도의 8일 합성 지면반사도 자료로서 품질 항목(quality flag)이 최상으로 기록된 화소만 추출하여 NDDI의 계산에 사용하였다. 또한 MOD11A2는 1km 해상도의 지면온도 자료로서 TVDI 계산에 사용하였다. MODIS 지면피복분류 산출물(MCD12Q1)로부터 산림에 해당하는 화소를 대상으로(Figure 1) 기상기반 산불위험도 FFDI, FFMC, HI, MNI, 그리고 위성기반 지면건조도 NDDI, TVDI를 산출하였다.

2013.01.29. ~ 2017.05.31. 기간에 대하여 산출된 기상기반 산불위험도 및 위성기반 지면건조도를 우리나라의 실제 산불발생 자료와 비교하였다. 산림청에서 제공하는 산불발생위치도 API(application programming interface)와 산불발생통계 API는 공공데이터포털

(<https://www.data.go.kr/>)을 통해 이용하였으며, 산불피해대장은 산림청 웹사이트(<http://www.forest.go.kr>)를 통해 제공받았고, 필요시 지오코딩을 통해 주소를 지리좌표로 변환하였다. 2013년 1월 29일부터 2017년 5월 31일 사이에 발생한 1,888건의 산불에 대한 DB가 구축되었으며, 구성 필드는 Table 2와 같다. 기간 중 산불의 공간분포는 Figure 2와 같다. 이를 시군구 단위로 집계하면 춘천시, 횡성군, 화성시가 각각 54건, 51건, 46건으로 가장 발생빈도가 높았다. 또한 산불의 피해면적 기준으로 불 때에는 삼척시, 예천군, 상주시 순으로 나타났다(Figure 3).

Table 2. DB fields for wildfire occurrence

Field name	Field value (example)
Occurrence date	2016-03-30 3:32
Extinguishment date	2016-03-31 12:03
Si-do	Gyeongsangbuk-do
Si-gun-gu	Sangju-si
Eup-myeon	Oeseo-myeon
Dong-ri	Yeui-ri
Street number	San163-1
Damage area	92
longitude	128.0128636
Latitude	36.4707525
Cause	Unknown cause

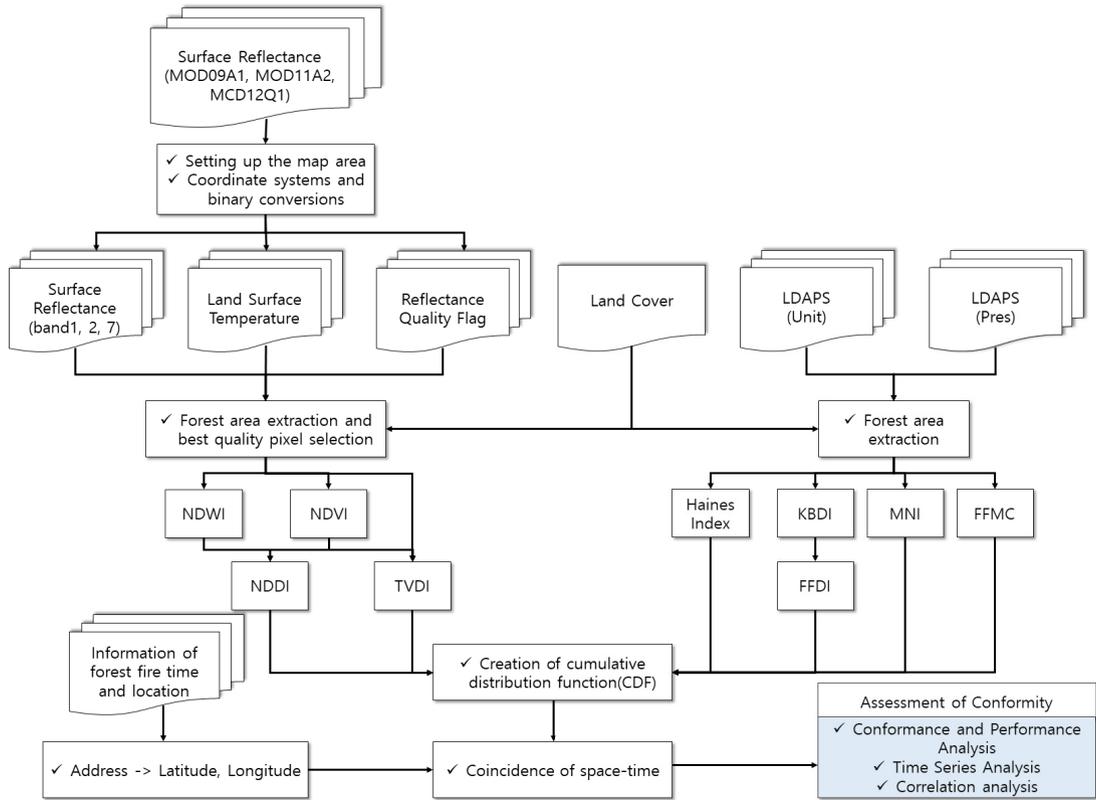


Figure 4. Flow chart of data processing

3. 연구방법

기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수의 성능평가를 위한 전체적인 연구흐름은 Figure 4와 같다. LDAPS의 단일면 및 등압면 자료로부터 기온, 강수, 습도, 풍속 등의 변수를 추출하여 기상기반 산불 위험지수(FFDI, FFMC, HI, MNI)를 산출한다(Table

3). 또한 MODIS 자료는 MRT(MODIS Reprojection Tool)를 이용한 영역절취, 밴드추출, 포맷변환 등의 전처리를 거쳐 최상품질 화소에 대하여 위성기반 지면건조지수(NDDI, TVDI)를 산출한다. 이렇게 만들어진 기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수격자형 자료에서 산림에 해당하는 화소만을 추출하고, 전체기간의 자료를 모두 집계하여 각 지수별로 누적

Table 3. Weather factors used in meteorology-based fire risk indices

Fire Risk Index	Wind speed	Dew point	Temperature	Relative humidity	Precipitation	Annual precipitation
FFDI(Forest Fire Danger Index)	○		○	○	○	○
FFMC(Fine Fule Moisture Code)	○		○	○	○	
HI(Haines Index)		○	○			
MNI(Modified Nesterov Index)		○	○		○	

분포함수(cumulative distribution function: CDF)를 생성하고, 이를 이용하여 과거 산불발생 건들에 대한 각 지수의 성능평가를 수행하였다.

3.1. 기상기반 산불위험도

3.1.1. FFDI(Forest Fire Danger Index)

FFDI는 호주정부에서 제공하는 산불위험지수로서 KBDI(Keetch-Byram drought index)에 기초한 가뭄인자(drought factor: DF) 및 상대습도, 기온, 풍속 등을 이용하여 계산한다(Schunk et al. 2013). FFDI는 입력자료에 있어서 FFMC와 비슷하지만, FFMC에 비해 기온과 상대습도에 더 민감하고, 풍속과 강수에 덜 민감한 경향을 보이며, FFDI와 FFMC는 서로 다른 조건에서 다른 반응을 보인다는 점에서 상호보완적인 성격을 가진다(Dowdy et al. 2009). 가뭄인자는 전날의 KBDI와 기온, 강수량 및 연강수량에 의해 계산되며, 우리나라에 적합하도록 경험상수를 조정할 필요가 있기 때문에 우리나라의 월별 산불발생 건수와 KBDI의 월별 평균값이 선형상관을 이루도록 계수를 최적화하여 사용하였다.

3.1.2. FFMC(Fine Fuel Moisture Code)

캐나다정부에서 제공하고 있는 FWI(forest fire weather index)는 산불의 발생 및 확산에 대한 위험성을 나타내는 지수로서, 지역시간 정오를 기준으로 측정된 기상자료를 입력하여 계산한다. 핵심구성요소는 점화확률 및 확산을 나타내는 FFMC, 산불강도와 관련되는 DMC(duff moisture code), 그리고 산불진화의 어려움에 기여하는 요소인 DC(drought code)이다. 이 중에서 FFMC는 대략 1~2cm 깊이 토양의 건조 상태를 통해 산불의 점화 확률과 확산을 예측하는 값으로서 기온, 상대습도, 풍속, 24시간 누적강수량 등을 이용하여 계산한다. 우리나라를 대상으로 하는 선행 연구에서는 FWI보다 FFMC가 더 주요한 것으로 평가

하였으며(박홍석 외 2009), 본 연구에서도 FWI 대신 그 구성요소인 FFMC를 사용하였다.

3.1.3. HI(Haines Index)

HI는 표고 또는 등압면높이에 따른 대기불안정도와 대기건조도를 결합하여 계산한다. 대기불안정도는 연접한 2개 등압면의 기온 차이로 설명되며, 대기건조도는 등압면 내에서의 기온과 이슬점온도의 차이로 나타내는데, HI는 대기불안정도(1, 2, 3)와 대기건조도(1, 2, 3)의 합으로 2에서 6사이의 정수 값으로 표현된다. 이 지수는 산불의 발생보다는 산불발생 후의 확산 정도를 나타내는 데 보다 더 적합한 것으로 알려져 있다(Lee et al. 2013).

3.1.4. MNI(Modified Nesterov Index)

기존의 NI(Nesterov index)는 강수에 의해 지수값이 급격히 떨어지는 단점을 가지고 있었는데, MNI는 이를 보완한 것으로서 상수 K를 정의하여 강수량에 따라 완만하게 지수값을 감소시킨다. 기온(T)과 이슬점온도(D)가 차이가 증가할수록 지수 부근의 공기가 건조해지는 성질을 이용하여 계산하며, 무강수 일수(W)에 따라 그 값이 누적된다. 상수 K는 강수량(R)에 따라 차등 적용되는 값이다.

$$MNI = K \sum_{i=1}^W T_i x (T_i - D_i) \quad (1)$$

3.2. 위성기반 지면건조도

식생의 수분 함량은 산불 발생과 확산에 중요한 요소이다. 실제 수분함량은 마르지 않은 잎의 무게와 마른 잎의 무게를 이용한 FMC(fuel moisture content)로 표현되는데, 이는 직접 측정이 필요하기 때문에 시공간적인 한계가 있다(Chuvieco et al. 2003). 대안적으로 위성자료를 이용하여 계산한 지면건조지수로부터 FMC를 추정하여 산불위험도를 평가하기도 한다

(Yebara et al. 2008). 대표적인 지면건조지수인 NDDI는 식생지수 NDVI와 수분지수 NDWI의 합과 차에 의해 도출된다. NDVI는 광합성 과정에서 식물이 가시광선의 적색영역 전파를 강하게 흡수하고 근적외선 영역의 전파를 강하게 반사하는 성질을 이용하여 식생의 활력도를 평가하는 지수로서, 식생지수 중 가장 널리 사용된다(Tucker 1979). NDWI는 식생에 포함된 수분을 원격으로 감지하기 위한 지수로서, 식생이 근적외선 영역에서 강한 반사효과와 단파적외선 영역에서 수분에 대한 흡수효과를 가지는 성질을 이용하여 계산한다(Gao 1996). NDVI와 NDWI를 이용한 NDDI는 식생의 활력과 잎의 수분함량에 대한 정보가 결합되기 때문에 식생의 건조상태를 잘 나타낼 수 있는 지표이다(Gu et al. 2007).

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho Red}{\rho NIR + \rho Red} \quad (3)$$

$$NDWI = \frac{\rho NIR - \rho SWIR}{\rho NIR + \rho SWIR} \quad (4)$$

온도식생건조지수 TVDI는 NDVI와 LST의 관계에 의하여 지면건조도를 추정하는 방법이다. 낮시간대의 경우 건조한 토양에서는 식생이 적어짐에 따라 지면온도가 매우 증가하지만, 습윤한 토양에서는 식생의 많고 적음에 따라 지면온도가 크게 차이나지 않는다. 이러한 성질을 바탕으로 식생지수와 지면온도를 이용하여 토양의 습윤 또는 건조한 정도를 상대적으로 나타낼 수 있는데(Cho et al. 2014), 일정 NDVI 값을 기준으로 보면, 지면온도가 최고인 화소는 매우 건조하고, 지면온도가 최저인 화소는 매우 습윤하므로, 그 사이의 비율을 이용하여 지면건조도를 평가할 수 있다(Sandholt et al. 2002).

$$TVDI = \frac{LST_{day} - LST_{day_min}}{LST_{day_max} - LST_{day_min}} \quad (5)$$

여기에서, LST_{day} 는 개별 화소의 지면온도, LST_{day_min} 과 LST_{day_max} 는 연구지역 내의 지면온도 최소값과 최대값을 각각 의미한다.

3.3. CDF(Cumulative Distribution Function)를 이용한 지수 정규화

기상기반 산불위험지수 4종류(FFDI, FFMC, HI, MNI)와 위성기반 지면건조지수 2종류(NDDI, TVDI)는 각기 다른 단위와 분포를 가지는 값의 집합이기 때문에 이들의 대소를 직접 상호비교하기는 어렵다. 이때 각 지수값을 CDF로 변환하면, 각 지수값에 해당하는 순위를 누적 백분비(%)를 이용하여 표현하기 때문에 모든 지수들을 0에서 1 사이의 범위로 파악할 수 있어서 직관적인 상호비교가 가능하다. 배경분포로서 기준이 되는 CDF는 전체기간 동안(2013.01.29. ~ 2017.05.31.) 6가지 지수들에 대하여 각각 생성하였다. 예를 들어 특정 날짜의 특정 위치에서의 FFDI의 CDF가 0.95라면, 이날 이곳의 FFDI는 평상시 기준으로 하위 95%, 또는 역대 상위 5%에 해당하는 높은 수치라고 해석할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 산불 발생과 확산의 정도를 예측하는 기상기반 산불위험지수와 위성기반 지면건조지수를 우리나라 전체 산림에 대해 계산하고, 이 지수들이 실제 산불발생을 어느 정도 예측하는지에 대하여 객관적으로 평가하고자 하였다. 2013년 1월부터 2017년 5월까지 발생한 산불 1,888건 중에서 피해면적이 1ha가 넘는 120건에 대하여(Figure 5) 각 지수들의 산불발생에 대한 민감도를 평가하였고, 또한 산불이 빈번하게 발생하는 2월~4월(Figure 6)의 산불위험지수와 주요 기상요소와의 관련성을 분석하였다.

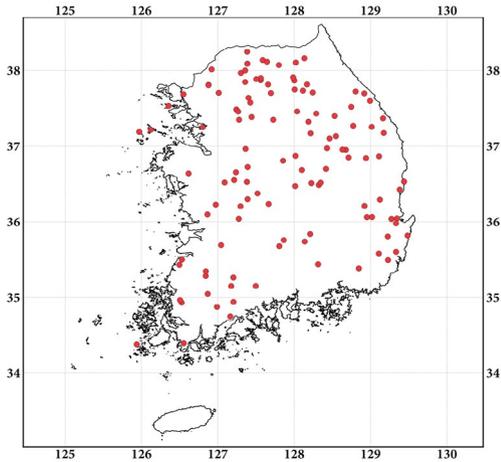


Figure 5. Locations of wildfire occurrences with the burned area over 1ha (2013.01.29. ~ 2017.05.31.)

4.1. 지수의 민감도분석

기상기반의 산불위험지수와 위성기반의 지면건조 지수의 우리나라 산불발생에 대한 민감도를 평가하기 위하여 피해면적이 1ha가 넘는 120건에 대하여 각 지수들의 CDF를 도출하였다. Figure7에서는 이 120건을 피해면적 기준으로 분류하여 50ha 초과는 적색, 10ha 초과는 주황색, 5ha 초과는 황색, 나머지는 무색

Table 4. Average CDF values for each index grouped by fire size

Area burnt	>50ha	10~50ha	3~10ha	1~3ha
FFDI	0.990	0.977	0.956	0.901
FFMC	0.956	0.981	0.954	0.877
HI	0.958	0.964	0.932	0.911
MNI	0.869	0.871	0.849	0.792
NDDI	0.910	0.919	0.913	0.919
TVDI	0.702	0.663	0.656	0.760

으로 표시하였다. 피해면적이 작은 산불에서는 CDF 값이 높은 경우와 낮은 경우가 혼재해 있었으나, 피해면적이 큰 산불에서는 대부분 높은 CDF 값을 보였고, 특히 FFDI의 경우 피해면적 10ha가 넘는 산불(적색과 주황색)에 대해서는 예외없이 극도로 높은 CDF 값을 나타냈다. 이는 대형산불일수록 불이 나기 전에 이미 산불위험지수와 지면건조지수가 역대급의 매우 높은 수치를 나타내었음을 의미한다. 이러한 경향은 MNI와 TVDI에서 그 민감도가 다소 떨어지기는 했으나 거의 모든 지수들에서 공통적으로 나타났다. 특히 FFDI와 FFMC는 피해면적 3~10ha, 10~50ha, 50ha 초과인 경우에 대하여 CDF 평균치가 모두 0.95가 넘었으며, NDDI는 모든 범주에서 CDF 평균치가 0.91~0.92의 고른 분포를 보였다(Table 6).

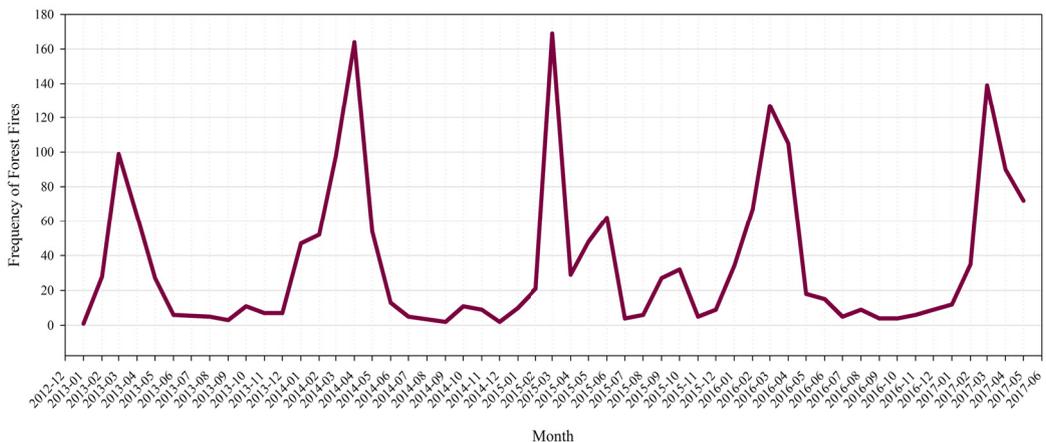


Figure 6. Number of wildfire occurrences by month

분석대상인 120건의 산불 중에서 산불위험지수와 지면건조지수가 높은 값일 때 불이 난 경우와 낮은 값일 때 불이 난 경우를 알아보기 위하여, 편의상 CDF 값 0.8을 기준으로 그 이상일 때의 건수와 그 이하일 때의 건수를 비율로 표시하였다(Table 7). 120건 중에 88% 이상이 FFDI, FPMC, NDDI에서 $CDF \geq 0.8$ 로 나타나 상당히 양호한 예측력으로 평가되었다. 그러나 MNI는 매년 2월에 발생한 산불에 대해 특히 낮은 민감도를 나타냈고, 큰 산불임에도 불구하고 CDF 값이 0.2가 나온 경우도 있었다. 이는 우리나라의 계절적 특성상 2월의 이슬점격차가 크지 않으며 기온이 영하로 내려가는 경우가 많기 때문에 MNI 값이 낮게 산출되는 경향을 보이기 때문인 것으로 사료된다(Figure 8). 또한

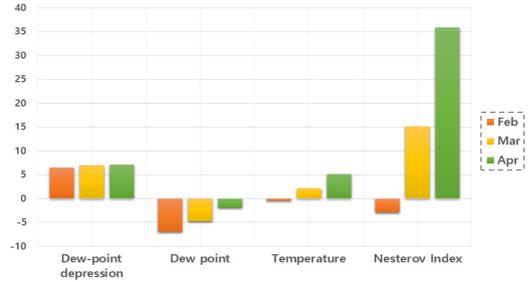


Figure 8. Comparison of MNI, temperature, dew point and dew-point depression

TVDI는 $CDF \geq 0.8$ 인 경우가 절반이 되지 않아 가장 민감도가 떨어지는 것으로 나타났다.

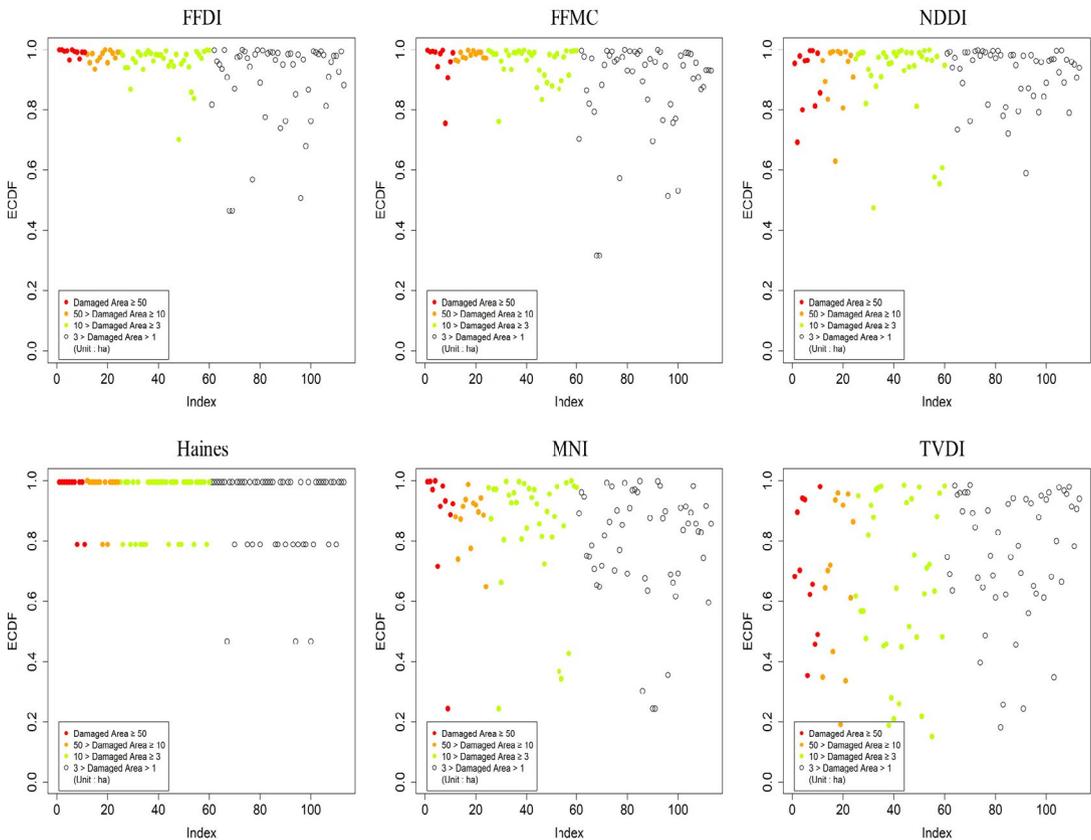


Figure 7. Wildfire risk predictions with regard to the area damaged

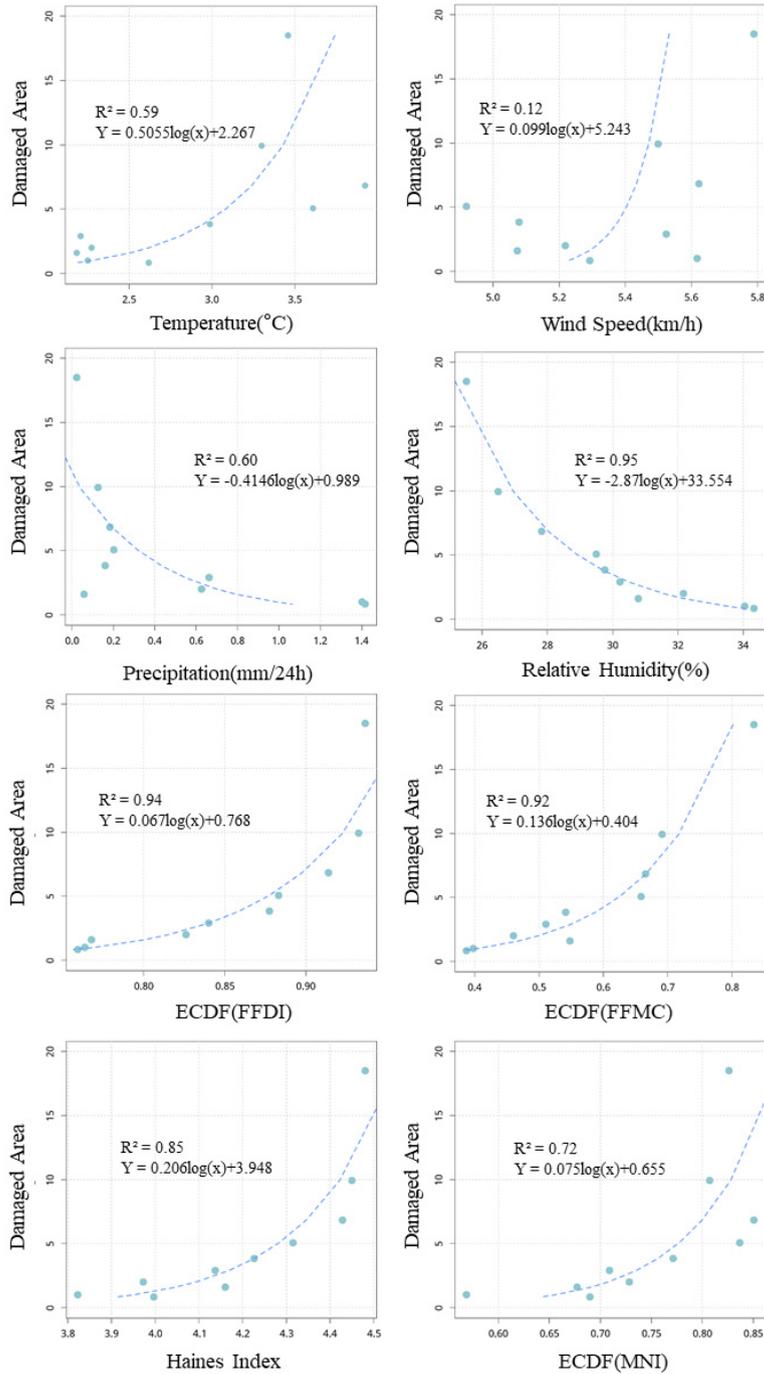


Figure 10. Weather element and wildfire risk indices according to the damaged area

Table 5. Percentage of wildfire cases with the CDF values over or under 0.8

	Wildfire cases with CDF \geq 0.8	Wildfire cases with CDF $<$ 0.8
FFDI	91%	9%
FFMC	88%	12%
HI	72%	28%
MNI	71%	29%
NDDI	88%	12%
TVDI	43%	57%

4.2. 기상요소와 산불피해

산불은 기온, 습도, 강수량, 풍속 등 기상요소에 민감하게 반응하기 때문에 Figure 9에서는 이들 기상요소의 변화와 각 지수의 변화를, 일자별 산불 피해면적과 함께 나타내었다. 우리나라의 전반적인 경향을 살펴보기 위하여 일자별로 전체 산림 화소의 평균 기상값과 평균 지수값 등을 계산하였다. 산불이 발생했던 날에는 다른 날에 비해 풍속과 기온이 높고, 강수량과 상대습도는 낮은 것을 볼 수 있다. 기상기반 산불위험지수들도 그에 따라 높은 값을 나타내고 있었으며, 특히 10ha 이상의 산불이 발생한 날인 세로 점선에 해당하는 날은 그렇지 않는 날에 비해 산불위험도가 매우 높게 나타나는 특징을 보였다. 또한 무강수 일수가 길어지면서 대형 산불이 발생한 것을 알 수 있다. 한편 세로 점선 이외의 경우에는 산불위험도가 매우 높지 않은 상황에서도 산불이 발생하였으나 그 피해면적이 작은 경향을 보인다.

Figure 10에서는 기상요소 및 산불위험도와 산불피해면적과의 회귀분석 결과를 나타내었으며, 2013년~2017년의 2월~4월 자료를 사용하였다. 기온과 풍속은 양의 상관성, 강수와 상대습도는 음의 상관성을 보였는데, 기온과 강수의 결정계수는 0.6 정도였으나, 상대습도의 결정계수는 0.95로서 상대습도가 낮을수록 산불이 발생했을 때의 피해가 커지는 양상이 뚜렷

하였다. 이는 상대습도의 기여도가 큰 FFDI가 산불피해면적에 대한 결정계수가 0.94로 나타난 것과 일맥상통한다고 할 수 있다. 이러한 결과를 통해 볼 때, 우리나라의 경우 상대습도가 산불예측에 있어 매우 중요하며 따라서 FFDI가 가장 적합한 산불위험지수라고 평가할 수 있다. 일반적으로 FFDI가 FFMC에 비해 기온과 상대습도에 보다 더 민감한 것으로 알려져 있으나, FFMC 역시 0.92의 높은 결정계수를 보여 우리나라에 적합한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기상기반 산불위험지수인 FFDI, FFMC, HI, MNI와 위성기반 지면건조지수인 NDDI, TVDI가 우리나라에서 발생한 산불을 어느 정도로 예측할 수 있는지 민감도분석 및 가용성 평가를 수행하였다. 첫째, 2013년 1월부터 2017년 5월까지 발생한 피해면적 1ha가 넘는 산불 120건에 대하여 6종류의 지수를 비교한 결과, FFDI, FFMC, HI, NDDI가 민감하게 산불을 예측한 것으로 평가되었다. 특히 FFDI는 피해면적 10ha가 넘는 모든 산불에 대하여 극도로 높은 CDF 값을 나타냈으며, FFDI와 FFMC는 피해면적 3ha가 넘는 산불에 대하여 평균 CDF 값이 0.95가 넘게 나타나는 등 매우 우수한 성능을 보였다. 둘째, MNI는 이슬점온도와 기온의 차이가 크지 않고 기온이 영하로 내려가는 우리나라 2월의 계절적 특성 때문에 2월의 산불예측이 정확하지 않았고, TVDI는 전체적으로 산불발생에 대한 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 셋째, 기상요소와 산불피해면적과의 회귀분석을 통해 상대습도의 설명력이 매우 큼을 알 수 있었고, 상대습도를 잘 반영하면서 다양한 기상요소를 사용하는 FFDI와 FFMC의 결정계수가 높게 나타났다. 또한 민감도분석에서도 좋은 성능을 보여 우리나라에 적합한 산불위험지수라고 사료된다. 한편 NDDI는 피해면적의 크기에 상관없이 평균 CDF 값이 안정적으로 높

게 산출되어 위성기반 지면건조지수로서 보조적인 활용가능성이 있을 것으로 보인다.

그러나 본 연구에서는 자료의 가용성 때문에 실험 기간이 4년 남짓으로 국한되었던 한계가 존재하는데, 향후에 장기적인 자료를 확보하고 다량의 케이스를 이용한 실험을 통해 보다 합리적인 민감도분석이 이루어질 필요가 있다. 또한 1일 단위 산출이 가능한 기상기반 산불위험도와는 달리, 위성기반 지면건조도는 MODIS 자료의 가용성 때문에 8일 단위 산출이 이루어졌으나, 향후 시간해상도 10분 자료를 가지는 Himawari-8 등의 정지궤도위성을 사용한다면 1일 단위의 위성기반 지면건조도를 산불예측에 활용할 수 있을 것이다. 이러한 산불위험지수와 지면건조지수를 취사선택 및 융합하여 활용한다면, 우리나라 산불예측에 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

References

박홍석, 이시영, 윤화영. 2009. 경북지역의 산불 발생과 캐나다 산불 기상지수와의 관계. 한국화재소방학회 2009년도 추계학술논문발표회 논문집. 210-215.

Park HS, Lee SY, Yun HY. 2009. The relationship between forest fire occurrence and Canadian forest fire weather index(CFFDRS) in Keongsangbuk do. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*. 210-215.

원명수, 이명보, 이우균, 윤석희. 2012. 디지털예보자료와 Daily Weather Index (DWI) 모델을 적용한 한반도의 산불발생위험 예측. 한국농림기상학회지. 14(1):1-10.

Won MS, Lee MB, Lee WK, Yoon SH. 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.

이시영, 한상열, 안상현, 오정수, 조명희, 김명수. 2001. 강원도 지역 산불발생인자의 지역별 유형화. 한국농림기상학회지. 3(3):135-142.

Lee SY, Han SY, An SH, Oh JS, Jo MH, Kim MS. 2001. Regional Analysis of Forest Fire Occurrence Factors in Kangwon Province. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 3(3):135-142.

이시영, 한상열, 원명수, 안상현, 이명보. 2004. 기상특성을 이용한 전국 산불발생확률모형 개발. 한국농림기상학회지. 6(4): 242-249.

Lee SY, Han SY, Won MS, An SH, Lee MB. 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.

Bisquert M, Sanchez JM, Caselles V. 2014. Modeling fire danger in Galicia and Asturias (Spain) from MODIS images. *Remote Sensing*. 6(1):540-554.

Cho JI, Lee YW, Lee, HS. 2014. Assessment of the relationship between thermal-infrared-based temperature-vegetation dryness index and microwave satellite-derived soil moisture. *Remote Sensing Letters*. 5(7):627-636.

Chuvieco E, Cocero D, Riano D, Martin P, Martinez-Vega J, Riva J, Perez F. 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*. 92(3):322-331.

Dowdy AJ, Mills GA, Finkele K, Groot W. 2009. *Australian fire weather as represented by the*

- McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. Technical Report, The Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia. 1-84.
- Gao B. 1996. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58(3):257-266.
- Gu Y, Brown JF, Verdin JP, Wardlow, B. 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the Central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*. 34(6):1-6.
- Lee MN, Hong SB, Park SK. 2013. Future changes of wildfire danger variability and their relationship with land and atmospheric interactions over East Asia using Haines Index. *Atmosphere*. 23(2):131-141.
- Mantzavelas A, Apostolopoulou I, Lazaridou T, Partozis T, Lampin C, Laurent B, Jappiot M, Brewer S. 2006. *Method to assess with good spatial accuracy the meteorological and fuel moisture components of the fire risk*. Technical Report, Omikron Ltd, Greece. 1-89.
- NASA. 2017. MODIS Products Table[Internet]. [https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/]. Last accessed 24 Nov 2017.
- Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*. 79(2-3):213-224.
- Schunk C, Wastl C, Leuchner M, Schuster C, Menzel A. 2013. Forest Fire danger rating in complex topography - Results from a case study in Bavarian Alps in autumn 2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 13(9):2157-2167.
- Tucker CJ. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8(2):127-150.
- Yebra M, Chuvieco E, Riano D. 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(4):523-536.

2017년 10월 10일 원고접수(Received)

2017년 11월 21일 1차심사(1st Reviewed)

2017년 12월 5일 2차심사(2nd Reviewed)

2017년 12월 8일 게재확정(Accepted)

초 록

산불은 한번 발생하면 기상, 지형 등 여러 악조건으로 인해 효과적인 진화가 어려워 넓은 면적으로 확대되는 경우가 많다. 따라서 산불의 예방이 중요하기 때문에 세계 각국에 다양한 산불위험지수와 예측시스템이 존재한다. 그러나 이러한 산불위험지수 및 지면건조지수가 우리나라의 산불발생에 적용가능한지에 대한 객관적인 평가는 이루어진 바 없다. 이에 본 연구에서는 1.5km 격자의 LDAPS(Local Analysis and Prediction System) 기상자료 및 1km 격자의 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 위성자료를 활용하여 각종 산불위험지수와 지면건조지수의 우리나라 산불발생에 대한 민감도분석을 수행하고자 한다. 기상기반 산불위험지수로는 호주의 FFDI(forest fire danger index), 캐나다의 FFMC(fine fuel moisture code), 미국의 HI(Haines index), 그리고 학술연구에서 제시된 MNI(modified Nesterov index)를 산출하였고, 위성기반 지면건조지수인 NDDI(normalized difference drought index)와 TVDI(temperature vegetation dryness index)를 산출하여 우리나라 산불발생에 대한 적용가능성 실험을 수행하였다. 2013년 1월부터 2017년 5월까지 발생한 피해면적 1ha가 넘는 산불 120건과 6종류의 지수를 비교한 결과, FFDI는 피해면적 10ha가 넘는 모든 산불에 대하여 극도로 높은 CDF(cumulative density function) 값을 나타냈으며, FFDI와 FFMC는 피해면적 3ha가 넘는 산불에 대하여 평균 CDF 값이 0.95가 넘게 나타나는 등 매우 우수한 성능을 보였다. 반면, MNI는 이슬점온도와 기온의 차이가 크지 않은 우리나라의 계절적 특성 때문에 2월의 산불예측을 거의 하지 못하였고, TVDI는 전체적으로 산불발생에 대한 민감도가 낮은 것으로 나타났다. NDDI는 피해면적의 크기에 상관없이 평균 CDF 값이 안정적으로 높게 산출되어 위성기반 지면건조지수로서 보조적인 활용가능성이 있을 것으로 보인다. 이러한 산불위험지수와 지면건조지수를 취사선택 및 융합하여 활용한다면, 우리나라 산불예측에 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 산불위험지수, 지면건조지수, 민감도분석, 수치기상예보, 위성원격탐사