

산불연료의 연소특성을 활용한 산불위험지도 작성에 관한 연구 : 강원도 삼척시를 중심으로

A Study on Mapping Forest Fire Risk Using Combustion Characteristic of Forest Fuels : Focusing on Samcheok in Gangwon-do

Haepyeong Lee^{a,1}, Youngju Park^{a,*}

^a Department of Fire & Emergency Management, Kangwon National University, 346 Hwangjo-gil, Dogye-eup, Samcheok-si, Gangwon-do, 25949, Republic of Korea

ABSTRACT

In order to predict about forest fire behavior we constructed a database for combustion characteristic of forest fuels in Samcheok, Gangwon-do and prepared fire risk map and fire risk rating using GIS method in this study. For the mapping autoignition temperature, ignition time, flame duration time, total heat release and total smoke release are selected as the standardized parameters and the overall risk rating was made up of the ignition risk parameters(autoignition temperature, ignition time) and the spread risk parameters(flame duration time, total heat release, total smoke release). Forest fire risk was classified into 5 grades and lower grade of fire risk rating mean to correspond to more dangerous forest fire. As a result, the overall risk rating of Samcheok was classified into three grades from 1 to 3 and Nogok-myeon and Miro-myeon were turned out the most dangerous areas for forest fire. Because of the colony of pine and oak trees and the higher fire loads, the flame propagation will be carried out quickly in these areas.

KEYWORDS

forest fire risk rating
forest fire risk map
forest fire behavior
fire propagation
geographic information system

본 연구에서는 산불발생 시 화염행동을 예측하기 위하여 강원도 삼척시를 대상으로 산림가연물의 연소특성 DB를 구축하고, 연소특성 DB로부터 GIS를 이용하여 산불위험지도 및 위험도등급화 지도를 작성하였다. 맵핑을 위한 표준화 대상변수로는 자연발화온도, 착화시간, 화염지속시간, 총열방출량, 총연기방출량을 사용하였다. 또한, 총괄위험도 등급화는 착화위험변수(자연발화온도, 착화시간)와 확산위험변수(총열방출량, 화염지속시간, 총연기방출량)를 이용하였다. 연구결과, 강원도 삼척시의 산불위험도등급은 1~5등급(5단계)으로 등급화하였으며, 1등급에 가까울수록 산불위험성이 높은 구역으로 구분하였다. 삼척시의 착화위험등급은 1등급과 5등급으로 구분되어 2단계로 나타났다. 또한, 확산위험등급은 1등급, 2등급, 4등급, 5등급으로 구분되어 4단계로 나타났다. 총괄위험등급은 1등급, 2등급, 3등급으로 구분되어 3단계로 나타났으며, 산불위험등급이 가장 높은 1등급의 구역은 산불발생위험등급과 산불확산위험등급의 영향을 받는 것으로 나타났다. 1등급에 해당하는 구역은 삼척시의 우발리와 미로면 지역으로 나타났다. 이 지역은 산불발생 시 발열량이 높게 나타나는 소나무와 참나무 군락지로 산불발생 시 화재하중이 크게 작용하여 산불확산이 빠르게 진행될 것으로 사료된다.

산불위험등급
산불위험지도
산불행동
산불확산
지리정보시스템

© 2017 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-33-540-3147. Fax. 82-33-540-3149.
Email. yjpolymer@kangwon.ac.kr

1 Tel. 82-33-540-3141. Email. crelab@kangwon.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Mar. 16, 2017

Revised Mar. 20, 2017

Accepted Sep. 28, 2017

1. 서론

산불의 위험성을 인지하고 산불의 발생을 예측하며, 산불의 확산특성을 분석하기 위하여 다양하고 많은 모델링 작업을 수행하고 있다. 가연물의 분포 및 연소특성을 바탕으로 발생 가능한 일련의 산불시나리오를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 산불을 재구성하거나 산불을 조사하는 작업을 비롯하여 산불확산 및 산불확산의 예측을 통한 산불의 영향평가 등도 실시되고 있다. 이와 같은 작업들은 산불에 대한 위험성 평가에도 적용됨으로써 산불의 확산과정에 영향을 주는 지형, 기상, 그리고 연료와 같은 인자들을 이용하여 개별적 위험성이나 종합적 위험성을 나타낼 수 있다(D. H. Kim et al.). 산불의 행동 및 확산에 영향을 미치는 인자들 가운데 산림연료는 초본류, 관목류, 교목류로 구분되며, 산불발생 시 크고 작은 연료들이 지표화, 지중화, 수간화, 수관화와 같은 산불진행방향의 지표로 만들어낸다.(S. H. Lee; J. S. Oh et al.) 따라서 본 연구에서는 산림연료의 분포로부터 산불의 행동을 예측할 수 있는 방법의 일환으로서 강원도 삼척시를 대상으로 분포수종에 대한 연소특성 DB를 구축하고, 산불위험지도 작성 및 산불위험도의 등급화에 관한 연구를 수행하였다.

2. 연구동향 분석

임업선진국인 미국, 캐나다, 호주 등에서는 이러한 기상, 지형, 임상 등을 이용하여 산불에 대한 적극적인 대처 방안으로서 종합적인 산불관리시스템이 개발되고 있으며(J. K. Koh et al.), 지표화 연료의 산불 위험성을 예측하고자 산불강도를 단위면적당 발생열량으로 정의하여 수치화하는 BEHAVE 프로그램의 개발과 같은 많은 연구들이 수행되고 있다. 또한, 각 국가별 산림의 식생, 지형, 기상 등 산불관련 인자들을 조사·분석하고, 실내외 실험을 통하여 기초자료를 축적하며, 산불에 대한 응용연구를 통해 체계적이고 과학적인 산불관리 체계를 정립해 가는데 주력하고 있다. 또한, 캐나다의 산불위험도시스템인 CFFDRS(Canadian Forest Fire Danger Rating System)은 산불위험도시스템의 모듈(module)화 계획에 따라 만들어진 것으로서 CFFDRS 구성 체계는 산불기상지수시스템인 FFWIS(Forest Fire Weather Index System), 산불동태예측시스템인 FFBPS(Forest Fire Behavior Prediction System) 그리고 보조연료습도시스템을 포함하고 있다.(Washington Associated Press; R. Delmas et al.) 산불위험예보는 산불기상지수시스템과 산불동태예측시스템으로 부터 얻어진 결과를 종합하여 진행되며, 나머지 인자들은 보조적인 분석수단으로 이용된다. 국내에서도 환경인자가 산불의 온도 및 연소속도에 미치는 영향과 산불확산예측프로그램의 개발에 관한 연구들이 진행되고 있다. 최근에는 임내가연물의 연소특성과 기상인자의 영향에 관한 연구들이 지속적으로 수행되고 있으며, 임내가연물에 대한 산불위험성을 예측하기 위한 실험연구는 산불위험지수의 산정과 산불확산의 예측에서 필수적이다.

3. 연구내용 및 방법

3.1 대상지역 선정 및 매핑 작업

본 연구에서는 매핑작업을 위하여 분포수종, 연소특성에 대한 DB, 산불다발지역 임상도의 공간자료와 같은 입력 자료들을 활용하였다. 매핑에 필요한 정보를 획득하기 위하여 가장 중요한 입력변수 중의 하나가 연료의 종류와 물성인데 연료의 종류, 연료의 물성, 연료의 크기 및 배치 방향 그리고 연료의 위치에 관한 정보를 많이 알고 있을수록 오차를 줄일 수 있다. 산불위험지도를 작성하기 위하여 강원도 삼척시를 연구대상지로 선정하였고, 분포수종의 DB는 식물군락명의 속성정보를 활용하여 도시화하였으며, 식물군락명의 범위가 너무 방대하기 때문에 cone calorimeter 실험으로부터 취득한 자료들은 수치임상도 및 생태자연도의 범위를 모두 충족시키지는 못하였다. 본 연구에서는 침엽수종, 활엽수종, 관목류, 초본류 등의 연소특성을 사용하였는데 Table 1에는 본 연구에서 선정한 산림연료들에 대하여 수종별, 부위별 분포수종들을 제시하였다. 또한, 연소 실험을 수행하고자 영국 FIT사의 Dual cone calorimeter(ISO 5660-1), 자연발화온도시험기(Y. M. Hong & S. G. Jung), 연기밀도시험기(ASTM E 662) 등과 같은 장비들을 이용하였다. 산불위험지도 작성하기 위한 자료로 Table 2에 제시한 공간자료의 1:25000의 지형도와 국립산림과학원이 발행한 임상도를 이용하였는데 우선적으로 국토지리정보원에서 기 구축한 수치지형도

들 가운데 Fig. 1과 같이 강원도 삼척시 지역의 도엽들을 조사하여 수집하였으며, 자료처리는 ArcGIS Desktop ver.9.2 프로그램을 사용하였다.

Table 1. Configuration for species and parts of forest fuels

Distribution of Species			
Species (36)	Toll trees (21)	Conifers (6)	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus koraiensis</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Abies koreana</i> , <i>Taxus cuspidata</i>
		Broadleaf trees (15)	<i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus dentata</i> var., <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Prunus maximowiczii</i> , <i>Betula ermani</i> var. <i>communis</i> , <i>Carpinus tschonoskii</i> , <i>Daphniphyllum macropodum</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Prunus sargentii</i> Rehder, <i>Styrax japonica</i> , <i>Acer pseudosieboldianum</i> Kom., <i>Acer palmatum</i> Thunb.
	Shrubs (10)		<i>Lindera obtusiloba</i> Blume, <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Lespedeza maximowiczii</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i> Siebold & Zucc., <i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv., <i>Smilax china</i> L., <i>Staphylea bumalda</i> , <i>Rhododendron schlippenbachii</i> Maxim., <i>Sasa borealis</i> Makino, <i>Rhododendron mucronulatum</i> var. <i>ciliatum</i> Nakai
	Herbal plants (5)		<i>Festuca ovina</i> , <i>Isodon japonicus</i> Hara, <i>Oplismenus undulatifolius</i> , <i>Pueraria thunbergiana</i> , <i>Cirsium japonicum</i>
Green leaves (36)	Toll trees (21)	Conifers (6)	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus koraiensis</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Abies koreana</i> , <i>Taxus cuspidata</i>
		Broadleaf trees (15)	<i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus dentata</i> var., <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Prunus maximowiczii</i> , <i>Betula ermani</i> var. <i>communis</i> , <i>Carpinus tschonoskii</i> , <i>Daphniphyllum macropodum</i> , <i>Carpinus laxiflora</i> , <i>Prunus sargentii</i> Rehder, <i>Styrax japonica</i> , <i>Acer pseudosieboldianum</i> Kom., <i>Acer palmatum</i> Thunb.
	Shrubs (10)		<i>Lindera obtusiloba</i> Blume, <i>Zanthoxylum piperitum</i> , <i>Lespedeza maximowiczii</i> , <i>Zanthoxylum schinifolium</i> Siebold & Zucc., <i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv., <i>Smilax china</i> L., <i>Staphylea bumalda</i> , <i>Rhododendron schlippenbachii</i> Maxim., <i>Sasa borealis</i> Makino, <i>Rhododendron mucronulatum</i> var. <i>ciliatum</i> Nakai
	Herbal plants (5)		<i>Festuca ovina</i> , <i>Isodon japonicus</i> Hara, <i>Oplismenus undulatifolius</i> , <i>Pueraria thunbergiana</i> , <i>Cirsium japonicum</i>
Fallen leaves (3)	Toll trees (3)	Conifers (1)	<i>Pinus densiflora</i>
		Broadleaf trees (2)	<i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus dentata</i> var.
Branches (11)	Toll trees (9)	Conifers (3)	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Pinus thunbergii</i>
		Broadleaf trees (6)	<i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus dentata</i> var., <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus acutissima</i>
	Shrubs (2)		<i>Lindera obtusiloba</i> Blume, <i>Zanthoxylum piperitum</i>
Barks (9)	Toll trees (9)	Conifers (3)	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Pinus thunbergii</i>
		Broadleaf trees (6)	<i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus dentata</i> var., <i>Quercus mongolica</i> , <i>Quercus aliena</i> , <i>Quercus serrata</i> , <i>Quercus acutissima</i>
Pinecones (3)	Toll trees (3)	Conifers (3)	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Pinus thunbergii</i>

Table 2. Spatial data of forest fire risk map

	Scale	Thematic Map	Code	Data Type
Stock map	1:25,000	forest physiognomy	sang	polygon
Topographic map	1:25,000	contour	7111,7114,7217	line/point
		road	3111,3112,3113,3114,3115,3116,3117	line
		government office	4214,4217,4218,4219	point

3.2 연소특성 DB 구축 및 산불위험지도 작성

강원도 삼척시의 임상도에 따른 분포수종을 대상으로 수종별, 부위별, 고도별, 영급별, 지역별로 구분하여 함수율, 기상특성, 착화특성(자연발화온도, 착화시간, 화염지속시간), 발열량특성(총열방출량, 평균열방출율), 발연량특성(총연기방출량, 최대연기밀도, 최대연기밀도 발생시간), 연소생성물(평균중량감소율, 잔류량)에 대한 산림연료의 연소특성 DB를 구축하였다. 산불위험지도 작성은 분포수종에 대한 부위별 위험지도를 작성한 다음, 산불발생 시 위험정도를 예측하기 위하여 착화위험등급화와 확산위험등급화를 작업하고 이들 등급으로부터 총괄위험등급화 지도를 작성하였다. 산불위험지도의 작성과정을 살펴보면, 환경부 지리정보서비스에서 제공하는 생태자연도를 조사하여 축척 1:25,000의 16개 도엽을 제공받았으며, GIS의 병합기능을 이용하여 16개의 도엽을 하나의 단일 피쳐 클래스로 만든 후, 클립기능을 이용하여 삼척시 지역만을 별도로 추출하였다. 생태자연도의 필드 값에 포함된 식물군락에 해당하는 연소특성의 DB 값들을 삽입하여 결과를 도식화하는 방법을 이용하였다.



Fig. 1. The Samcheok map on a scale of 1:25,000

4. 결과 및 고찰

4.1 연소특성에 대한 DB 구축

Table 3에는 강원도 삼척시 분포수종들의 수종별 연소특성에 대한 DB를 제시하였는데 추후 산불조사 시, 수간화와 수관화에 의한 화염의 행동을 구분하기 위한 자료를 제공할 목적으로 낙엽, 생엽, 가지, 수피 등의 부위별 연소특성(Y. J. Park)에 대한 DB도 포함하였다. 연소특성 인자들로서는 착화온도, 착화시간, 소염시간, 화염지속시간, 총열방출량, 총연기방출량, 최대연기밀도, 중량감소율 등이 포함되었다. 구축한 DB로부터 분포수종들의 연소특성을 살펴보면, 착화온도의 범위는 178.00~494.00 °C로 나타났으며 굴참나무 가지의 착화온도가 최대값을 나타냈고, 신갈나무 생엽의 착화온도가 최소값을 나타냈다. 착화시간은 6~777 초의 범위 내에서 털진달래 생엽의 최대값을 나타냈고, 최소값은 해송 수피인 것으로 나타났다. 화염지속시간은 2~1482 초 정도의 범위 내에서 최대값은 굴참나무 수피였으며, 최소값은 신갈나무의 생엽이었다. 총열방출량은 2.60~101.52 MJ/m² 정도였는데 최대값은 굴참나무의 수피였고, 최소값은 굴참나무의 생엽인 것으로 나타났다. 총연기방출량은 17.00~1404.90 m³/m²로 확인되었으며 최대값과 최소값은 모두 소나무 생엽이 해당되는 것으로 나타났다.

4.2. GIS를 이용한 위험지도 작성

Fig. 2~5에는 본 연구에서 작성한 분포수종의 부위별(생엽, 가지, 수피) 산불위험지도를 제시하였다. Fig. 2의 생엽의 산불위험지도를 살펴보면, Fig. 2(a)의 착화시간은 0~86 초 사이에서 착화가 되는 13수종이 분포하는 것으로 나타났으며, 2개의 구역으로 구분되었다. Fig. 2(b)의 총열방출량은 0~19.2MJ/m², 19.3~28.7MJ/m², 28.8~53.2MJ/m², 그리고 53.3~63.5MJ/m²의 4개 구역으로 구분되어 최대열량을 방출하는 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다. 암적색으로 표시된 구역은 산불발생 시 상대적으로 많은 열량을 방출할 것으로 예측되며, 산불강도가 크기 때문에 산불발생 시 산불확산의 위험성이 높을 것으로 사료된다. Fig. 2(c)의 총 연기 방출량은 은 4개의 구역(0~177.5 m²/m², 177.6~209 m²/m², 2010~242.2 m²/m², 242.3~410.4 m²/m²)으로 구분되고, 최대연기방출량을 방출하는 2개의 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다. 암적색으로 표시된 구역은 산불발생 시 상대적으로 많은 연기를 방출할 것으로 예측되며, 많은 연기방출로 인해 가시거리 확보에 어려움을 초래할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 이러한 연기방출은 산불현장에 그늘음의 표식을 남기게 되어 산불행동에 결정적인 증거로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 3의 수피에 대한 산불위험지도를 살펴보면, Fig. 3(a)의 착화시간은 0~21 초 사이에서 착화가 되는 10개의 수종이 분포하는 것으로 나타났으며, 3개의 구역으로 구분되었다. Fig. 3(b)의 총열방출량은 9개의 수종이 4개의 구역(0~27 MJ/m², 27~67.4 MJ/m², 67.5~53.2 MJ/m², 53.3~101.52 MJ/m²)으로 구분되어 분포하는 것으로 나타났으며, 최대열량을 방출하는 1개의 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 3(c)의 총연기방출량은 3개의 구역(0~26.5 m²/m², 26.6~34.1 m²/m², 34.2~104.19 m²/m²)으로 구분되어 최대연기방출량을 방출하는 5개의 수종이 일부 분포하는 것으로 나타났다.

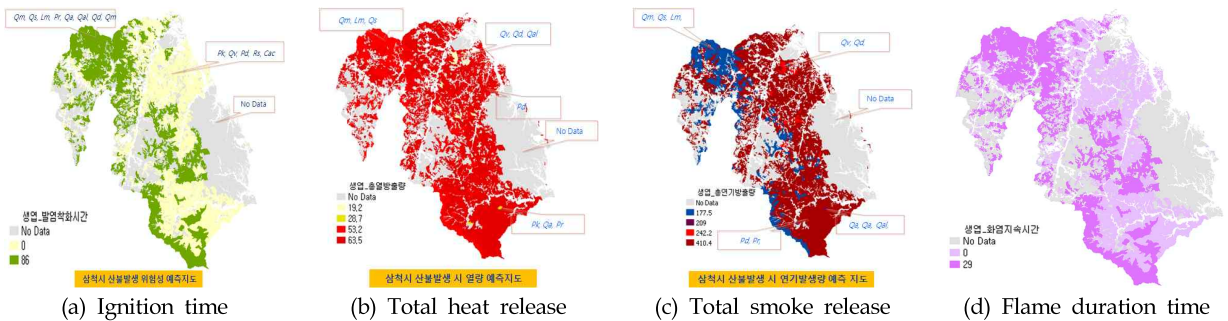


Fig. 2. The forest fire risk map for the green leaves of various trees.

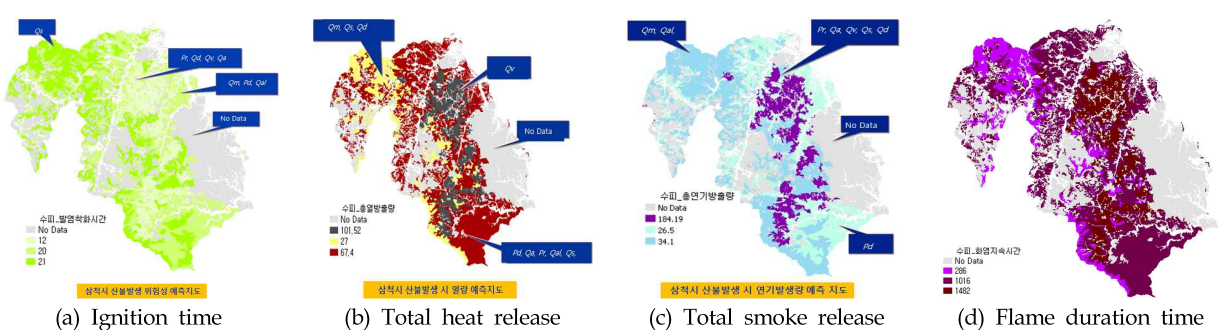


Fig. 3. The forest fire risk map for the barks of various trees.

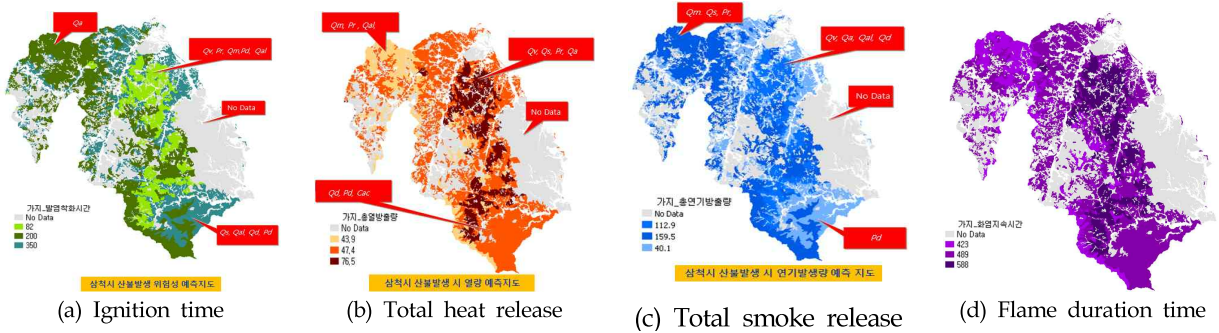


Fig. 4. The forest fire risk map for the branches of various trees.

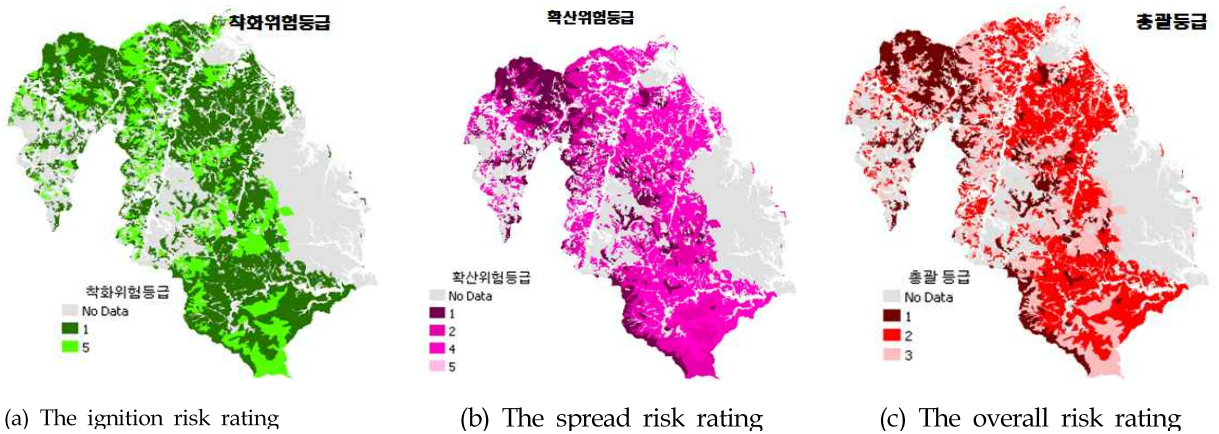


Fig. 5. The forest fire risk rating of Samcheok, Gangwon-do.

4.3. 산불위험도의 등급화

Table 4에는 산불 위험도의 등급화를 위한 표준화 대상변수와 위험 유형에 따른 적용변수들을 나타내었고, Fig. 5에는 산불 위험도의 등급화에 따른 산불위험지도를 제시하였다. 산불 위험도의 등급화는 표준화 대상변수들을 이용하여 1~5등급으로 분류하였는데 등급이 낮을수록 산불의 위험이 높은 것을 의미한다.

Fig. 5(a)의 착화위험성은 표준화한 자연발화온도와 표준화한 착화시간으로부터 착화위험등급화를 산정하였다. 결과를 살펴보면, 1등급과 5등급에 해당되는 것으로 나타났으며, 1등급으로 구분된 지역이 상대적으로 많은 것으로 나타났다.

Fig. 5(b)의 확산위험성은 표준화한 화염지속시간, 표준화한 총열방출량, 표준화한 총연기방출량으로부터 확산위험등급화를 산정하였다. 등급과 결과를 살펴보면, 1등급, 2등급, 4등급, 5등급의 4가지 등급에 해당되는 것으로 나타났으며, 2등급과 4등급의 분포가 상대적으로 많은 것으로 나타났다.

Fig. 5(c)의 총괄위험성은 착화위험성과 확산위험성으로부터 총괄위험등급화를 산정한 것인데 등급화 결과를 살펴보면, 1등급, 2등급, 3등급의 3가지 등급에 해당하며, 2등급의 분포가 많은 것으로 나타났다. 총괄위험도의 1등급은 착화위험등급과 확산위험등급의 영향을 받는 것으로 나타났다. 삼척시에서 산불위험도가 1등급인 지역은 노곡면과 미로면인데 소나무와 참나무 군락지로서 산불발생 시 발열량이 높기 때문에 산불위험도의 등급이 높은 지역으로 구분되었다.

Table 3. Database for combustion characteristic of major tree species in Samcheok, Gangwon-do

Forest Trees physiognomy	Species	Parts	Weather Condition				Ignition			Heat Release		Smoke Release		Combustion Products [50g]		
			Moisture Content, [%]	Temp. [°C]	Humidity, [%]	ATP, [°C]	Ignition Time, [s]	Blow out time, [s]	Flame duration time, [s]	THR, [MJ/m ²]	Mean HRR, [kW/m ²]	TSR, [m ³ /m ²]	Max. smoke density, [Ds]	Max. density time, [s]	Mean weight loss rate, [g/s]	Residue, [g]
Conifer	Pinus densiflora	Green leaves 1 age-class	182.21	23.7	89.4	327	-	-	-	16.6	8.8	187.1	219.6	467	0.027	0
	Pinus densiflora	Green leaves 2 age-class	201.46	23.6	86.5	378	-	-	-	33.5	17.91	196	289.4	456	0.028	0
	Pinus densiflora	Green leaves 3 age-class	192.36	23.6	86.5	380	-	-	-	18.7	10.32	233	228.4	503	0.027	0.5
	Pinus densiflora	Green leaves 4 age-class	167.10	20.4	75.8	325	-	-	-	18.3	9.99	290	265.3	516	0.028	0
	Pinus densiflora	Green leaves 5 age-class	158.2	21.5	81.9	310	-	-	-	26.2	14.2	227.8	265.7	561	0.029	2.3
	Pinus densiflora	Green leaves 6 age-class	177.30	20.4	75.8	355	85	88	3	14.1	7.07	358.5	286.9	514	0.028	0
	Pinus densiflora	Fallen leaves	32.07	17.5	90.3	226	9	936	927	65.5	29.88	268.5	625.1	450	0.02	6.2
	Pinus densiflora	Green leaves	141.00	12.0	34	290	-	-	-	28.4	15.5	343.2	207	844	0.027	0.5
	Pinus densiflora	Green leaves	164.62	24.7	87.5	285	-	-	-	63.5	35.27	410.4	411	470	0.027	1.2
	Pinus densiflora	Branch	53.52	17.5	90.3	390	350	839	489	47.4	26.49	40.1	523	639	0.028	0.2
	Pinus densiflora	Bark	22.81	17.5	90.3	450	20	1036	1016	67.4	25.97	26.5	59.91	566	0.018	4.7
	Pinus densiflora	Pinecone	27.79	10.7	60.9	380.7	13	322	309	41.7	33.61	230.81	924	732	0.0279	5.75
	Pinus koraiensis	Green leaves	106.73	19.1	92.5	295	-	-	-	28.7	15.9	209	328.8	510	0.027	1.5
	Pinus rigida	Green leaves	148.80	-4.3	50.3	340	35	85	50	20.6	10.98	293.1	383.3	530	0.026	1.8
	Pinus rigida	Green leaves	-	14.4	71.5	-	66	98	32	20.65	10.98	293.12	-	-	0.0257	1.8
	Pinus rigida	Branch	97.00	19.9	58.8	406	26	639	613	42.3	21.04	229.5	545	679	0.027	0.2
	Pinus rigida	Bark	18.00	19.9	58.8	431	8	805	793	44.9	23.08	313	509	566	0.025	2.8
	Pinus rigida	Pinecone	33.38	10.7	60.9	352.5	17	435	418	38.85	18.27	59.15	599.3	691	0.0185	16.33
	Pinus thunbergii	Green leaves	112.85	20.3	80.9	335	48	92	44	38.6	21.33	177.7	311.5	512	0.027	2
	Pinus thunbergii	Green leaves	-	-4.3	50.3	-	95	115	20	15.4	7.39	393.6	-	-	0.027	0.5
Pinus thunbergii	Branch	82.00	1.2	45.9	420	22	55	33	42.77	18.49	407.19	510	638	0.0319	-	
Pinus thunbergii	Bark	24.00	19.9	58.8	424	6	639	633	94.4	52.72	56.6	442	529	0.027	2.3	
Pinus thunbergii	Pinecone	26.58	10.7	60.9	371.8	33	404	371	37.21	13.68	78.16	605.5	680	0.1583	0.31	
Abies koreana	Green leaves	116.00	14.5	70.4	324	-	-	-	27	20	341	267	934	0.026	0.01	
Taxus cuspidata	Green leaves	185.00	14.5	70.4	324	-	-	-	33	20	370	163	842	0.0388	0.1	
Toll trees	Quercus variabilis	Fallen leaves	20.70	13	71.4	270	25	1013	988	67.3	34.53	389	271.5	780	0.025	1.4
	Quercus variabilis	Green leaves	154.00	21.8	92.8	340	27	80	53	25.8	14.33	242.2	187.6	1080	0.027	1.6
	Quercus variabilis	Branch	56.00	7.5	76.8	390	82	670	588	76.5	44.56	112.9	400.7	588	0.027	1
	Quercus variabilis	Bark	34.00	20.1	86.6	355	12	1492	1482	101.52	56.24	184.19	504.5	600	0.0277	0.9
	Quercus dentata var.	Fallen leaves	17.93	24.1	59.4	286	9	996	987	57.21	32.13	263.07	223.3	750	0.023	5.9
	Quercus dentata var.	Green leaves	140.84	27	69.6	382	87	116	29	18.2	9.58	276.6	176.6	811	0.026	1.7
	Quercus dentata var.	Branch	85.99	27	69.6	457	217	745	528	46.3	36.63	104.6	574.2	438	0.041	12.2
	Quercus dentata var.	Bark	69.50	27	69.6	420	11	141	130	19	14.81	130.5	367.6	468	0.025	19.3
	Quercus mongolica	Green leaves	120.44	21.8	92.8	280	45	60	15	26.9	14.92	203.2	55	1120	0.026	2.3
	Quercus mongolica	Branch	80.16	25.6	80	392	200	623	423	43.9	43.4	159.5	315.6	789	0.052	13.6
	Quercus mongolica	Bark	76.65	25.6	80	454	21	307	286	27	26.43	34.1	380.8	657	0.03	19.9
	Quercus aliena	Green leaves	148.99	26.9	69.4	372	85	143	58	31.2	17.06	424.6	243.2	660	0.026	2.8
	Quercus aliena	Branch	108.52	27	69.6	444	214	582	368	41.1	28.49	55.6	300.2	671	0.035	15.5
	Quercus aliena	Bark	27.53	26.9	69.4	396	16	687	671	50.6	37.2	43.7	518.1	644	0.024	17.8
	Quercus serrata	Green leaves	154.84	27.5	66.4	350	35	63	28	29.3	16.26	174.9	193.8	701	0.025	4.1
	Quercus serrata	Green leaves	121.00	14.7	71.8	272	-	-	-	31.64	17.57	280.35	108	1200	0.023	8.4
	Quercus serrata	Branch	69.95	27	69.6	494	240	537	297	54.4	30.44	125.8	294.1	559	0.03	18.2
	Quercus serrata	Bark	54.93	27	69.6	473	69	445	376	29.5	19.7	114.7	462.8	599	0.019	20.7
	Quercus acutissima	Green leaves	113.27	26.9	69.4	346	51	116	65	27.8	14.78	191.4	234.8	822	0.025	3.4
	Quercus acutissima	Branch	73.72	26.9	69.4	479	181	556	375	53.6	42.45	99.4	452.4	575	0.038	2.5
Quercus acutissima	Bark	34.47	26.9	69.4	432	10	546	536	42.4	26.19	132.3	368.9	493	0.019	20	
Prunus maximowiczii	Green leaves	149.00	14.5	70.4	380	-	-	-	34.67	19.23	274.18	139	498	0.046	5.1	
Betula ermani var. communis	Green leaves	139.00	14.5	70.4	383	-	-	-	31.78	17.68	225.33	170	875	0.027	2.8	
Carpinus tshonoskii	Green leaves	140.00	14.7	71.8	292	61	79	18	38.12	21.19	209.01	95	1012	0.022	9.3	
Daphniphyllum macropodum	Green leaves	248.00	14.5	70.4	380	-	-	-	18.59	10.27	140.43	83	993	0.027	1.9	
Carpinus laxiflora	Green leaves	132.00	14.7	71.8	310	-	-	-	28.49	15.79	473.4	97	1044	0.026	3.2	
Prunus sargentii Rehder	Green leaves	215.00	14.5	70.4	381	-	-	-	21.79	12.04	233.7	147	879	0.026	2.3	
Styrax japonica	Green leaves	221.00	14.7	71.8	324	-	-	-	36.83	20.44	570.4	124	1200	0.025	4.5	
Acer pseudosieboldianum Kom.	Green leaves	148.00	14.7	71.8	322	-	-	-	28.25	15.67	427.25	131	930	0.025	4.3	
Acer palmatum Thunb.	Green leaves	224.00	14.7	71.8	320	57	80	23	30.3	16.54	285.6	114	1106	0.026	2	
Shrubs	Lindera obtusiloba Blume	Green leaves	205.32	22	75.9	410	39	141	102	22.58	12.54	150.3	151.2	760	0.027	1.1
	Lindera obtusiloba Blume	Branch	98.23	27.2	73.3	440	141	551	410	57.9	32.18	52.1	209.8	800	0.03	0.1
	Zanthoxylum piperitum	Green leaves	308.85	26.3	73.1	410	-	-	-	60.5	33.6	435.9	114.3	800	0.027	1.6
	Zanthoxylum piperitum	Branch	87.50	27.2	73.3	440	145	563	418	52.9	29.52	23.4	239.7	600	0.029	0.1
	Lespedeza maximowiczii	Green leaves	167.41	26.3	73.1	310	12	61	49	34.5	18.96	46.2	174.5	870	0.026	3.6
	Zanthoxylum schinifolium Siebold & Zucc.	Green leaves	287.84	21	82.3	400	-	-	-	19.3	7.12	71.4	132.7	1010	0.018	1
	Corylus heterophylla Fisch. ex Trautv.	Green leaves	151.62	21	82.3	380	-	-	-	75.3	41.82	136.5	91.38	1200	0.026	2.9
	Smilax china L.	Green leaves	158.54	17.8	80.8	400	-	-	-	7.9	3.55	168.3	-	-	0.028	0.5
	Staphylea bumalda	Green leaves	202.34	17.8	80.8	390	-	-	-	22	12.18	142.6	-	-	0.027	0.8
	Rhododendron schlippenbachii Maxim.	Green leaves	196.57	22.2	67.3	405	-	-	-	43.9	24.24	205.4	-	-	0.027	0.9
Sasa borealis Makino	Green leaves	98.00	14.7	71.8	251	33	169	136	51	23	441	95	967	0.0235	7.37	
Rhododendron mucronulatum var. ciliatum Nakai	Green leaves	164.00	14.5	70.4	343	777	795	18	39	30	166	98	1170	0.0283	3.96	
Herbal plants	Pestuca ovina	Green leaves	180.63	12	44.6	400	39	41	2	27.52	14.17	113.61	166.5	280	0.0264	0.5
	Isodon japonicus Hara	Green leaves	483.96	27.8	65.9	455	-	-	-	18.4	10.18	198.2	54.84	880	0.027	1
	Opismenus undulatifolius	Green leaves	427.45	21.6	85.5	400	-	-	-	19.6	10.73	25.5	155	600	0.027	0.9
	Pueraria thunbergiana	Green leaves	285.81	20.2	64.4	420	-	-	-	19.4	10.39	157	55.3	1200	0.026	1.2
	Cirsium japonicum	Green leaves	201.35	20.2	64.4	425	-	-	-	22.9	12.62	51.3	89.6	720	0.025	4.1

Table 4. Standardized parameters for the forest fire risk rating

	Standardized parameters
Formula	$\text{standardized parameter} = \frac{\text{parameter} - \text{average}}{\text{standard deviation}}$
Selected Parameters	autoignition temperature, ignition time, flame duration time, total heat release, total smoke release
Ignition Risk	standardized autoignition temperature + standardized ignition time
Spread Risk	(standardized flame duration time + standardized total heat release + standardized total smoke release) × (-1)
Overall Risk	ignition risk + spread risk
Risk Grade	5 grades (lower grade mean to correspond to more dangerous)

5. 결론

본 연구에서는 산불발생 시 화염행동을 예측하기 위하여 강원도 삼척시를 대상으로 산림연료의 연소특성 DB를 구축하고, 연소특성 DB로부터 GIS를 이용하여 산불위험지도 및 산불위험도의 등급화를 작성하여 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 주요 분포수종에 대해서 구축한 연소특성 DB를 살펴보면, 착화온도의 범위는 178.00~494.00 °C, 착화시간의 범위는 6~777 초, 화염지속시간은 2~1482 초, 총열방출량의 범위는 2.60~101.52 MJ/m², 총연기방출량의 범위는 17.00~1404.90 m³/m²인 것으로 나타남으로써 수종별·부위별 연소특성의 차이가 큰 것을 확인하였다.
- (2) 생엽의 산불위험지도에서 착화시간은 0~86 초 사이에서 2개의 구역으로 구분되었으며, 총열방출량은 4개의 구역(0~19.2 MJ/m², 19.3~28.7 MJ/m², 28.8~53.2 MJ/m², 53.3~63.5 MJ/m²)으로 구분되고 최대열량을 방출하는 1개의 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다. 총연기방출량은 4개의 구역(0~177.5 m³/m², 177.6~209 m³/m², 2010~242.2 m³/m², 242.3~410.4 m³/m²)으로 구분되고 최대연기방출량을 방출하는 2개의 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다.
- (3) 수피의 산불위험지도에서 착화시간은 3개의 구역으로 구분되었으며, 총열방출량은 4개의 구역(0~27 MJ/m², 27~67.4 MJ/m², 67.5~53.2 MJ/m², 53.3~101.52 MJ/m²)으로 구분되고 9개의 수종이 분포하는 것으로 나타났는데 최대열량을 방출하는 1개의 수종이 다량 분포하는 것으로 나타났다. 총연기방출량은 3개의 구역(0~26.5 m³/m², 26.6~34.1 m³/m², 34.2~104.19 m³/m²)으로 구분되고 최대연기방출량을 방출하는 5개의 수종이 일부 분포하는 것으로 나타났다.
- (4) 가지의 산불위험지도에서 착화시간은 0~350 초 사이에서 착화가 되는 10개의 수종이 분포하는 것으로 나타났으며, 3개의 구역(0~82 초, 83~20 초, 201~350 초)으로 구분되었다. 총열방출량은 3개의 구역(0~43.9 MJ/m², 44.0~47.4 MJ/m², 47.5~76.5 MJ/m²)으로 구분되며, 최대열량을 방출하는 4개의 수종이 일부 분포하는 것으로 나타났다. 총연기방출량은 3개의 구역(0~40.1 m³/m², 40.2~112.9 m³/m², 113.0~159.5 m³/m²)으로 구분되고 최대연기방출량을 방출하는 3개의 수종이 일부 분포하는 것으로 나타났다.
- (5) 강원도 삼척시의 산불 위험도 등급은 5 등급으로 등급화 하였는데 착화위험도는 1등급과 5등급에 해당되며, 1등급이 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다. 확산위험도는 1등급, 2등급, 4등급, 5등급에 해당되며, 2등급과 4등급의 분포가 많은 것으로 나타났다.
- (6) 삼척시의 산불 총괄위험도는 1등급, 2등급, 3등급에 해당하며, 2등급의 분포가 많은 것으로 나타났는데 총괄위험도 1등급은 착화위험등급과 확산위험등급의 영향을 받은 것으로 나타났다. 삼척시 노곡면과 미로면은 1등급 지역인 소나무와 참나무 군락지이기 때문에 산불발생 시 발열량이 높은 지역으로서 산불의 위험도가 높은 지역으로 구분되었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B02008374).

References

- ASTM E 662, " Test method for specific optical density of smoke generated by solid materials", 2003.
- D. H. Kim, M. B. Lee, Y. H. Kang and S. Y. Lee, "Analysis of Ignition risks with Experimentation of Surface Substance Ignition Properties", Korean Society of Hazard Mitigation, Fall Conference Journal, pp. 379-384, 2006.
- ISO 5660-1, "Reaction to fire part 1, rate of heat release from building products(Cone Calorimeter)", 2002.
- J. K. Koh, C. I. Choi, and H. S. Kim, "A Study on Adapting to Climate Change in Local Governments-Focusing on Natural Disasters", Journal of the Korean Regional Development Association, Vol. 22, No. 1, pp. 67-86, 2010.
- J. S. Oh, M. B. Lee et al., "Development of Forest Fire Behavior Prediction and Monitoring Techniques", Ministry of Science and Technology Research Report, p. 368, 2002.
- R. Delmas, J. P. Lacaux, and D. Brocard, Determination of biomass burning emission factors: Method and Results. Environmental Monitoring and Assessment 38, Kluwer Academic Publishers, pp. 181-204, 1995.
- S. H. Lee, "Fire Investigation Theory and Practice", Book Publishing Donghwa Technology, pp. 377-405, 2012.
- Washington Associated Press, "California forest fire, Large quantity emission of greenhouse gases emission". Younhap News Agency, <http://www.2006un.org/8756>, Accessed on 2 November, 2007.
- Y. J. Park, "A Study on the Afforestation of Fire-Resistant Forest through an Application of Forest Fire Investigation, Journal of the Korean Society of Safety", Vol. 26, No. 5, pp. 118-129, 2011.
- Y. M. Hong, S. G. Jung, "Safety engineering experiment", Book Publishing Donghwa Technology, pp. 9-11, 1992.