양간지풍 특성을 고려한 동해안 대형 산불의 수치시뮬레이션 Numerical Simulations of Large Forest Fires in the East Coastal Region of Korea Considering the Yangganjipung Local Wind

김남균* · 곽재환** · 김만일***

Kim, Namgyun*, Kwak, Jawhwan**, and Kim, Man-Il***

Abstract

The east coastal region in Gangwon-do, Korea, has a high risk of large forest fires in the spring owing to the local wind called Yangganjipung. The East Coast forest fire of April 2000, the Yangyang forest fire of April 2005, and the Goseong forest fire of April 2019 are examples of large-scale forest fires caused by Yangganjipung. In the spring, the low pressure in the south and the high pressure in the north in Korea result in a western wind. This western wind is called Yangganjipung, and it exhibits characteristics of high temperatures, dryness, and high wind speeds over the Taebaek Mountains. Given that the risk of large forest fires is high in the east coastal region, the local government has established a forest fire prevention center to respond efficiently to such events. However, limitations pertaining to controlling the natural environment and limited equipment and workforce exist. In this study, the characteristics of previous forest fires in the east coastal region were analyzed through case studies, and two-dimensional numerical simulations of the Goseong forest fire of April 2019 were performed. The spreads of the predicted and actual forest fires were similar. In addition, forest fire spreading can be predicted more accurately if the model is improved by clarifying the terrain and fuel details. An effective plan for providing evacuation routes and resource allocation to mitigate large forest fires can thus be achieved using numerical simulation results.

Key words : Large Forest Fire, Yangganjipung, Numerical Simulation

요 지

강원도 동해안 지역은 양간지풍의 특성으로 인해 봄철 산불 발생시 대형 산불로 확산될 가능성이 높다. 2000년 동해안 산불, 2005년 양양산불, 2019년 고성 산불이 이러한 양간지풍의 영향을 받아 대형 산불로 기록된 사례이다. 양간지풍은 3월~4월 봄철 한반도 남쪽에서의 저기압과 북쪽에서의 고기압이 배치가 되어 발생한 서풍이 발생한다. 발생한 서풍은 태백산맥을 넘어 고온 건조하고 강한 풍속을 지닌다. 정부에서는 동해안 지역의 대형 산불 위험성이 높아짐에 따라 산불방지센터를 설치하여 적극적인 대응을 수행하고 있다. 하지만, 자연 환경을 제어하고 제한된 장비와 인력을 투입하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 과거 동해안 산불의 사례조사를 통해 특징을 분석하고, 2019년 고성에서 발생한 산불의 사례에 대하여 2차원 수치모델을 이용해 확산을 예측하였다. 예측된 산불 확산은 실제 산불 확산 범위와 방향을 비슷하게 예측하였으며, 지형정보의 구체화와 연료 정보의 구체화를 통해 모델을 개선하면 보다 정확한 산불의 확산을 예측할 수 있다고 판단된다. 이러한 수치해석 정보를 구축하면, 산불 발생시, 지역주민의 대피나 자원의 배치 등 효율적인 대응을 할 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 대형 산불, 양간지풍, 산불 수치해석

*정회원, 산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원(E-mail: knkblue2@hanmail.net)

Member, Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

**정회원, ¹산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원

²금오공과대학교 토목공학과 박사과정

Member, ¹Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

***교신저자, 정회원, 산림조합중앙회 산림종합기술본부 책임연구원(Tel: +82-42-341-1026, Fax: +82-42-637-8046, E-mail: mikim@nfcf.or.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

1. 서 론

2019년 산림청 산불통계연보에 따르면 최근 10년(2010~2019년)간 평균 440건의 산불이 발생하여 857 ha의 산림이 소실되었고, 봄철에 많이 발생하였으며 강원도가 가장 넓은 훼손 면적을 가졌다(Park et al., 2020). 산림 피해 면적이 100 ha 이상, 또는 24시간 이상 지속되는 대형 산불은 13건으로 이중 8건이 강원도 동해안지역이고, 5건이 경상북도와 경상남도 내륙지역 이었다(KFS, 2020). 강원도는 전국 산림면적의 21%를 차지하고, 강원도 전체면적의 81%를 점유하고 있어, 산불발생에 따른 피해확산이 취약한 조건을 지니고 있다. 실제로, 10년 평균 산불 피해 면적 1위 지역은 강원도로 530.91 ha로 2위 지역인 경상북도의 154.21 ha보다 약 3.5배 높다. 이에 따라 정부에서는 국가산불위험예보시스템을 이용해 동해안 산불 위험정보는 별도로 표기하여 특별 관리하고 있으며, 강원도에서는 영동지방의 산불을 관리하기 위하여 강원도동해안산불방지센터를 설립하여 대형 산불 대응에 적극적인 정책을 펼치고 있다.

강원도 동해안지역에서의 대형 산불의 비중이 높음에 따라 많은 연구자들에 의해 지역특성이 고려된 다양한 연구가 수행되었다. Lee et al. (2001)은 강원도지역의 시계열 기상자료와 산불발생 현황자료를 이용하여 대형 산불의 기상요인으로는 평균온도, 최저온도, 최저초상온도, 평균풍속, 최대풍속으로 규명하였고 산불 출화일을 근거로 산불 발생일의 유사성정도에 따라 다차원척도분석을 통하여 5개의 유형으로 구분하였다. 강원도 18개의 시·군은 유형 I은 삼척, 강릉, 춘천, 원주 흥천, 횡성, 유형 II는 동해, 태백, 양양, 평창, 유형 III은 정선, 철원, 화천, 유형 VI는 고성, 인제, 양구, 유형 V는 속초, 영월로 구분하여 분류된 유형에 따라 산불발생 특성이 비슷하다고 제시하였다. Lee et al. (2007)은 2000년 강원도 동해안 산불 사례를 이용하여 산업 연관분석을 통해 산불피해 복구를 위한 정부지원액이 지역 경제에 미치는 파급효과를 분석하였다. Lee and Lee (2009)는 전국을 시, 군, 구 단위로 산불통계자료를 이용하여 공간분포 특성분석을 하였고, 강원 영동지방 4개의 시, 군을 가장 위험한 군집으로 분류하였다. Koo et al. (2010)은 동해안 산림지역의 수종별 지위지수 추정식 개발에 따른 산림생산력을 추정하여 산불 피해지의 복구를 위한 수종선택에 필요한 정보를 제공하였다. Lee and Lee (2011)는 우리나라 30 ha 이상의 산불피해 분포 및 특성을 조사하여 강원지역의 산불 위험성이 높은 것으로 분석해 산불방지 정책 수립에 기여하였다. Kim et al. (2015)는 강원 영동지역의 1990년대와 2000년대의 기상인자를 비교하여 다중회귀분석을 이용해 산불발생건수와 피해면적을 비교하였다. Kim et al. (2019)는 2019년 고성 대형 산불 사례를 분석하여 산불 대응 의사결정 트리의 강화방법을 제안하였다. Chung and Kim (2020)은 2019년 강릉-동해 산불 피해지역에 대하여 지형정보를 정구

화 하는 기법을 제시하였다.

산불에 대응하기 위하여 지역특성을 고려한 연구들을 정책에 반영하는 것도 중요하지만, 산불의 확산을 저지하기 위한 의사결정을 위하여 산불을 예측하는 것이 중요하다. 방화선 구축, 주민 대피소 지정, 공중진화 방향 등 다양한 전략과 전술을 구축하기 위해선 산불의 방향을 사전에 파악해야 대응을 원활하게 진행할 수 있기 때문이다. 이러한 산불의 예측을 위하여 다양한 수식을 통해 수치해석 모델이 개발되고 있으며, 크게 물리모델과 경험모델, 두 가지로 나눌 수 있다. 물리모델은 분석적으로 연료, 기상, 산불속성 등 독립변수의 변화에 따라 산불 확산의 예측이 가능하지만 독립변수가 제한적이고, 현재까지의 개발된 모델은 차원이 낮아 공간적인 해석결과가 현실을 정확하게 반영하지 못하는 단점이 있다. 이와 반대로 경험적인 모델은 산불의 현실적인 모습을 반영하지만 산불이 발생한 지역 공간에 대하여 한정적이기 때문에 타 지역의 속성정보를 반영할 경우 확산 예측의 정확성이 매우 낮은 단점이 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위한 해석기법 연구들이 수행됨에 따라 준 물리모델, 준 경험모델 등이 개발되고 있다. 산불의 성장패턴을 예측하기 위한 기법으로 타원형 산불 확산 모델(Anderson et al., 1982), 확률론적 기법(Niessen and Blumen, 1988), 셀룰러 오토마타기법(Clarke et al., 1994), 마르코프 과정(Catchpole et al., 1989) 등이 있다.

우리나라에서도 다양한 기법을 이용하여 산불의 발생 및 확산을 예측하였으며, Lee et al. (2008)은 물리적 기반의 화재해석 프로그램인 WFDS를 이용하여 지형변화에 따른 산불 전파 시뮬레이션의 기초자료를 제공하였다. Park et al. (2009)는 캐나다 산불 기상지수를 이용하여 강원지역의 산불 발생 예측 확률모형을 개발하였다. Lee et al. (2011), Won et al. (2012)은 각각 국내 과거 산불 자료와 디지털예보자료를 기초로 하여 전국 산불 발생 위험을 예측하였다. Song et al. (2013)은 셀룰러오토마타 방법을 이용하여 바람요인을 고려한 산불의 확산모델을 개발하였다. 선행 연구자들에 의해 여러 산불의 발생과 확산 예측모델이 개발되었으며 산불 확산 예측을 위해 공통적으로 중요한 요소로 기상, 연료, 지형을 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서는 세가지 중요한 요소를 모두 고려하는 프로그램인 FARSITE를 이용하여 2019년 강원도 고성, 속초에서 발생한 대형 산불을 예측하고 이와 유사한 과거 산불인 2005년 양양산불, 2000년 강릉 산불을 비교하여 강원 동해안 대형 산불의 특성을 분석하였다.

2. 강원도 동해안 대형산불 사례분석

2.1 2000년 동해안 대형산불(강릉지역)

2000년 동해안 산불 당시 4월 7일 고성군을 시작으로 강릉, 동해, 삼척등 4개 시군 13개 지역에서 동시적으로

발생하여 4월 15일 완전 진화되었다. Fig. 1은 강릉지역의 산불피해 지역을 나타낸다. 발화지점은 강릉시 사천면 석교리로, 2000년 4월 7일 8시 25분경 쓰레기 소각으로 산불 확산이 시작되었다. 8시 55분 강릉시청 상황실에 보고접수되어 9시 30분 공무원, 군인, 소방관 등 총동원령이 발령되었고, 강풍으로 인하여 헬기 지원은 없었다. 11시 20분 산불로 인한 사망자가 발생되었고, 15시 30분 중상 환자가 발생하였다. 같은 시간 물적 피해상황으로 주택 25동, 창고 1동, 사찰 1개소가 전소되었다. 15시 43분 헬기 진화가 시작되었으나 19시 20분부터는 야간 운행이 어려워 진화작업은 인력으로 수행되었다. 4월 8일 5시 20분 부터 진화작업이 재개되어 6시 55분 산불진화가 완료됨에 따라 뒷발감시 절차를 수행하였다(Gangwon province, 2001).

2.2 2005년 양양 대형산불

강원도 양양군 산불은 2005년 4월 4일 23시 53분 파일리 인근 야산에서 최초 발생하였다. Fig. 2는 당시의 피해 면적을 나타낸다. 산불 확산 당시에는 강풍주의보와, 건조주의보가 발령된 상태였다. 접근이 용이하지 않은 야간에 확산되어 4월 5일 0시 40분 주민대피를 지시하고, 7시경 낙산도립공원과 낙산사를 보호하기 위하여 진화대책을 강구하였다. 이후, 헬기, 소방차, 진화인력의 활동으로 10시 50분 산불진화대책본부에서 진화 완료를 선언하였다. 하지만, 13시 재발화하여, 산불진화활동을 재개하였으나 강풍으로 인하여 헬기의 이륙이 불가해 낙산사 등 문화재가 전소되었고, 마을주민 2,074명에 대해 대피령을 발령하였으며 가스충전소등 위험 시설물 피해예방에 주력활동을 하였다. 17시 5분 야간 활동 및 다음날 진화계획을 수립하였다. 4월 6일 5시 56분 헬기의 투입이 가능하여 8시경 진화를 완료하고 잔불정리를 수행하였다(Yangyang county, 2007).

2.3 2019년 고성(속초) 대형산불

Fig. 3은 산불 당시의 피해 면적을 나타내며, 고성군에서 발생한 산불이 속초시내로 확산되었다. 2019년 4월 4일 19시 17분경 고성군 토성면 원암리 일성콘도 인근에서 산불이 발생하였다는 신고가 행정안전부 중앙재난안전 상황실로 접수되었다. 근처 소방서에서 3분 만에 대응하여 진화를 시작하였으나 순간 풍속이 30 m/s에 이르는 강풍으로 인하여 초기진화에 실패하였다. 21시 30분 민가 및 시내방향으로 화재가 확산됨에 따라 속초주민 1만여 명에게 긴급 재난 문자 발송 및 대피령을 전달하였다. 9시 40분경 소방청 대응수준을 전국적 재난 수준인 3단계로 최고수준으로 발령하였다. 청와대에서는 23시 10분 상황판단회의를 개최하였고, 23시 15분경 가용자원을 모두 동원하여 총력 대응하라는 대통령의 지시가 있었다. 4월 5일 0시 20분 세종시 정부청사에 중앙재난안전대책본부가 설치되어 군헬기 32대, 군 소방차 26대, 장병 1만 6천여 명 등이 투입되는 등 다른 시도에서

Fig. 1. Forest Fire Damaged Area (Gangneung)

Fig. 2. Forest Fire Damaged Area (Yangyang)

Fig. 3. Forest Fire Damaged Area (Goseong)

소방력을 지원한 사상 최대의 규모로 기록되었다. 8시 15분경 고성 산불 주불의 진화가 완료되어 산림청에서는 오전중 모든 진화 계획을 발표하였으며, 13시 산불 진화율 100%로 발표하여 대응 완료하였다(MOIS, 2019).

2.4 대형 산불사례 비교 분석

세 가지 대형 산불 모두 4월 초에 발생하여 강원도 동해안 산불의 특징인 양간지풍의 영향으로 인해(Lee and Lee, 2011), 각각의 대형 산불은 서쪽에서 동쪽으로 확산되었다. 이러한 이유는 한반도 남쪽에서 저기압, 북쪽에서 고기압이 배치되어 발생한 서풍이 태백산맥을 넘으며 고온건조와 동시에 풍속이 높아 산불 확산에 취약한 기상조건을 가지기 때문이다. 이러한 조건은 편 현상으로 설명될 수 있으며 편서풍이 태백산맥을 넘어 영동지방에 하강기류로 내려와 고온 건조해진다. 편 현상은 항상 높은 풍속을 가지지 않는다.

하지만 양간지풍은 이러한 편 현상에 더하여 높은 풍속을 동반한다. Table 1은 각각의 산불 당시 정보를 비교하였으며, 고성 산불의 경우 발화지는 고성이나, 확산은 속초시임에 따라 속초시의 정보를 기준으로 비교하였다.

산불발생당시의 평균 풍속은 강릉, 양양, 속초 각각 8.1 m/s, 9.3 m/s, 8.5 m/s로 보퍼트 풍력계급의 흔들바람에 속하는 수준이지만, 순간 최대풍속이 각각 25.0 m/s, 24.6 m/s, 30.0 m/s로 태풍급의 풍속을 기록하였다. 풍향도 비슷하게 각각 남서풍과 서풍이 주를 이루었으며, 양양산불의 경우 서남서, 서, 남서 방향으로 나타나 산불의 확산 형태가 동쪽으로 갈수록

Table 1. Comparison of Large Forest Fires

		Gangneung Forest fire in 2000	Yangyang Forest fire in 2005	Goseong Forest fire in 2019
Forest fire General	Ignition time	7 April 2000, 8:55	4 April 2005, 23:53	4 April 2019, 19:17
	Extinguishing time	22 h 30 m	32 h	16 h
	Place	Seokgyo-ri, Sacheon-myeon, Gangneung-si	Hwayley Road, Yangyang-eup, Yangyang-gun	Wonam-ri 1, Toseong-myeon, Goseong-gun
	Cause	Incineration of trash	unknown	Fire from dry fallen leaves caused by arc burnout of high voltage wires due to strong winds
	Fire spread rate	3.7 km/h	1.2 km/h	4 km/h
Weather information	Highest temperature	17.2 °C	24.9 °C	21.2 °C
	Average temperature	12.0 °C	18.1 °C	15 °C
	Lowest temperature	8.5 °C	13.2 °C	9.2 °C
	Humidity	36%	20.0%	16%
	Wind speed	8.1 m/s	9.3 m/s	8.5 m/s
	Maximum instantaneous wind speed	25.0 m/s	24.6 m/s	30.0 m/s
	Wind direction	Southwest (SW)	Westsouthwest (WSW) West (W) Southwest (SW)	West (W)
	Note	Yellow dust, Storm	Strong wind warning, Dry warning	Strong wind warning, Dry warning
Forest fire Fuel	Forest area	83,863 ha	52,510 ha	46,795 ha
	Accumulation of stumpage	8,432,178 m ³	5,473,964 m ³	3,298,912 m ³
	Accumulation of stumpage per unit area	100.5 m ³ /ha	104.1 m ³ /ha	70.4 m ³ /ha
Respond	The number of responders	20,205	21,181	10,671
	Wildfire helicopter	14	65	57
	Fire truck	92	345	872
Damage	Forest damaged area	1,390 ha	973 ha	897 ha
	Death	1	-	1
	Injury	4	-	11
	Victim	465	418	861
	Building	261	367	597
	Financial loss	26.7 billion won	39.4 billion won	219.8 billion won

남북으로 확산되는 부채꼴 형태로 나타났다. 산림 피해면적은 강릉이 1,390 ha로 가장 넓었으며, 양양 973 ha, 속초 897 ha로 비슷한 순서로 나타났다. 산불의 연료가 되는 산림 자원은 강릉이 83,863 ha로 가장 넓은 면적을 나타냈으며 강릉과 양양은 비슷한 수준으로 나타났다. 상대적으로 속초의 산림면적과 축적된 입목의 양이 각 46,795 ha, 70.4 m³/ha로 낮았다.

투입된 대응 자원의 경우 강릉산불의 경우 약 20,000명의 인력이 투입되었으나 헬기가 14대, 소방차 92대로 양양과 고성산불에 비하여 적은 장비의 수가 대응하였다. 이러한 이유는 2000년 산불 발생당시 동해안 다수의 지역에 산불이 발생하여 투입할 수 있는 장비가 한정되었기 때문이다. 고성 산불의 경우, 투입된 장비가 다수임에도 불구하고 피해가 높았던 이유는 산불이 시가지지역으로 확산되어 산림피해와 동시에 주거지의 피해가 다수 발생하였기 때문이다.

기존의 선행연구들과 백서에서 언급되는 대형 산불의 주요 원인과 마찬가지로, 강풍, 건조의 기상상황과 동시다발적인 산불발생 및 야간 산불에 의한 장비투입의 제한, 험준한 산악과 방대한 권역의 문제를 들 수 있다. 물리적으로 제약이 다양한 대형산불에 효과적인 대응을 위하여 산불 발생시, 산림, 인명, 재산 등 보호하기 위한 대응 전략이 중요하지만, 양간지풍의 특성을 이해하고 지역 특성을 고려하여 산불의 확산 예측에 따른 전략을 사전에 수립할 필요가 있다. 이를 위해선 수치모델을 이용하여 산불의 확산을 예측하고 시나리오를 만드는 등의 연구가 필요하다.

3. 고성 대형산불 수치시뮬레이션

양간지풍을 고려한 과거 동해안 대형 산불의 특성을 분석하기 위하여 FARSITE를 이용해 2019 고성 산불에 대하여 수치해석을 수행하였다. FARSITE는 2차원 화재 확산 모델로써, 연료, 기상, 지형의 인자를 고려해 산불의 확산율과 불꽃길이 등 계산가능하다. 다양한 선행 연구자들에 의해 모델이 개선되어왔으며, 호이겐스의 원리를 기초로하여 빛의 파동성에 근거한 전파모델이다. 불꽃의 확산 방향은 바람의 방향에 크게 좌우되며 확산 속도는 연료의 조건에 따라 큰 영향을 받는다. Fig 4는 풍향과 풍속, 연료에 따른 산불의 전파 형태를 나타낸다.

$$X_t = \frac{a^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2} + c \sin \theta} \quad (1)$$

$$Y_t = \frac{-a^2 \cos \theta (x_s \sin \theta + y_s \cos \theta) - b^2 \sin \theta (x_s \cos \theta - y_s \sin \theta)}{(b^2 (x_s \cos \theta + y_s \sin \theta)^2 - a^2 (x_s \sin \theta - y_s \cos \theta)^2)^{1/2} + c \cos \theta} \quad (2)$$

타원형을 이루는 불규칙한 산불의 확산은 Richards (1990)에 의해 계산되며 Eqs. (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 핵심 항목인 x_s , y_s 는 꼭지점의 방향, θ 는 확산 방향을 의미하며 a 는 타원의 단축, b 는 타원의 장축을 의미한다. c 는 장단축이 교차하는 타원의 중심부와 발화지점사이의 거리를 의미한다. Eqs. (1)과 (2)에서의 핵심 항목인 꼭지점의 방향은 Eqs. (3)과 (4)로써 계산된다. 여기서, x_i 와 y_i 는 지형의 고도를 의미하고, D_i 는 지형의 경사, w_i 는 주향을 의미한다. 산불의 방향을 결정하는 θ 는 바람-경사 벡터 방향에 따라 결정되며, 결과벡터로써, 무차원 계수를 이용해 Rothermel의 확산방정식으로부터 계산된다(Rothermel, 1972; Wilson, 1980). 확산되는 결과값은 화재 행동 모델에 적용되어 결과벡터로써 표현된다(Eq. (5)). 여기서 R 은 산불의 확산율(m min⁻¹), I_R 은 받은 강도(kJ min⁻¹ m⁻²), ζ 는 전파 플럭스, ρ_b 는 건조 부피 밀도(kg m⁻³), ϵ 는 발열량(무차원), Q_{ig} 는 점화열(kJ kg⁻¹)을 의미한다.

$$x_s = (x_{i-1} - x_{i+1}) \pm D_i \sin w_i \quad (3)$$

$$y_s = (y_{i-1} - y_{i+1}) \pm D_i \sin w_i \quad (4)$$

$$R = \frac{I_R \zeta (1 + \Phi_W + \Phi_S)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad (5)$$

위의 수식을 이용하여 고성군 토성면 원암리 산불이 발생한 지역을 중심으로 주변 60 km²를 대상으로 수치해석 범위를 설정하였고, 실제 산불이 발생한 시점인 4월 4일 19시부터 산불이 종료된 시점인 4월 5일 13시까지 시간동안 계산하였다.

Fig. 5는 연구지역의 지형정보를 나타낸다. 1:25,000의 수치지형도의 자료를 기초로 하였으며, 연구지역의 최대 높이는 880 m, 최소높이는 0 m, 평균 높이는 150 m로 나타났다. 최대경사는 87°, 최소경사는 0°, 평균경사는 13°로 나타

Fig. 4. Uniform and Nonuniform Conditions of Wavelet

Fig. 5. Geographic Information of Study Area

Fig. 6. Weather Information of Study Area

났다. 속초시는 바다와 바로 인접한 도시이므로 동쪽으로 해안과 접할수록 해발고도가 매우 낮으며 평균경사도 낮은 것으로 나타났다. 하지만 발화지점의 서쪽으로 태백산맥이 형성되어 매우 급한 경사를 보인다. 주향의 평균 경사는 114°로 나타났고 방위는 주로 북동쪽으로 나타났다.

Fig. 6은 산불 발생 당시의 온도(T), 풍속(S), 풍향(W), 습도(H), 강우(R) 정보를 나타낸다. 당시의 기상정보는 강원도 속초시 설악동의 기상청 AWS 자료를 이용하였다. 모델의 입력변수는 4월 4일부터 4월 6일까지의 값을 적용하였다. 4일의 평균기온은 15.3 °C, 평균습도 18%, 5일의 평균기온 12.7 °C, 평균습도 37%, 6일의 평균기온 11.4 °C, 평균습도 41%로 나타났다. 풍향과 풍속은 시간에 따라 변하므로, 매 시간별 관측된 자료의 값을 입력하였으며, 평균 풍속은 8.5 m/s, 최대 순간 풍속은 30 m/s, 풍향은 남서풍으로 나타났다.

Fig. 7은 산불이 발생한 직후를 나타내며 연료의 상태 정보를 모델의 변수에 입력하기 위하여 현장 조사하였다. 연구지역의 모든 연료상태를 조사하기 어려워 연료상태와 관련한 선행연구들(Park et al., 2016; Palaiologos et al., 2020)을 참조하고, 실제 현장에서의 정보를 수집하여 입력변수를 도출하였다. 입력변수는 Table 2와 같이 설정하였다.

Fig. 7. Study Area After Forest Fire

Table 2. Average Vegetation and Fuel Conditions

Factor	Input value
Trees per ha	70 m ³ /ha
Basal area	37 m ² /ha
Mean tree height	15 m
Canopy cover	51%
Mean CBH	7 m
Mean DBH	30 cm
Litter depth	5 cm

19:00 on 4 April (Fire ignition)

20:00 on 4 April (After 1 hr)

22:00 on 4 April (After 3 hr)

01:00 on 5 April (After 6 hr)

04:00 on 5 April (After 9 hr)

07:00 on 5 April (After 12 hr)

10:00 on 5 April (After 15 hr)

13:00 on 5 April (End of forest fire)

Fig. 8. Results of Numerical Simulation for Forest Fire

Fig. 9. Property of Forest Fire

4. 결과 및 토론

Fig. 8은 산불 확산 수치모델 결과와 실제 산불이 확산된 범위를 함께 나타낸다. 4월 4일 19시 발화 시점을 기준으로 3시간 단위마다 확산된 산불의 범위를 나타냈으며 4월 5일 13시 산불이 종료된 시점에서의 수치모델 결과와 실제 산불 확산 범위를 비교하였다. 산불은 양간지풍의 영향을 받아 실제 산불 확산의 방향이자 바람의 방향인 서쪽에서 동쪽으로 확산 되었다. 산불 발생 이후 시간별 확산면적은 4월 4일 20시 2.8 km², 22시 16.7 km², 4월 5일 1시 41.9 km², 4시 92.7 km², 7시 127.9 km², 10시 157.9 km² 13시 176.7 km²로 확산되었다. 실제 산불로 인한 피해 범위는 199.1 km²로 모델의 결과가 약 20 km² 작게 계산되었다. 실제 산불의 확산 범위는 확산 방지를 위해 대응을 한 면적이고, 주거지역 등을 포함하고 있다. 이에 반해 수치 모델에서는 산림지역과 주거지역을 구분하지 않았고, 연료상태를 연구 지역 내에 동일하게 설정하였기 때문에 실제 현장을 정확하게 반영하지 못한 것으로 판단하였다. 하지만, 기상정보와 지형정보는 실측 정보를 사용하였기 때문에 산불의 방향 및 확장성 측면에서 신뢰할만한 결과라고 판단되었으며, 1:25,000 수치지형도보다 고해상도인 1:5,000지도의 수치지형도를 사용하고, 국소지역별 연료 상태를 보다 구체적으로 적용하면 실제 산불의 확산 결과와 비슷할 것으로 예상된다.

Fig. 9는 산불 강도와 불꽃의 길이 및 확산율을 나타낸다. 각각 산불 발생 초기에 높은 것을 보여준다. 산불 강도는 산불 연소 전방의 단위 길이당 에너지 방출률로 표현되며 그 범위는 3,943.7~47,249.3 kW/m로 나타났으며 산불 발생 후 3시간동안 가장 높은 것으로 나타났다. 초기 3시간 동안 경사가 높고 풍속이 주거지역의 낮은 고도 보다 상대적으로 높았기 때문에 산불 강도가 높은 것으로 해석되었다. 화염의 길이는 평균적으로 5 m인 것으로 나타났으며 범위는 3~26 m로 나타났다. 산불 강도와 마찬가지로 초기 3시간 동안 가장 높은 것으로 나타났다. 산불의 확산율은 단위시간당 확산길이를 의미하며 최대 42.25 m/min으로 초기에 가장 높은

것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 2000년 동해안 산불의 강릉산불과, 2005년 양양산불, 2019년 고성속초 산불의 사례를 비교 하여 동해안 대형 산불의 특징인 양간지풍의 특징과, 기상 연료 지형정보의 특징에 따른 산불의 특성을 분석하였다. 공통적으로 대형 산불의 원인으로 광범위한 지역에 동시다발적인 산불의 발생, 강한 바람과 낮은 습도, 울창한 침엽수림과 험준한 산악지형을 꼽을 수 있었다. 이렇게 물리적으로 제약이 다양한 대형 산불에 효과적으로 대응하기 위하여 사전에 예측을 하고 대응전략을 수립할 필요가 있다. 2019년 고성(속초)산불에 대하여 수치 모델을 이용해 산불의 확산을 예측을 하였으나, 실제 상황보다 약 20 km² 적게 추정되었다. 수치모델 자체에서 수목이 타고남은 숯불의 영향이나 비산화하는 과정에서의 산불 확산 영향에 관한 해석 모델이 포함되지 않아 실제의 산불보다 작게 추정되는 결과의 한계성을 가지기 때문에 이러한 차이가 발생한 것으로 보인다. 하지만, 이러한 한계성을 가짐에도 불구하고 본 연구에서는 연료에 관한 정보는 일괄적으로 입력하였기 때문에 산림 지형정보와 연료모델의 정확성을 높이면 오차의 크기를 줄일 수 있을 것으로 판단하였다. 또한, 예측된 산불의 강도, 화염의 길이, 확산율은 산불 발생 초기에 가장 높았으며 초기 대응이 어려웠음을 시사하였다. 향후, 산불 발생 및 확산에 대한 정보를 수치 시뮬레이션을 통하여 미리 구축하고 피해 범위 등을 예상하여 지역 주민의 대피정보 제공 및 자원의 효율적 배치에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2019-MOIS31-011-01040100-2021).

References

- Anderson, D.H., Catchpole, E.A., De Mestre, N.J., and Parkes, T. (1982). Modelling the spread of grass fires. *Journal of Australian Mathematical Society*, Vol. 23, pp. 451-466.
- Catchpole, E.A., Hatton, T.J., and Catchpole, W.R. (1989). Fire spread through nonhomogeneous fuel modelled as a Markov process. *Ecological Modelling*, Vol. 48, pp. 101-112.
- Chung, M.K., and Kim, Y.I. (2020). Analysis on topographic normalization methods for 2019 gangneung-east sea wildfire area using planetscope imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 2(1), pp. 179-197.
- Clarke, K.C., Brass, J.A., and Riggan, P.J. (1994). A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 60, No. 11, pp. 1355-1367.
- Gangwon province. (2001). *The white paper on 2000 gangwon east coast forest fire*.
- Kim, N.G., Kwak, J.H., and Kim, M.I. (2019). Importance of reinforcing decision trees for forest-fire disaster using case analysis. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 7, pp. 213-220.
- Kim, S.S., Lee, M.W., and Lee, J.H. (2015). Characteristics of forest fires at yeongdong in gangwondo since 1990s. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 4, pp. 71-77.
- Koo, G.S., Lee, M.J., and Shin, M.Y. (2010). Estimation of forest productivity for post-wild-fire restoration in east coastal areas. *Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 1, pp. 36-44.
- Korea Forest Service (KFS). (2020). *Statistical yearbook of fire 2019*.
- Lee, B.D., and Lee, M.B. (2009). Spatial patterns of forest fires between 1991 and 2007. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 15-20.
- Lee, B.D., Lee, Y.H., Lee, M.B., and Albers, H.J. (2011). Stochastic simulation model of fire occurrence in the republic of korea. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 100, No. 1, pp. 70-78.
- Lee, H.S., and Lee, S.Y. (2011). The analysis of distribution and characteristics of forest fires damage over 30 ha in kora. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 39-46.
- Lee, J.K., Kim, J.S., and Lee, Y.G. (2007). A ripple effect of regional economy by government aid for forest fire restoration through the input-output analysis. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 96, No. 3, pp. 338-347.
- Lee, M.S., Won, C.S., and Hur, N.K. (2008). Numerical simulation of a forest fire spread. *Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 137-143.
- Lee, S.Y., Han, S.Y., An, S.H., Oh, J.S., Jo, M.H., and Kim, M.S. (2001). Regional analysis of forest fire occurrence factors in kangwon province. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 3, No. 3, pp. 135-142.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2019). *The white paper on 2019 gangwon east coast forest fire*.
- Niessen, W.V., and Blumen, A. (1988). Dynamic simulation of forest fires. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 18, pp. 805-812.
- Palaiologos, P., Kostas, K., Alan, A.A., and Michelle, A.D. (2020). Development of comprehensive fuel management strategies for reducing wildfire risk in greece. *Forests*, Vol. 11, No. 8, pp. 789. <https://doi.org/10.3390/f11080789>
- Park, H.S., Lee, S.Y., Chae, H.M., and Lee, W.K. (2009). A study on the development of forest fire occurrence probability model using canadian forest fire weather index-Occurrence of forest fire in kangwon province. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 3, pp. 95-100.
- Park, J.H., Jung, S.Y., Lee, K.S., Park, Y.B., and Yoo, B.O. (2016). Classification of regional types for pinus densiflora stands using height-dbh growth in korea. *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 105, No. 3, pp. 336-341.
- Park, K.J., Kim, H.R., Lee, B.W., and Park, S.Y. (2020). A study to prevent the forest fire in forest facilities and forests. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, Vol. 23, No. 2, pp. 301-306.
- Richards, G.D. (1990). An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 1163-1179.
- Rothermel, R.C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service Research Paper INT-115.
- Song, H.S., Jeon, W.J., and Lee, S.H. (2013). A simulation model for the study on the forest fire pattern. *Journal*

- of the Korea Society of Simulation*, Vol. 22, No. 2, pp. 101-107.
- Wilson, R. (1980). *Reformulation of forest fire spread equations in SI units*. USDA Forest Service Research Paper INT-292.
- Won, M.S., Lee, M.B., Lee, W.K., and Yoon, S.H. (2012). Prediction of forest fire danger rating over the korean peninsula with the digital forecast data and daily weather index model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10.
- Yangyang county. (2007). *The white paper on 2007 yangyang forest fire*.
-
Received	■	May 4, 2021
Revised	■	May 6, 2021
Accepted	■	June 11, 2021