

Article

한반도 지역 산불 발생 위험도 예측에 TVDI 적용 가능성 고찰

김광년¹⁾ · 김승희²⁾ · 원명수³⁾ · 장근창⁴⁾ · 최원준⁵⁾ · 이윤곤⁶⁾†

A Feasibility Study on the Application of TVDI on Assessing Wildfire Danger in the Korean Peninsula

Kwang Nyun Kim¹⁾ · Seung Hee Kim²⁾ · Myoung Soo Won³⁾ ·
Keun Chang Jang⁴⁾ · Won Jun Choi⁵⁾ · Yun Gon Lee⁶⁾†

Abstract: Wildfire is a major natural disaster affecting socioeconomics and ecology. Remote sensing data have been widely used to estimate the wildfire danger with an advantage of higher spatial resolution. Among the several wildfire related indices using remote sensing data, Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) assesses wildfire danger based on both Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST). Although TVDI has physical advantages by considering both weather and vegetation condition, previous studies have shown TVDI does not performed well compare to other wildfire related indices over the Korean Peninsula. In this study we have attempted multiple modification to improve TVDI performance over the study region. In-situ measured air temperature was employed to increase accuracy, regression line was generated using monthly data to include seasonal effect, and TVDI was calculated at each province level to consider vegetation type and local climate. The modified TVDI calculation method was evaluated in wildfire cases and showed significant improvement in wildfire danger estimation.

Key Words: Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), wildfire, remote sensing, vegetation index

요약: 산림지역에서의 관측은 평지에서의 관측에 비해 지상관측에 있어서 어려움을 가지고, 위성 관측자료는 지상의 지점기반 관측자료에 비해 높은 공간 해상도를 가진다. 이러한 이점을 이용하여 위성 관측자료는 산불 발생 위험도를 추정하는 연구에 활용되어왔다. 위성 관측자료를 사용하는 여러 산불 관련 지수 중 TVDI

Received November 13, 2019; Revised November 27, 2019; Accepted December 9, 2019; Published online December 16, 2019

¹⁾ 충남대학교 대기과학 석사수료생 (Master Candidate, Department of Atmospheric Sciences, Chungnam National University)

²⁾ 채프먼대학교 지구시스템 모델링 및 관측 센터 연구교수 (Research Professor, Center of Excellence in Earth Systems Modeling & Observations, Chapman University)

³⁾ 산림과학원 기후변화생태연구과 연구관 (Senior Researcher, Division of Forest Ecology and Climate Change, National Institute of Forest Science)

⁴⁾ 산림과학원 기후변화생태연구과 연구사 (Researcher, Division of Forest Ecology and Climate Change, National Institute of Forest Science)

⁵⁾ 국립환경과학원 환경위성센터 연구사 (Researcher, Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research)

⁶⁾ 충남대학교 대기과학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Atmospheric Sciences, Chungnam National University)

† Corresponding Author: Yun Gon Lee (yglee2@cnu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Temperature Vegetation Dryness Index)는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)와 지표면 온도(Land Surface Temperature; LST)를 기반으로 산불발생 위험도를 평가한다. TVDI가 기상과 식생의 건조도를 모두 고려하는 장점을 가지고 있지만 선행 연구에 따르면 TVDI는 여러 산불 관련 지수들에 비하여 한반도에서의 산불발생에 민감하지 않은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 한반도에서 TVDI의 산불발생 위험도 표현능력을 향상시키기위해 여러가지 개선방법을 적용하였다. 지상에서 측정된 기온을 적용하여 TVDI의 정확도를 향상시키고, 월별로 최대, 최소 온도 회귀선을 구하여 TVDI에 계절효과를 적용하고자 했으며, 각 지역별로 TVDI를 계산하여 식생 유형 및 지역 기후를 고려하였다. 개선된 TVDI는 선정된 산불사례들을 통해 평가되었으며 산불발생 위험도 측면에서 향상된 성능을 보여주었다.

1. 서론

산불은 생태학적 및 사회경제적으로 큰 규모의 피해를 입히는 재해이다. 산림청 2017년 산불통계연보에 따르면 우리나라는 2008~2017년간 연평균 421건의 산불이 발생하고 603 ha의 산림이 소실되었으며, 연평균 피해액은 498억원에 이른다(Korea Forest Service, 2018). 산불로 인한 피해를 줄이기 위해서는 산불발생위험을 조기에 예측하고 산불상황을 실시간으로 모니터링하여 효과적으로 대처·진화하는 것이 필수적이다. 따라서 산림청에서는 산불 감시를 위한 산악기상관측망, 감시초소와 감시탑, 산불무인감시 카메라를 운영하고 있으며, 전통사찰과 휴양림 등에 산불로부터 인명보호를 위한 산불소화시설도 운영하고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 지구온난화로 인한 평균 기온 증가에 따른 습도 감소로 인해서 한반도에서의 산불발생은 증가 추세이다(Sung *et al.*, 2010). 산불의 규모가 큰 대형산불의 발생 건수와 피해면적 또한 증가하는 추세로 1970년대에는 37건의 대형산불이 2,202 ha에 피해를 입혔지만 1980년대와 1990년대에는 각각 48건, 42건의 대형산불이 4,959 ha와 7,388 ha의 면적에 피해를 입혔고, 2000년대에는 53건의 대형산불이 32,896 ha 면적에 피해를 입혔다(Lee, 2010). 또한 최근 10년간의 산불을 살펴봤을 때 연평균 약 24건의 증가추세를 보였다. 국토면적의 64%가 산림인 우리나라에서는 산림지역에 감시시설을 설치하고 지속적으로 운용하는 것이 많은 비용과 인력을 필요로 한다. 따라서 산불 발생 위험을 예측하여 근원적인 산불발생 요인의 제거와 예방활동을 통해 산불 발생 가능성을 최소화할 필요가 있다.

산림청 국립산림과학원에서 2003년 개발되어 현재 까지 현업 운용중인 국가산불위험예보시스템([http://](http://forestfire.nifos.go.kr/)

forestfire.nifos.go.kr/)은 기상, 임상 및 지형자료를 바탕으로 산불위험정보를 생산하고 있다. 기상자료는 기상청의 수치모델 재분석장과 예보자료를 활용하고 있으며, 임상자료는 산림청에서 제작한 수치임상도를 이용하고 있다. 그러나 임상자료에는 지역별 수종 정보만이 포함되고 식생의 상태를 표현하지 못하므로 산불 가능성을 진단하는 중요한 인자인 연료의 상태, 즉 현재의 식생 건조도가 반영되지 않는 한계가 존재한다. 이러한 지상관측기반 산불발생위험지수의 단점을 보완하기 위하여 국외에서는 공간해상도가 높고 격자화된 위성 스펙트럼 자료를 활용하여 산불발생위험도를 나타내기 위한 연구들이 진행되어왔다(Vidal and Devaux-Ros, 1995; Oldford *et al.*, 2003; Chuvieco *et al.*, 2004; Guo and Zhou, 2004; Akther and Hassan, 2011; Bisquert *et al.*, 2011; Chowdhury and Hassan, 2015; Myoung *et al.*, 2018). 높은 시공간해상도를 갖는 위성의 가시광, 근적외, 적외 채널로부터 식생정보 및 토양의 건조도를 산출할 수 있는 다양한 지수(Index)들이 제시되었으며, 이들 값으로부터 산불발생위험도를 진단할 수 있는 방법론이 분석되어왔다. 국내에서는 한반도의 기상학적 및 농업적 가뭄을 감시하기 위해서 위성 지수들을 이용한 연구들이 진행되었으며, 대표적으로 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 이용한 경우로 남한지역 산불의 피해규모와 피해강도를 분석한 연구(Kang *et al.*, 2010)와 NDWI(Normalized Difference Water Index)를 이용한 한반도 지역 산림생태계의 수분 부족을 평가하고 이를 대형 산불 사례와 비교 검증한 연구가 있다(Seong *et al.*, 2015).

특히, TVDI(Temperature Vegetation Dryness Index)는 기상인자인 지표면 온도(Land Surface Temperature; LST)와 식생자료인 NDVI의 물리적 관계성을 바탕으로 산출되는 지수로서(Sandholt *et al.*, 2002), 국내외에서 가뭄

과 산불 감시 등의 목적으로 연구되어왔다. TVDI는 지표면 온도와 식생지수를 사용함으로써 토양수분과 식생의 건조도에 밀접한 연관이 있는 지수이다. 산불감시와 관련하여 Onderka and Melichercik(2010)에서는 지상 관측기반 기상인자로부터 경험적으로 추정된 산불발생 위험지수와 TVDI를 융합하여 산불발생위험도를 분석하였고, Xu *et al.*(2016)에서는 위성자료 기반 산불발생 위험도 모형 개발에 TVDI가 활용되며 중요한 인자 중 하나로 제시되었다. 그러나 한반도 지역 산불발생 통계 자료를 이용하여 한반도 지역에서의 지상기반과 위성기반의 산불위험지수들의 민감도를 비교한 연구에서는 TVDI의 민감도가 가장 낮은 것으로 확인된 바 있다 (Kong *et al.*, 2017). 따라서 본 연구에서는 위성관측기반의 TVDI가 한반도 지역 산불발생위험도 평가에 적용될 때 나타날 수 있는 문제점을 진단하고, 이를 개선할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위해 위성자료로만 사용되었던 지표면 온도 자료를 지상관측 기상 자료를 비교 분석하였고, 기간과 지역에 따른 TVDI의 차이를 상세히 분석하고 이를 통해 개선된 TVDI를 실제 사례에 적용 검증하였다.

2. 자료 및 분석방법

1) 연구 지역 및 자료

본 연구에서는 산림청의 산악기상망이 운영을 시작한 2013년부터 2014년까지 2년간의 남한지역 산불발생자료

와 위성관측, 지상관측 자료를 사용하여 분석을 진행하였다. 위성관측 자료로는 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 LST와 surface reflectance(표면 반사도), land cover type 자료를 사용하였고 지상관측 자료로는 기상청 자동기상관측장비(AWS)와 산림청이 운영 중인 산악기상관측소의 기온 자료를 사용하였으며, 남한지역(33~39°N, 125~131°E)에서 강원도와 경상도 지역의 자료에 집중하여 분석을 진행하였다.

(1) 연구 지역

Table 1에 최근 10년간 권역별 연평균 산불 발생건수와 피해규모가 기재되어 있다. 전체 산불건수 중 약 36%에 해당하는 산불이 경상도 지역에서 발생하였으며 경상도 지역의 산불 피해규모는 전체 산불 피해규모 중 약 52%이다. 강원도 지역의 산불건수는 전체 산불발생건수 중 약 15%지만 산불로 인한 피해규모는 전체 산불 피해규모 중 30%에 달한다. 경상도와 강원도 지역을 합

Table 1. Annual mean of forest fire occurrence and damaged area by region from 2008 to 2017

권역	산불건수	피해면적
강원도	64.2	181.04
경상도	151.7	310.29
경기도	82.0	32.91
충청도	54.7	29.71
전라도	67.9	48.63
제주	0.4	0.40
합계	420.9	602.98

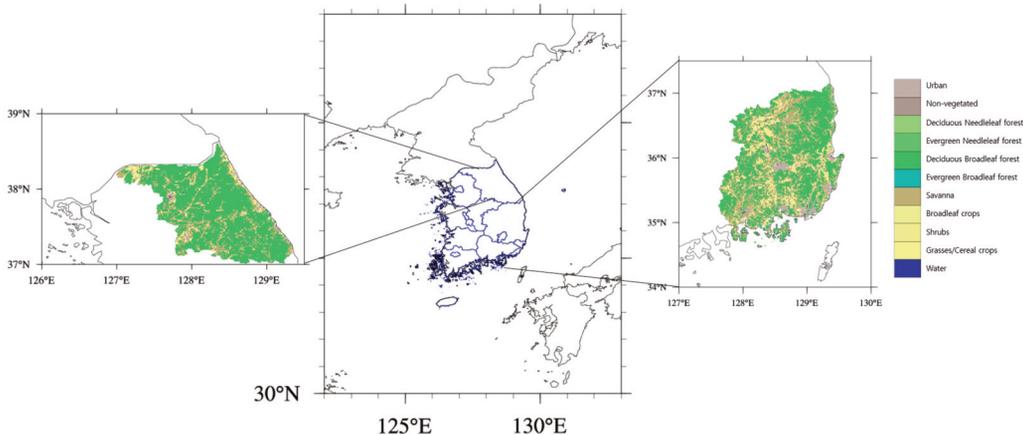


Fig. 1. Land cover in Gangwon (left) and Gyeongsang (right) Province.

한 피해규모는 전체 피해규모 중 82%에 달하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 남한 지역 중 산불에 의한 피해가 큰 강원도와 경상도를 연구 지역으로 선정하여 TVDI의 산불발생위험도 표현능력을 살펴보고자 한다.

MODIS land cover type(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) 자료를 이용하여 강원도와 경상도의 토지피복을 살펴보면 강원도(Fig. 1. 좌측)는 남한면적의 약 18%를 차지하는 지역으로 총 면적 중 약 82%가 임야로 구성되어있으며 산야지대가 남한지역에서 가장 비율이 높은 지역이다. 이로 인하여 산불발생시 산불진화를 위한 장비, 급수 등의 동원이 어려워 산불 진화의 어려움이 있으며 산불 발생 시에 대형산불로 발달하기 쉬운 지역이다. 경상도(Fig. 1. 우측)는 남한지역 전체 면적에 약 32%에 달하는 지역으로 남한지역 중 면적이 가장 넓고 강원도에 비해 임야의 면적(약 67%)은 작지만 산불의 발생이 전국에서 제일 잦은 지역이다.

(2) 지상관측 자료

위성관측 지표면온도 자료와 지상관측 기온 자료의 비교와 TVDI 산출에 있어서 지상관측 기온을 적용하기 위하여 기상청에서 제공하는 자동기상관측장비(Automatic Weather Station; AWS)의 일 기온 자료와 국립산림과학원에서 제공한 산악 기상관측 장비의 일 기온 자료를 사용하였다. 기상청에서 제공하는 자료는 대부분 평지에서 관측되고 있으나 국립산림과학원에서 제공하는 산악기상자료는 산 정상부의 기상을 관측한다. 평지기상과 산악기상은 지형의 영향으로 큰 차이를 보이며, 산불이 주로 발생하는 산악지형의 기온을 고려하기 위해 산악기상자료를 포함하였다. 2013년에서 2014년까지 자료의 생산이 끊김이 없는 관측소를 선정하여 강원도 지역에서 자동기상관측장비 67개소의 자료와 산악기상관측장비 8개소의 자료가 사용되었고, 경상도 지역에서는 자동기상관측장비 93개소의 자료와 산악기상관측장비 8개소의 자료가 사용되었다.

(3) 위성관측 자료

본 연구에서는 위성관측 기반의 산불발생위험지수의 산출을 위해서 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 지구관측시스템위

성(Earth Observation System, EOS) Aqua와 Terra에 탑재된 MODIS의 산출물을 사용하였다. MODIS는 약 705 km 고도에서 하루 또는 이틀 사이에 지구영역의 관측이 이루어지며, 관측 폭은 2330 km이고 36개 스펙트럼 밴드에서 0.25~1 km 분해능으로 관측한다. 수집된 자료를 통해 전 지구에 대한 육지와 해양의 표면온도, 구름, 에어로졸 정보, 토지피복, 산불탐지 정보 등을 제공한다.

남한지역의 토지피복을 확인하기 위하여 MODIS Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m SIN Grid(MCD12Q1) 2014년도 자료를 사용하였고, 위성관측기반 산불발생 위험지수를 산출하기 위해서 MODIS/Terra and Aqua Nadir BRDF-Adjusted Reflectance Daily L3 Global 500 m SIN Grid V006(MCD43A4) 자료와 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid V006(MOD11A1) 자료를 사용하였다(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>). MCD43A4 자료는 500 m 공간해상도, 1일의 시간해상도로 band 1~7의 반사율 값을 제공한다. 그 중 가시광 적색 대역인 band 1(620~670 nm)과 근적외선 대역인 band 2(841~876 nm)를 본 연구에 이용하였다. MOD11A1 자료는 1 km 공간해상도, 1일의 시간해상도로 지표면온도(Land Surface Temperature; LST[K])를 제공한다. 제공되는 LST 자료 중 주간에 관측한 주간 지표면 온도 자료를 사용하였다. MODIS 산출물의 공간해상도를 통일하기 위해서 NASA Goddard Space Flight Center에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool(MRT)을 이용하였다. 시뉴소이드 좌표계(sinusoidal projection)로 구성된 한반도 영역의 두 개의 tile(h27v05, h28v05) 자료를 수집한 뒤, MRT를 이용하여 각각의 산출물들을 접합하고, 기존의 시뉴소이드 좌표계에서 WGS84(World Geodetic System 1984) UTM 52N(Universal Transverse Mercator 52 North) 좌표계로 변경하고 0.01° 공간해상도로 재격자화하여 분석을 진행하였다.

(4) 산불발생 자료

본 연구에서는 국립산림과학원에서 제공받은 산불발생자료를 분석에 사용하였다. 산불발생자료에 포함된 속성자료는 발생된 산불의 발생일자, 진화일자, 공간 정보, 피해면적, 발생원인 등을 포함하고 있다. 연구기간인 2013년에서 2014년동안 전국에서 533건의 산불이 발생했으며, 그 중 강원도에서는 109건, 경상도에서는

278건의 산불이 일어나 약 73%의 산불이 강원도와 경상도 지역에서 발생했었다.

2) 분석방법

(1) 입력자료 산출

TVDI의 산출을 위해서는 위성 표면 반사도 자료를 통해 NDVI를 산출할 필요가 있다. NDVI는 가장 광범위하게 지표 식생을 표현하기 위해서 사용되어온 지수이다(Rouse *et al.*, 1974). 중심파장이 648 nm인 가시광 적색 대역과 858 nm인 근적외선 대역의 반사율의 차이와 비를 나타내는 지수로써, 식생의 활력도 및 녹피율을 표현한다. 식생의 녹피율에 따라 가시광 적색 대역에서 반사율의 차이가 크게 나타나는 특성을 이용한 지수로 다음 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

여기서 NIR은 중심파장이 858 nm인 근적외선 대역이고 RED는 중심파장이 648 nm인 가시광 적색 대역이다. NDVI는 -1에서 1사이의 값을 지니고, 식생의 생장이 활발할수록 1에 가까운 값을 가지고 식생의 생장이 활발하지 않은 경우에는 0에 가까운 값을, 구름, 물 등과 같이 수분을 포함하는 경우에는 -1에 가까운 값을 가진다.

(2) TVDI

TVDI는 NDVI와 지표면 온도의 산점도를 이용하여 지표와 식생의 건조도를 표현하는 지수이다(Fig. 2). 0에서 1까지의 NDVI 값이 가질 수 있는 최대, 최소 지표면

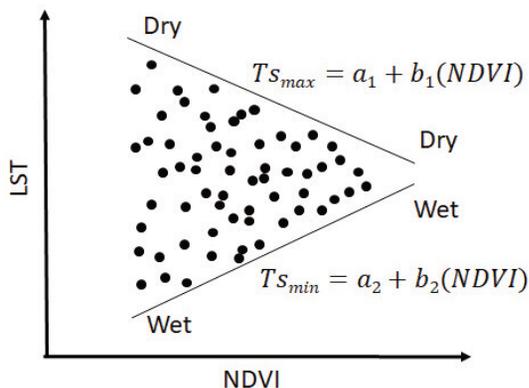


Fig. 2. Schematic Diagram of relationship between Land surface temperature (LST) and NDVI.

온도 회귀선을 구하고, 이를 통해 해당 격자의 NDVI가 가질 수 있는 온도 변화 범위 내에서 해당 격자의 지표면 온도가 가지는 변화량을 통해 지표 건조도를 표현한다.

식 (2)는 Sandholt *et al.*(2002)에서 제안한 TVDI 산출 식이다.

$$TVDI = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}} \quad (2)$$

$$Ts_{max} = a_1 + b_1 * NDVI \quad (3)$$

$$Ts_{min} = a_2 + b_2 * NDVI \quad (4)$$

식 (2)에서 Ts는 주어진 격자의 지표면 온도이다. Ts_{max}는 해당 격자의 NDVI가 가질 수 있는 지표면 온도의 최대값이며 Ts_{min}는 해당 격자의 NDVI가 가질 수 있는 지표면 온도의 최소값이다. NDVI와 지표면 온도 산점도를 통해 지표면 온도의 최대값(Ts_{max})과 최소값(Ts_{min})에 대한 선형회귀식의 절편과 기울기를 구하고, 이는 식 (3)과 식 (4)의 a₁과 b₁, a₂와 b₂에 해당된다. 본 연구에서는 NDVI의 값의 0.1 간격마다 온도의 최대값과 최소값을 이용해서 Ts_{max}와 Ts_{min}의 선형회귀식을 구하였다. Ts_{max}선에 Ts가 있을 경우 TVDI는 1이 되고 식생과 토양의 건조도가 가장 높고, Ts_{min}선에 Ts가 있을 경우 TVDI는 0이 되고 식생과 토양의 건조도가 가장 낮다.

3. 결과

1) TVDI의 적용 방법론 개선

선행연구들에서 TVDI를 이용해 남한지역 산불 위험도를 평가하려는 시도가 있었으나 그 결과는 다른 산불 위험도 평가지수들에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다(Kong *et al.*, 2017). 온도와 식생의 건조도를 동시에 고려하는 TVDI의 장점에도 불구하고 지역적 특성을 고려하지 않고 적용함으로써 그 결과가 기대에 미치지 못한 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 한반도 지역 TVDI 적용을 위해 TVDI의 지표 건조도 표현능력의 개선 방향을 제시하고자 한다. 첫째 TVDI 계산에는 위성자료를 기반으로 한 지상의 온도를 사용하여 왔으나 한반도의 경우 지상관측 기온과 위성 자료 기반의 지표면 온도는 상당한 차이를 나타냈다. 따라서 TVDI 산출에서 지상에서 실측된 지상관측 기온을 적

용하여 지상의 온도 정보의 오차를 줄이고 TVDI 값의 정확도를 높이고자 했다. 둘째로 최대, 최소 온도 회귀선을 산출에 일별 자료를 사용하였다. 기존 TVDI는 지표면 온도와 일일 NDVI 값으로 최대, 최소 온도 회귀선을 표현했으나, 본 연구에서는 각 월의 기온과 NDVI 자료를 이용하여 최대, 최소 온도 회귀선 표현하여 각 월내에서 연속성을 가지는 지표 건조도를 표현하고자 했다. 셋째, 선행연구에서는 한반도의 지역기후 특성으로 인한 식생의 분포 및 계절학적인 차이를 고려하지 않은 채로 한반도 전체의 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 TVDI 값을 지역별(강원도와 경상도)로 산출하여 각 지역 내에서의 식생의 특성을 고려함으로써 각 지역의 지표 건조도 표현 능력을 높이고자 했다.

(1) 지상관측 기온 적용

2013년에서 2014년의 위성에서 관측된 일별 주간 지표면 온도와 지상에서 관측된 오전11시의 기온의 시계열은 Fig. 3과 같다. 기온은 연구지역내의 AWS 지상 관측소와 산악기상 관측소의 평균값(푸른색 실선)이며, 지표면 온도는 각 지상 관측소 위경도의 일별 지표면 온도의 평균값(붉은색 실선)이다. 주간 지표면 온도의 관측시간은 오전 10시에서 12시 사이이므로 기온은 오전 11시의 자료를 사용하였다. 불규칙한 변화를 제거하고 장기적인 변동을 살펴보기 위하여 15일 이동평균을 하여 온도 자료를 살펴보았다. 기온과 지표면 온도 자료 모두 한반도의 계절적 변화를 반영하고 있다. 하지만 위성 자료로 산출된 지표면 온도는 전반적으로 높은 값을

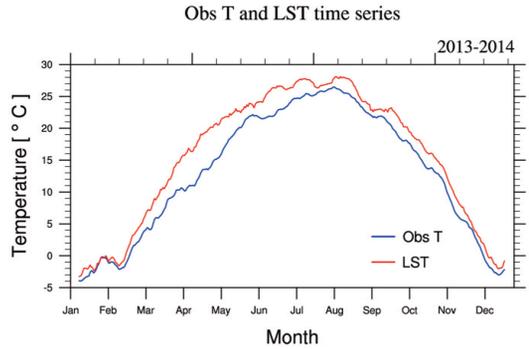


Fig. 3. Time series of the in-situ measured air temperature (blue line) and satellite-based surface temperature (red line) in the study area.

나타내며, 특히 산불위험이 큰 봄철에는 약 4°C 정도의 큰 차이를 나타내었다. 선행연구에서도 MODIS 지표면 온도 자료와 지상관측 기온 자료에 차이가 있음을 보였으며, 특히 지표 피복별 차이보다는 계절적 차이가 큰 것으로 분석되었다(Shin *et al.*, 2014). 따라서 본 연구에서는 TVDI의 지표 건조도 표현능력을 개선을 위해 지상에서 실측된 AWS 기온 자료와 산악기상관측 기온 자료를 활용하여 TVDI를 계산하였다.

(2) 기간별 구분

기존의 TVDI는 일 자료를 통해 TVDI를 산출하여 각 일의 가장 건조한 격자와 가장 습한 격자를 기준으로 각 일의 지표 건조도의 분포를 나타냈다. 이는 특정일의 지역간 상대적인 지표 건조도에 집중하여 지표건조도의 시간적인 연속성을 포함하지는 못하는 문제점이 있다.

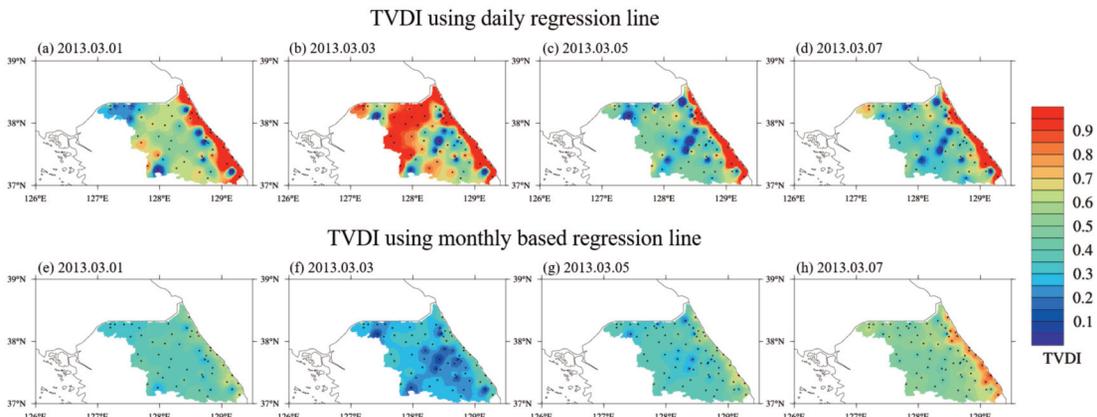


Fig. 4. Spatial Distribution of TVDI using daily data based regression line (top) and monthly data based (bottom) in Gangwon Province.

본 연구에서는 식 (3)과 식 (4)의 계수 a_1 과 b_1 , a_2 와 b_2 를 월별로 구하고 계산된 계수들로 일별 TVDI를 산출하여 계절적 차이를 고려하고자 하였다. 그럼으로써 각 월에서 지표 건조도의 연속성을 포함하여 각 월 내에서 건조한 시기를 파악하고자 했다.

Fig. 4는 강원도 지역에서 3월 1일부터 7일까지 2일 간격으로 산출된 TVDI의 공간분포이다. 봄을수록 건조도가 높으며, 내삽에 사용된 관측소는 점으로 표시하였다. 위 쪽의 그림은 각 일의 기온과 NDVI 자료를 통해 최대, 최소 온도 회귀선을 만들어 계산된 각 일의 TVDI(Fig. 4(a), (b), (c), and (d))이며, 아래 쪽의 그림은 3월 전체의 기온과 NDVI 자료를 사용해 최대, 최소 온도 회귀선을 만들어 계산된 각 일의 TVDI(Fig. 4(e), (f), (g), and (h))이다. TVDI의 공간분포는 각 지상관측소에서 산출한 TVDI를 역거리가중법을 통해 내삽하여 공간분포로 표현하였다. 위 쪽의 그림에서는 각 일의 상대적인 지표 건조도 공간 분포는 확인할 수 있지만 시

간적인 연속성을 가지지 못하고 있다. 아래 쪽의 그림(Fig. 4(e), (f), (g), and (h))에서는 각 일의 상대적인 지표 건조도의 공간 분포뿐만 아니라 3월 중 지표 건조도의 시간에 따른 변화 또한 확인할 수 있음이 드러난다. 강원도 지상관측소의 기온 평균값은 2013년 3월 1일은 1.4°C , 3일은 -1.63°C , 5일은 2.07°C , 7일은 6.47°C 이다. 이러한 강원도 영역 기온 평균값의 변화를 따라 Fig. 4(e)에서 Fig. 4(f)로 갈 때 건조도가 낮아지며 Fig. 4(h)로 갈수록 건조도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 기간별 구분의 적용을 하여 TVDI 계산을 할 경우에 특정 기간 내 지표건조도 시간별 추이의 표현능력이 기간별 구분을 적용하지 않은 TVDI에 비해서 높다는 것을 알 수 있다.

(3) 지역별 구분

TVDI 산출은 연구영역내의 지표면 온도의 최대 온도 회귀선과 최소 온도 회귀선을 이용한다. 따라서 연구영역 내에 다양한 지역적 특성이 포함할 경우 지역에

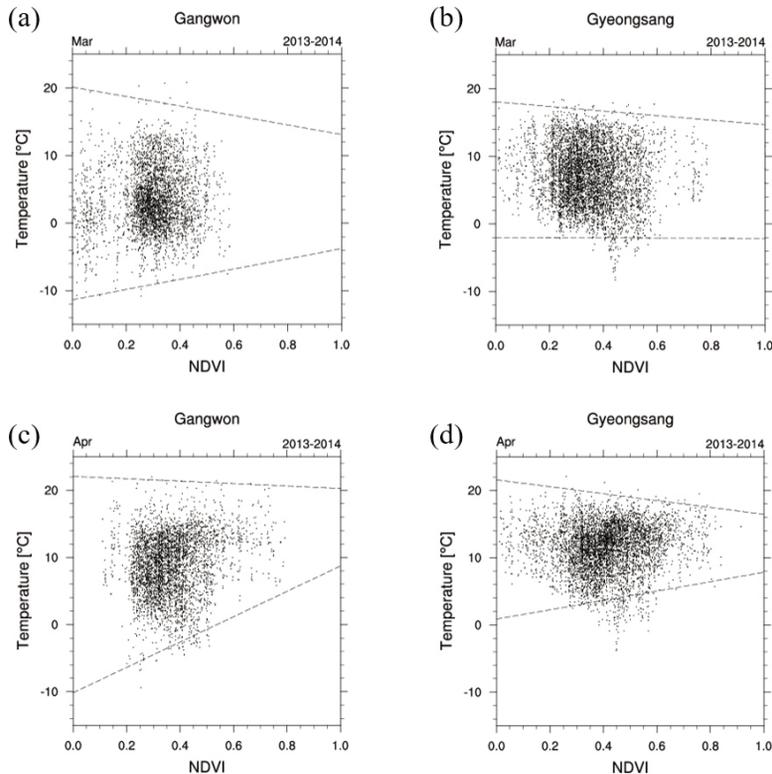


Fig. 5. Scatter plot of NDVI and temperature in Gangwon (left) and Gyeongsang (right) province on March (top) and April (bottom). Note that dashed lines are dry (top) and wet (bottom) edge.

따른 상대적인 건조도를 나타내기에는 유용하나 특정 지점의 절대적인 산불위험도를 나타내기에는 어렵다. 예를 들어 연구영역이 사막과 같이 건조한 지역과 우림과 같이 습한 지역을 모두 포함할 경우 지점의 온도나 식생의 변화가 크게 반영되지 못하여 사막과 같은 지역의 TVDI는 지속적으로 높게 나올 것이고, 우림과 같은 지역의 TVDI는 지속적으로 낮게 나오게 된다. 따라서 본 연구에서는 각 권역 별로 TVDI를 산출하여 산불 위험도 평가에 지역기후와 식생분포 등의 지역적인 특성을 반영하려 하였다.

Fig. 5는 3월과 4월의 강원도와 경상도의 기온과 NDVI의 산점도와 TVDI의 계수를 결정하는 최소 및 최대 온도 회귀선을 나타낸다. 3월의 강원도 지역(Fig. 5(a))은 NDVI가 낮은 영역에서 온도의 변화폭(-10~20°C)이 크게 나타나지만, 경상도 지역(Fig. 5(c))은 강원도 지역에 비해 온도의 변화폭(-1~19°C)이 적어 강원도 지역의 온도차가 크다는 것을 보여준다. 또한 3월의 강원도 지역에서는 대부분의 NDVI가 0.6 밑의 값을 가지지만 경상도 지역에서는 0.8까지의 값을 가져 3월은 강원도 지역보다 경상도 지역에서의 식생의 생장이 활발하다는 것을 보여준다. 이러한 지역별 온도와 식생의 차이는 지역별 최대, 최소 온도 회귀선의 차이를 나타내며 TVDI 계산에 지역별 구분의 필요성을 나타낸다.

3월의 강원도와 경상도에서 계산된 최대, 최소 온도 회귀선의 절편과 기울기를 Table 2에 기재했다. 이와 같이 구성된 각 지역의 온도 회귀선을 통해 특정 NDVI와 온도 값에서의 TVDI를 도출한다. TVDI 수식을 통해 3월의 특정 NDVI, 기온에서의 지역별 TVDI의 값의 차이를 확인하면 NDVI의 값이 0, 기온은 0°C 일 경우 강원도의 TVDI의 값은 0.36, 경상도 지역의 TVDI의 값은 0.1이 나오는 것을 확인할 수 있다. 같은 온도와 NDVI를 가진 경우에 강원도지역내에서의 NDVI와 기온이 0의 값을 가질 때 지역내의 건조도는 경상도지역내에서 NDVI와 기온이 0의 값을 가질 때보다 상대적으로

Table 2. The slope and intercept of the March maximum and minimum temperature regression line in Gangwon and Gyeongsang provinces

권역	a ₁	b ₁	a ₂	b ₂
강원도	-11.35	7.57	20.13	18.05
경상도	-2.04	-0.01	-7.02	-3.38

높다는 것을 나타낸다. 결과를 통해 권역 별로 집중하여 지역적인 특성을 반영한 세부적인 건조도의 차이를 표현 가능함을 알 수 있으며 이는 권역별 건조도의 감시에 이점을 보인다.

2) 사례 검증

사례 검증에서는 연구기간(2013-2014년) 내에 강원도와 경상도에서 산불의 피해규모가 크고 산불 건수가 많은 특정일을 선정하였다. 각 권역에서 선정된 산불 사례는 Table 3에 기재되어 있으며 특히 산림청에서 선정한 6건의 재난성 산불 중 하나인 포항-울주 산불사례(2013년 3월 9일)를 포함하였다(http://www.forest.go.kr/newkfsweb/html/HtmlPage.do?pg=/conser/conser_010303.html&mn=KFS_02_02_01_03_03).

Table 3. Province, date, burned area, and number of wildfire of selected wildfire cases

권역	일자	피해규모 (ha)	건수
강원도	2014.04.24.	4.91	6
경상도	2013.03.09.	93.63	9

검증을 위해 지상관측 기반의 기온과 기간별 및 지역별 구분이 적용된 TVDI와 위성관측 기반의 지표면 온도를 사용하고 일별로 산출된 TVDI의 공간분포를 지역별로 비교하였다.

각 산불사례에서 7일전, 3일전, 산불사례일의 위성관측 기반 지표면 온도로 산출된 TVDI(위)와 지상관측 기반 기온으로 산출된 TVDI(아래)의 공간분포가 Fig. 6와 Fig. 7에 나타나있다.

붉은 색으로 갈수록 TVDI의 값이 크고 건조도가 높다. 시간에 따른 TVDI의 변화를 살펴보면 선정된 경상도와 강원도의 산불사례일에 가까워질수록 개선된 방법을 적용하여 산출된 TVDI의 값이 증가하는 것으로 나타난다(Fig. 6(d), (e), (f) and 7(d), (e), (f)). 반면 기존의 방법으로 산출된 TVDI의 경우 각 시점에서의 상대적인 건조도를 나타내므로 각 일내에서 0에서 1까지의 최대, 최소 TVDI 값을 모두 가지게 된다(Fig. 6(a), (b), (c) and 7(a), (b), (c)). 따라서 개선된 TVDI보다 일정 기간에서의 건조도의 변화나 산불위험의 변화는 명확하게 나타내지 못한다. 공간분포를 살펴보면 위성관측 기반 지표면 온도를 통해 TVDI를 산출할 경우 구름으로 인하여

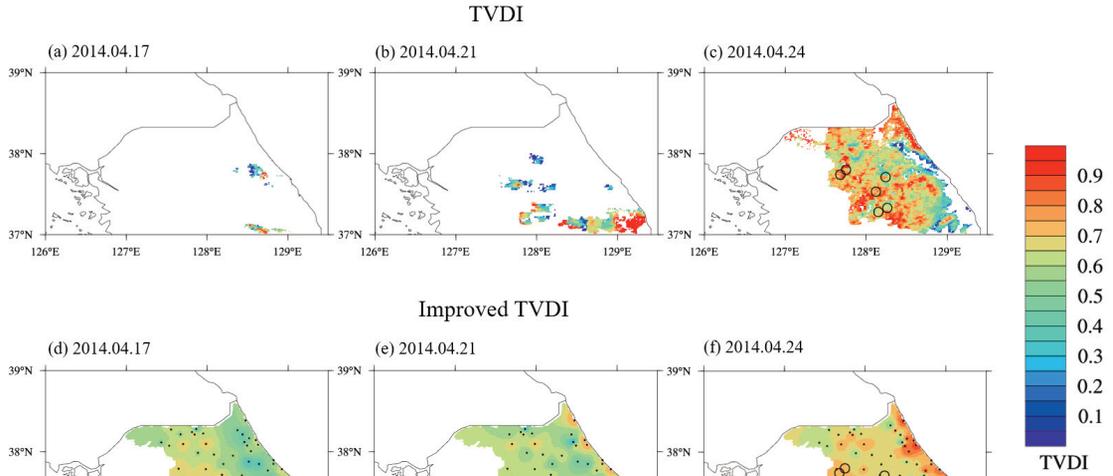


Fig. 6. Comparison of TVDI (top) and improved TVDI (bottom) in Gangwon province. TVDI value at 7 days before (left), 3 days before (middle) and at the incident date (right). Note that circles indicate where the wildfires started.

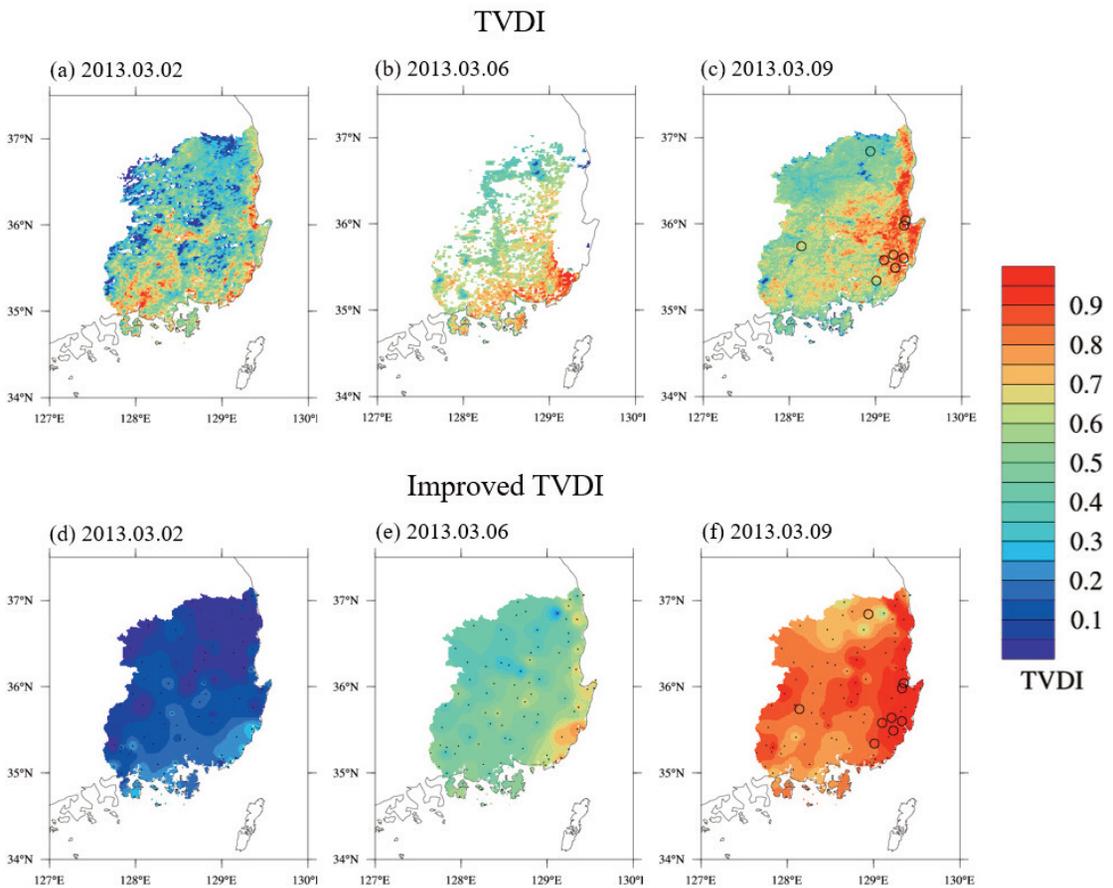


Fig. 7. Same as Figure 8 except forest fire cases on March 9, 2013 in Gyeongsang province.

지표면 온도의 값이 없을 경우 TVDI가 누락되는 영역이 나타났다(Fig. 6(a), (b) and Fig. 7(b)). 이와 같이 위성관측자료의 한계로 인해 지속적인 TVDI 산출이 어려우며, 누락된 자료로 인해 자료의 수가 적을 경우 위성관측기반의 지표면 온도를 이용한 TVDI는 해당 지역의 건조도를 표현한다고 보기 어렵다. 예를 들어 2014년 4월 17일의 위성관측기반의 TVDI는 약 500개의 격자를 이용하여 생산되었으며 강원도 영역의 총 격자수 18075개와 비교할 경우 비율은 0.03%에 해당된다(Fig. 6(a)).

4월 24일 강원도 사례의 경우 기존 방법으로는 산불 발생 7일전의 TVDI 공간분포(Fig. 6 (a))에서 산불발생지점의 TVDI 값이 6건의 산불 모두 산출이 되지 않음으로 인하여 비교는 어려우나 개선된 방법으로 산출된 TVDI는 산불발생지점의 TVDI 평균값이 1주일전인 0.66에서 산불발생 당일에는 0.7로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 시간적 변화는 경상도 산불 사례에서 더 뚜렷하게 나타난다. 2013년 3월 2일 9건의 산불발생지점의 TVDI 평균값은 0.12로 나타나며 이는 점차적으로 증가해 산불발생 3일전에는 0.59, 산불이 발생한 당일 0.92까지 증가하였다. 기존의 방법으로 산출된 TVDI의 경우 3일전 자료에서 산불 1건의 경우만 산출되어 비교가 어렵지만 산불발생지점의 TVDI의 평균값은 7일전 0.54, 3일전 0.46, 산불발생일에서는 0.74의 값을 보여, 증가 추세를 살펴보기는 어려우나 산불 발생일의 동해안 지역의 높은 값은 산불 발생지역과 일치하며 이는 개선된 방법과도 유사한 패턴을 나타내고 있다.

그러나 산불이 발생하지 않은 3월 2일의 TVDI값을 비교해 볼 경우 기존 방법을 사용해 산출한 TVDI는 민감도가 크게 나타나 산불위험도를 과다모의 하였다. 특히 남부 해안 지역(34.5°~35.1°N, 127.9°~129.5°E)의 평균 TVDI 값은 약 0.61과 0.21로 40% 차이를 나타내었다. 이는 과다모의된 위성 지표면온도와 기간별 구분이 적용되지 않았기 때문으로 보인다. 강원도 지역 사례 경우 산불발생일 전의 자료의 누락으로 인해 기존 방법의 민감도를 평가하기는 어려우나 산불이 발생한 2014년 4월 24일의 최대, 최소값 비교를 해보면 기존방법으로 산출된 TVDI는 최대값 1.42, 최소값 -0.32의 값을 나타내며 개선된 TVDI는 0.89와 0.47로 나타났다. 또한 경상

도 사례를 통해 유추해볼 때 강원도지역 역시 기존 방법에 민감도가 큰 것으로 보여진다. 특히 기존방법의 경우 TVDI값이 높은 동해안 지역의 자료가 누락됨으로 인해 산불 발생지역을 포함한 강원도 지역의 TVDI값이 과다 모의되었다. 이로 인해 산불 발생 지역에서 개선된 방법으로 산출된 TVDI 값 (0.7)보다 기존의 방법으로 산출된 TVDI 값(0.72)이 더 높게 나타났다.

특히 산불이 발생한 지역의 개선된 TVDI 값의 경우 산불발생일의 경상도 평균값 0.84 에 비해 7일 전 0.12 (14%), 3일전 0.59(70%) 그리고 산불발생일 0.92(109%)로 나타났다. 반면 기존의 TVDI는 경상도 평균값 0.59에 비해 7일 전 0.54(92%), 3일전 0.46(78%) 그리고 산불발생일 0.74(125%)로 나타났다. 이를 통해 개선된 방법은 산불발생 예측지역을 상대적으로 더 잘 모의하는 것으로 나타났다.

두 사례를 통해 TVDI와 Improved TVDI의 차이를 확인할 수 있었다. 첫 번째로 산출영역에 따른 건조도 차이이다. TVDI는 관측된 위성자료 내에서 상대적 건조도를 표현한다. 따라서 TVDI의 산출값은 일정지역이 구름으로 인해 대부분의 격자값이 결측되었을 때에도 관측된 격자값 내에서 상대적 건조도를 나타내게 된다. 관측된 격자의 수가 적더라도 그 사이에서 TVDI의 산출값이 가장 건조도가 낮은 0에서 가장 건조도가 높은 1의 값을 가지므로 이 경우 산출된 TVDI의 값이 해당 지역의 건조도를 반영한다고 보기 어렵다. 반면에 지상의 관측망은 해당지역의 기상을 대표할 수 있도록 입지 선정을 통해 구축되기 때문에 지상의 관측망을 이용한 Improved TVDI는 해당지역의 건조도를 표현하는데 있어서 이점이 있다. 두번째는 산불발생위험도의 시간적 연속성이다. TVDI는 해당 시간에서의 상대적 건조도만을 표현하지만 Improved TVDI는 기간별 구분을 통해 해당 기간 내에서의 상대적 건조도를 표현할 수 있다. Improved TVDI는 선택된 기간의 기온과 NDVI를 이용하여 최대, 최소 온도 회귀선을 결정하기 때문에 선택된 기간 내의 건조도의 변화를 반영한다. 이는 시간에 따른 산불발생위험도의 증감을 표현하는데 있어서 유리하다.

4. 결론

본 연구에서는 위성관측기반 TVDI를 통한 남한지역 산불발생위험도 평가 시 적용할 수 있는 개선된 방법론을 제시했다. TVDI 산출 과정에서 문제점을 확인하고 세가지 개선방향을 제시했으며 지상관측기반 기온의 적용, 기간별 구분, 지역별 구분이 그것이다. 개선방향 중 첫째로 연구지역내의 위성관측기반 지표면온도 자료와 지상관측 기온 자료를 비교하여 위성관측기반 지표면온도 자료와 지상관측 기온 자료가 차이가 있음을 확인하였으며 따라서 TVDI를 산출하는데 있어서 지표면온도 자료를 대체하여 실측된 지상관측 기온 자료를 이용하였다. 둘째로 기존의 TVDI는 시간적 연속성을 고려하지 못하는 문제점이 있음을 확인하고 월별로 기간을 구분하여 TVDI를 산출하여 TVDI에 시간적 연속성을 포함하고자 하였다. 월별로 기간을 구분하여 산출된 TVDI는 각 월 내에서 건조한 시점을 표현할 수 있음이 드러났다. 셋째로 TVDI의 공간분포를 표현할 시 각 지역별 특성으로 인하여 지역내의 변동은 과소평가되는 경향이 있으므로 지역별로 구분하여 TVDI를 산출하였다. 강원도와 경상도의 온도와 식생의 차이를 확인하였으며 권역별로 TVDI를 산출하여 이는 각 권역 내의 건조도의 차이를 표현함에 이점을 가졌다.

개선된 방법론으로 산출된 TVDI와 기존의 TVDI의 비교를 위하여 경상도와 강원도 지역에서 선정된 산불 사례에 대하여 개선 전후 TVDI를 산출하여 산불발생 위험도 표현능력을 비교했다. 선정된 사례에 대하여 개선된 TVDI는 기존의 TVDI와 다르게 산불사례일에 가까워질수록 건조도가 증가함이 드러났으며 산불발생 지역의 위험도 표현능력이 기존의 TVDI와 비교하여 높은 것으로 나타났다.

식생의 건조도는 산불의 발생, 산불의 강도 및 확산 속도와 영향을 미치는 중요한 요소이다. 이러한 이유로 미국과 캐나다 등 해외에서는 식생의 건조도가 고려된 산불 위험도 예측시스템을 개발하고 현업에 운영 중에 있으나 국내의 산불 예보시스템에는 아직까지 식생의 수분함량이 고려되고 있지 않은 상황이다. 앞으로 산불 기상 자료와 함께 위성자료를 이용한 식생의 건조도를 고려하여 산불발생 위험도를 산출한다면 좀 더 개선된 산불위험에 대한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 환경부 국립환경과학원 과제(NIER-2019-01-02-079)와 한국연구재단 신진연구과제(NRF-2018R1C1B6008223)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Akther, M. S. and Q. K. Hassan, 2011. Remote sensing-based assessment of fire danger conditions over boreal forest, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4): 992-999.
- Baek, S. G., H. W. Jang, J. S. Kim, and J. H. Lee, 2016. Agricultural drought monitoring using the satellite-based vegetation index, *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(4): 305-314.
- Bisquert, M. M., J. M. Sánchez, and V. Caselles, 2011. Fire danger estimation from MODIS Enhanced Vegetation Index data: application to Galicia region (north-west Spain), *International Journal of Wildland Fire*, 20(3): 465-473.
- Chowdhury, E. H. and Q. K. Hassan, 2015. Development of a new daily-scale forest fire danger forecasting system using remote sensing data, *Remote Sensing*, 7(3): 2431-2448.
- Chuvieco, E., D. Cocero, D. Riano, P. Martin, J. Martinez-Vega, J. de la Riva, and F. Perez, 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.
- Gu, Y., B. K. Wylie, and N. B. Bliss, 2013. Mapping grassland productivity with 250-m eMODIS NDVI and SSURGO database over the Greater Platte River Basin, USA, *Ecological Indicators*, 24: 31-36.
- Guo, G. and M. Zhou, 2004. Using MODIS land surface temperature to evaluate forest fire risk of

- northeast China, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(2): 98-100.
- Kang, J. M., C. Zhang, J. K. Park, and M. G. Kim, 2010. Forest fire damage analysis using satellite images, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 28(1): 21-28.
- Kong, I., K. Kim, and Y. Lee, 2017. Sensitivity Analysis of Meteorology-based Wildfire Risk Indices and Satellite-based Surface Dryness Indices against Wildfire Cases in South Korea, *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, 47(2): 107-120.
- Korea Forest Service, 2018. *2017 Statistical Yearbook of forest fires*, Korea Forest Service, Daejeon, Republic of Korea (in Korean).
- Lee, S.Y., 2010. Review of wildfire occurrences from 1960 to 2009, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 10(3): 51-55.
- Myoung, B., S. H. Kim, S. V. Nghiem, S. Jia, K. Whitney, and M. C. Kafatos, 2018. Estimating Live Fuel Moisture from MODIS Satellite Data for Wildfire Danger Assessment in Southern California USA, *Remote Sensing*, 10(1): 87.
- Oldford, S., B. Leblon, L. Gallant, and M. E. Alexander, 2003. Mapping Pre-Fire Forest Conditions with NOAA-AVHRR Images in Northern Boreal Forests, *Geocarto International*, 18(4): 21-32.
- Onderka, M. and I. Melicherčik, 2010. Fire-prone areas delineated from a combination of the Nesterov Fire-risk Rating Index with multispectral satellite data, *Applied Geomatics*, 2(1): 1-7.
- Park, J. S. and K. T. Kim, 2009. Evaluation of MODIS NDVI for drought monitoring: Focused on comparison of drought index, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 17(1): 117-129.
- Sandholt, I., K. Rasmussen, and J. Andersen, 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.
- Seong, N., M. Seo, K. S. Lee, C. Lee, H. Kim, S. Choi, and K. S. Han, 2015. A water stress evaluation over forest canopy using NDWI in Korean peninsula, *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(2): 77-83.
- Shin, H., E. Chang, and S. Hong, 2014. Estimation of near surface air temperature using MODIS land surface temperature data and geostatistics, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 22(1): 55-63.
- 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.
- Vidal, A. and C. Devaux-Ros, 1995. Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index, *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4): 207-224.
- Xu, K., X. Zhang, Z. Chen, W. Wu, and T. Li, 2016. Risk assessment for wildfire occurrence in high-voltage power line corridors by using remote-sensing techniques: a case study in Hubei Province, China, *International Journal of Remote Sensing*, 37(20): 4818-4837.