강원도 지역의 산불발생이 홍수량 및 토석류 발생에 미치는 영향 평가

Assessment of the Effects of Forest Fires on Flood and Debris Flow in Gangwon-province

오청현* · 남동호** · 김병식***

Oh, Cheong Hyeon*, Nam, Dong Ho**, and Kim, Byung Sik***

Abstract

Recent climate change has led to a significant increase in forest fires due to seasonal changes in rainfall, such as increased temperatures and changes in the drying cycle, as well as flooding damage from localized torrential rains and typhoons. Forest fires can cause primary damage, such as loss of forest resources, as well as secondary natural disasters, such as floods and debris flow disaster. Thus, in this study, the impact of forest fires on flood and debris flow disasters was to be assessed on the areas affected by forest fires in Gangneung and Goseong, which occurred in April 2019 when the stability of vegetation and soil was destroyed. The S-RAT model, a distributed rainfall discharge model, and RAMMS, a soil discharge model were used in conjunction with each other, and according land cover change that the flood discharge and debris flow change before and after forest fire damage were analyzed. According to the analysis, the amount of flood discharge increased significantly due to forest destruction caused by forest fires, and the depth and scale of debris flows increased as flood discharge increased.

Key words : Forest Fires, Land Cover Change, Flood Discharge, Debris Flow, S-RAT, RAMMS

요 지

최근 기후변화로 인해 국지성 집중호우 및 태풍으로 인한 홍수피해 뿐만 아니라 기온 증가 및 건조지속기간의 변화 등과 같은 강우의 계절적 변화로 인해 산불 발생이 크게 증가하고 있다. 산불은 산림자원의 손실과 같은 1차적인 피해뿐만 아니라 홍수 및 토사재해와 같은 2차 자연재해를 유발할 수 있다. 이에, 본 논문에서는 산불로 인해 식생 및 토양의 안정성이 파괴된 2019년 4월 발생했던 강릉·고성 산불 피해지역을 대상으로 산불발생이 홍수 및 토사재해에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 본 논문에서는 분포형 강우유출 모형인 S-RAT모형과 토사유출 모형인 RAMMS를 연계 이용하였으며 산불 피해 전·후의 토지피복변화에 따른 홍수량변화와 토석류 변화를 모의하였다. 분석 결과, 산불로 인한 산림파괴로 인해 홍수량이 크게 증가하는 것으로 나타났고, 홍수량의 증가는 토석류의 유동심과 피해범위를 증가시키는 것으로 모의되었다.

핵심용어 : 산불, 토지피복변화, 홍수량, 토석류, S-RAT, RAMMS

1. 서 론

전 세계적으로 극심한 기후변화로 인한 국지성 집중호우의 홍수피해가 급증하고 있으며, 그 피해규모 또한 대형화

되고 있는 추세이다. 기온 증가 및 건조지속기간의 증가, 강수패턴변화로 산불의 발생을 증가 및 강도 또한 크게 증가하고 있다. 산불은 일차적으로 식생의 생물량 감소 등의 구조적 변화를 야기하고 산림자원의 손실을 가져올 뿐만

*정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 석사과정(E-mail: och@kangwon.ac.kr)

Member, Master Student, Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

**강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 박사과정(E-mail: skaehdghkk@kangwon.ac.kr)

Ph.D, Student, Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

***교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 부교수(Tel: +82-33-570-6819, Fax: +82-33-570-6458, E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

아니라 산사태, 홍수, 토사유출과 같은 산불 후 2차 재해를 유발하기도 한다. 또한 산불은 식생과 토양의 안정성을 파괴하고, 그 결과 완전히 노출된 불안정한 토양표면에서는 강우로 인한 유출 피해가 발생한다. 우리나라 산불의 76%는 봄(2~4월)에 발생하고, 여름철 집중 호우가 잦은 동해안은 산불 피해로 인한 2차 재해의 우려가 크다. 그리고 산악지형의 비율이 높고 밀집되어 있기 때문에 대형 산불로 확대될 가능성이 높다. 토사유출이나 강우유출과 같은 2차 재해가능성의 예측과 같이 생태계를 관리하는 분야에서는 식생요인을 주요 매개변수로 활용한다(Marques and Mora, 1998). 강우에너지를 흡수하고 토양경화를 막으며, 표토의 거칠기를 증가시켜 지표유출수의 속도를 감소시키는 잎과 낙엽들은 산불로 인해 손실된다. 대형 산불과 같은 식생대의 파괴는 우수의 차단을 격감시켜 지표로의 우수유출을 증가시키지만 토양으로의 우수 침투능은 감소시킨다. 따라서 지표면의 유출수가 증대되어 하천 하류부에는 일시적으로 홍수유량이 증대되는 효과를 초래한다. 이와 같이 식생피복도의 회복이 산불 후 지표유출수와 토사유출을 감소시킨다는 것은 여러 지역과 다양한 생태적 조건 하에서 많은 연구자들에 의해 증명되었다(Kim, 2009).

최근 연구 동향에서 Kim et al. (2005)은 안성천의 평택수위 관측소 상류유역을 대상으로 점진적인 도시화로 인한 토지피복변화가 수문변화에 미치는 영향을 분석하였고, 하천유출량 변화는 4.8%의 산림면적과 4.0%의 논면적이 감소한 상태에서, 160.5 mm의 강우조건에서 침투유출량이 30.3%, 총 유출량은 9.3% 증가한 것으로 나타났다. Park et al. (2013)은 금강유역 내 용담댐 및 대청댐을 대상으로 SWAT모형을 이용하여 미래유출량 전망에 지배적인 인자로 작용하는 토지피복변화에 따른 유출량 변화를 분석하였다. 분석결과 토지피복의 변화를 고려한 유출량이 토지피복의 변화를 고려하지 않았을 때보다 전체적으로 1.83-2.87%로 소폭 증가하는 것으로 나타났다. Choi (2017)은 유출분석은 유역의 지형학적 특성, 토지의 피복상태 및 식생, 강우 등에 의한 영향을 고려한다고 추정하여, 산림 하천 소유역에서 발생하는 집중호우에 따른 유출분석을 위해 유역특성, 토지이용현황 그리고 토양을 분석하였다. Chung (2015)은 미국 산불지역의 토석류 발생량 자료를 이용하여 토석류 발생량 관계식을 도출하고 발생확률을 감안하여 토석류 재해도 작성기법을 제시하였고, Lee et al. (2004)은 동해안 산불피해지역 중 사면지역에 대한 산불 후 경과 년 수에 따른 일반적인 식생발달 모형을 개발하였다. 또한 산불피해지역을 관리하기 위한 기법 개발에 사용될 매개변수로서 식생지수들의 발달모형을 제시하였다. Shin et al. (2008)은 양양 산불 피해지역 당해연도의 극심한 지표변화에 따른 지표유출 및 토양침식을 분석하기 위해 산불 산지사면에 소규모 조사구를 설치하여, 지형, 토양, 식생, 강우사상별 유출 및 토양침식량을 측정하였다. 그 결과 식생회복이 빠른 조사구들은 대조구보다 약 2배, 나지상태 조사구

들은 대조구의 약 10배 이내의 유출 및 토양침식이 발생하여 상관분석에 의해 유출 및 토양침식 민감도는 식생지수들과 높은 상관성을 보였다. Kang et al. (2003)은 2000년 4월 동해안 산불이 2002년 8월 강습한 태풍 루사에 따른 유출변화의 정량적인 평가와 피해에 미치는 영향을 유역의 유출 모의 실험을 통하여 정량적으로 검증하였다. Kang et al. (2010)은 산불발생 전·후 위성영상을 이용한 분류 기법을 통해 연구대상 지역의 산불피해 정보를 산출하였고, Yang et al. (2003)은 USLE모형을 수정하여 유역에 적용할 수 있도록 하였으며, 산불 전과 후의 토양유실량을 계산하여 토지피복변화가 토양유실량에 미치는 영향을 분석하여, 지표면에 토양유실을 방지하기 위해 식생분포가 중요한 요인이 될 수 있다고 판단하였다. Choo et al. (2013)은 GIS를 활용한 RUSLE를 적용하여 대상지역의 토사유출량과 토양침식량을 산정하였고, 강우빈도별 토양침식량을 산정하여 토사재해 잠재지역을 시각적으로 제시하였다.

국외 연구동향은 Robert et al. (2004)은 워싱턴 주 시애틀 근처의 하류 세다르 강 배수의 도시 및 시골지역에 대해 산림 패턴과 침투성 토지 커버의 변화가 분수령 수문체계에 미치는 영향을 평가했다. Costa et al. (2003)은 토지피복의 변화 이후 침투를 줄이면 장마철 표면의 흐름이 증가한다고 평가하였고, Wang et al. (2017)은 유출량 변화에 대한 토지이용변화의 기여도를 다중 회귀 분석을 사용하여 정량화 하였다. Desta et al. (2019)은 1995년부터 2015년까지 에티오피아 북부의 아이날렘 유역에서 토지이용·토지피복의 변화가 유출량에 미치는 영향을 분석했다.

이처럼 산불 이후 토지피복과 유출량 변화에 대한 연구와 강우에 따른 토사유출량 변화에 관련된 연구는 많이 행해지고 있지만 산불로 인한 토지피복 변화가 토석류 피해에 미치는 영향을 분석한 연구가 많지 않으며, 산불 직후의 토지피복변화를 이용한 홍수량과 토석류 발생에 관한 연구 또한 많이 진행되지 않고 있다.

본 논문에서는 산불로 인해 식생 및 토양의 안정성이 파괴된 2019년 4월 4일 발생했던 강릉·고성 산불 피해지역을 대상으로 실제 태풍 강우사상을 이용하여 산불 피해 전·후의 토지피복변화에 따른 홍수량을 산정하였다. 홍수량 변화가 큰 유역에서 토석류 피해 예상 지역을 선정하였고, 토석류 유출해석모형을 이용하여 소유역에서의 토석류 발생 시 피해 규모를 산정하였다. 홍수유출량 산정에는 분포형 모형인 S-RAT모형을 이용하였으며, 토석류 모의는 토석류 2차원 수치모형인 RAMMS모형을 이용하여 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구방법 및 절차

산불 전·후의 토지피복에 따른 홍수유출량을 비교하기

위해 실제로 2019년 4월에 산불 피해를 받은 강릉, 고성지역을 대상으로 분석하였다. 수치표고모델(DEM), 토지피복도(Land Cover), 토양도(Soil)의 입력자료를 S-RAT모형을 이용하여 강릉·고성 산불 피해지역을 모의하였으며, 산불 전·후의 홍수유출량 비교는 NDVI 영상분류 결과 산불 전·후의 식생활력도, 산림과 나지의 면적 변화를 확인한 연구(Kang et al., 2010)와 산불로 인하여 토지피복 상태가 식생지역에서 나지로 변화하여 강우로 발생하는 토립자의 유실을 막는 기능이 없어져 토양유실량의 급격한 증가를 확인 한 연구(Yang et al., 2003)에 따라 산불 전 토지피복이 산림·초지였던 지역을 산불 후 나지로 변화시켜 모의한 결과값을 비교하였다. 홍수유출량 변화가 큰 유역에서 토석류가 발생하였을 때 인명·재산 피해의 가능성이 있으며, 산림청(Korea Forest Service)의 산사태 위험지도에서 위험등급이 높은 지역을 위험지역으로 선정하여 RAMMS모형으로 토석류 발생 시 피해 규모 및 범위를 산정하였다. 본 연구의 방법 및 절차는 Fig. 1과 같이 나타내었다.

Fig. 1. Flow Chart

2.2 분포형 강우 - 유출 모형 S-RAT

Spatial Runoff Assessment Tool (S-RAT)모형은 Kim et al. (2010)이 개발한 분포형 강우-유출모형으로 GIS자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 각각의 격자마다 시간 간격별 개념적 물수지를 계산함으로써 유역의 시·공간적 유출량 변화를 모의하도록 설계되었다. 또한 대부분의 분포형 수문모형들은 모형에 입력될 지형학적 매개변수들을 추출하기 위해 GIS 관련 상용패키지에 의존하나 S-RAT모형은 자체적으로 매개변수를 추출하여 입력자료가 간소화되어 있다.

$$\frac{dF[t,(i,j)]}{dt} = -\frac{F[t,(i,j)]}{H_s} - E[t,(i,j)] + P[t,(i,j)] \left\{ 1 - \frac{F[t,(i,j)]}{HS(i,j)} \right\} \quad (1)$$

여기서 F는 침투저류조의 침투능, t는 시간, P는 지표유출량, E는 증발산량, H는 매개변수로 상수이다. Fig. 2는 S-RAT 모형의 물수지 계산 개념도를 나타낸 것이다.

Fig. 2. Diagram of Grid Water Balance (Kim et al., 2010)

2.3 토석류 2차원 수치모형 RAMMS

Rapid Mass Move Simulations (RAMMS)모형은 토석류의 정적인 결과를 확인할 수 있는 기존의 모형들과는 다르게 시간적 흐름에 대한 동적인 분석결과를 확인할 수 있는 동적모형(Dynamic modeling)로 토석류(Debris flow), 낙석(rockfall), 눈사태(Avalanches)의 세 가지 모듈을 수치표고모형(DEM)에서 분석이 가능하도록 구성되어 있다. 모형의 기본 방정식은 Vollemy-salm의 접근 방법에 기초하고 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$S = \mu N + (1 - \mu) C - (1 - \mu) C \exp\left(-\frac{N}{C}\right) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (2)$$

여기서 S는 마찰력(N), C는 유동물질에 대한 응집력, μ 는 dry-coulomb type friction coefficient, g는 중력가속도(m/s^2), ρ 는 밀도(kg/m^3), U는 유속(m/s), N은 활동면에 대한 수직응력(Mpa)을 의미한다. C는 응집력을 가지고 있는 흐름 물질로, $N=0$, $U=0$ 의 조건일 때 마찰력 S는 0이 된다. C의 값이 증가하면 마찰력은 증가하게 되고, 이에 전단응력이 증가하게 되어 토석류나 눈사태의 흐름이 약해지는 현상이 발생한다(Nam et al., 2019).

3. 분석 및 결과

3.1 대상지역 선정 및 입력자료 구축

본 논문에서는 실제 2019년 4월 발생했던 강릉·고성 산불피해지역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 3 참조). 강릉의 산불 피해면적은 24.28 km^2 이고, 고성의 산불 피해면적은 32.01 km^2 이다. 강릉은 주수천 유역, 고성은 용춘천 유역을 선정하여 분석하였다. 강릉 주수천 유역면적은 33.71 km^2 , 주수천 유역 내 산불피해 면적은 9.87 km^2 로 유역 내 피해면적은 약 29%이며, 고성 용춘천 유역면적은 15.48 km^2 으로 유역 전체가 피해를 받았다. Fig. 4에서 (a)는 주수천유역, (b)는 용춘천 유역이며 빨간색으로 표현된 부분은 산불 피해지역을 나타낸다.

3.1.1 강우자료 수집 및 분석

본 논문에서는 토석류를 유발하는 강우가 산불 피해지역에 내릴 때 산불발생이 홍수량변화와 토사재해에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 강릉과 고성지역의 강우자료는 2002년 발생했던 태풍 루사 강우사상과 지속시간 24시간에 대한 빈도별 확률강우량(30년, 100년)을 이용하여 산불 발생 전후의 홍수량을 비교 분석하였다. 강릉에 발생했던 루사 강우사상은 확률강우량 500년 빈도 이상, 고성지역은 확률강우량 200년 빈도로 나타났다. 여러 강우사상에서 산불발생과 홍수량의 영향을 알아보기 위하여 속초시의 실제 루사 강우사상과 지속시간 24시간에 대한 확률강우량(30년, 100년)을 이용하여 분석하였다. 태풍 루사의 강우자료는 기상청(KMA)에서 제공 받았으며, 30년, 100년의 확률강우량과 태풍 루사의 우량주상도는 Fig. 5와 같다.

Fig. 3. Pilot Watershed Used in This Paper

Fig. 4. Forest Fire Damaged Area

Fig. 5. Hyetograph

3.1.2 지형자료 구축

S-RAT모형을 이용하기 위해서는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도(Land Cover), 토양도(Soil)의 3가지 기본자료와 강우자료가 필요하다. 본 논문에서는 DEM은 국토지리정보원(NGII), 토지피복도는 환경공간정보서비스(EGIS), 토양도는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS), 강우자료는 기상청(KMA)에서 제공하는 자료를 사용하였다.

본 논문에서는 산불발생의 영향을 반영하기 위해 산불 후의 피해지역내에 토지피복변화가 산림·초지지역에서 나지로 변화하는 것으로 가정하였으며 DEM의 변화는 없는 것으로 가정하였다. Figs. 6과 7은 S-RAT모형의 입력자료인 Flow Direction과 Roughness, Curve Number를 추출한 것으로 강릉주수천 유역은 하류지역만 산불 피해를 받았기 때문에 고성용춘천 유역과 비교하였을 때 토지피복도, Roughness, Curve Number의 변화량이 적은 것을 볼 수 있다.

3.1.3 도달시간 산정

자연하천유역의 도달시간 산정에는 다음과 같이 외국에서 개발된 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(I), Kraven 공식(II) 등의 경험공식들을 주로 사용하고 있다.

- Kirpich 공식: 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식

$$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3)$$

- Rziha 공식: 자연하천의 상류부($S \geq 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (4)$$

- Kraven 공식(I): 자연하천의 하류부($S < 1/200$)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}} \quad (5)$$

- Kraven 공식(II): 자연하천의 경사별 유속을 적용하는 공식

$$T_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad (6)$$

($S < 1/200$: $V = 2.1\text{m/s}$, $1/200 \leq S \leq 1/100$: $V = 3.0\text{m/s}$, $S > 1/100$: $V = 3.5\text{m/s}$)

Fig. 6. GIS Input Data for the S-RAT Model (Gangneung)

Fig. 7. GIS Input Data for the S-RAT Model (Goseong)

여기서 T_c 는 도달시간(min), L 은 유로연장(km), S 는 평균 경사(무차원), V 는 평균유속(m/s)이다. RAMMS모형의 입력자료인 도달시간은 소유역이 $S \geq 1/200$ 이므로 Rziha공식을 이용하여 계산하였고(Eq. (4)), 강우로 인한 홍수량은 S-RAT모형의 모의결과를 이용하였다.

3.2 S-RAT모형을 이용한 산불발생이 홍수량에 미치는 영향 모의

강우자료 중 강우량이 가장 큰 루사 강우량을 이용해 S-RAT모형에 적용하여 강릉 주수천유역과 고성 용춘천 유역의 홍수량을 산정하였다. 각 유역의 변화를 살펴보면 강릉 주수천 유역은 산불 전의 토지피복이 산림 82%, 초지 4%, 나지 5%에서 산불 후에는 산림 60%, 초지 3%, 나지 28%로, 유역의 23%에 해당되는 산림과 초지가 나지로 변화한 것을 알 수 있고, 고성 용춘천 유역은 산불 전의 토지피복이 산림 51%, 초지 12%, 나지 7%에서 산림·초지 0%, 나지 70%로, 유역의 63%에 해당되는 산림과 초지가 나지로 변화한 것을 볼 수 있다(Fig. 8).

강릉 주수천 유역의 홍수량 변화가 고성 용춘천 유역보다 작은 것은 강릉의 경우 유역의 하류부에 산불피해를 받은 반면, 고성의 경우 상류부에서 하류부까지 전체지역에 산불피해를 받았고(Fig. 9), 산불피해로 인해 토지피복이 바뀌는 지역이 차지하는 면적의 차이 때문이라고 판단된다. 유출총량은 강릉은 2.7%, 고성은 11.9% 증가하였고, 첨두홍수량 변화는 강릉 1.5%, 고성 8.0%로 고성 용춘천 유역의 홍수량 변화가 더 큰 것을 볼 수 있다(Fig. 10, Table 1).

3.3 RAMMS모형을 이용한 산불발생이 토석류 발생에 미치는 영향 모의

홍수량 모의 결과 강릉 주수천은 2.7%의 매우 작은 총 홍수량 변화를 보여 11.9%인 고성 용춘천보다 홍수량 증가로 인한 토석류 위험의 변화정도가 적을 것으로 예상되고, 고성 용춘천 유역의 홍수량이 증가함에 따라 토석류 피해의 규모 및 범위가 증가할 것으로 판단되어 산사태 위험지도와 위성지도를 이용하여 산사태 위험등급이 높고, 토석류 발생 시 인명·재산 피해의 위험이 있는 소유역 A를 선정하여 홍수량 분석을 하였다(Fig. 11). 토석류 모의모형에 필요한 홍수량은 200년 빈도 강우량인 고성의 루사 강우사상과 확률강우량도의 30년, 100년 빈도의 강우량을 이용하였다.

도달시간 산정에 필요한 유로연장 L , 하천평균경사 S 와 유역면적 A 는 Table 2와 같으며, 소유역 A의 산불 전·후 홍수량과 최대 홍수량은 Table 3, Fig. 12와 같다. 유역면적은 0.17 km², 유로연장은 614 m, 경사도는 0.097이며, 산정된 도달시간은 123.8초 이다. 소유역 A의 홍수량은 30년 빈도 강우량에서 7.9%, 100년 빈도 강우량에서 7.6%, 루사 강우량에서 8.8% 증가하였고, 최대 홍수량은 각 각 11.1%, 7.9%, 0.5% 증가한 것을 알 수 있다.

산정된 소유역 A의 최대 홍수량과 도달시간을 이용하여 RAMMS모형에 적용하였다. 적용결과 산불 후의 유동심이 높아지고, 피해범위가 증가하여 산불 전에는 피해가 없던 주거지역까지 피해면적이 넓어진 것을 볼 수 있다(Fig. 13, Table 4). 최대 유동심은 30년 빈도 확률강우량에서 32.9%, 100년 빈도 확률강우량에서 27.2%, 루사 강우량에서 17.6%

Fig. 8. Rate of Land Cover Change (%)

(a) Gangneung

(b) Goseong

Fig. 9. Forest Fires-Damaged Area Altitude

Fig. 10. Comparison of Flood Discharge Before and After Forest Fire

Table 1. Comparison of Flood Discharge Before and After Forest Fire (Gangneung, Goseong)

	Total Flood Discharge (m ³)		Increase Rate (%)	Peak Flood Discharge (cms)		Increase Rate (%)
	Before Fire	After Fire		Before Fire	After Fire	
Gangneung	7413.37	7618.56	2.7	848.58	861.34	1.5
Goseong	1365.24	1549.19	11.9	183.56	199.42	8.0

Fig. 11. Selection of Sub-Basin Expected Debris Flow Damaged Area**Table 2.** Basin Area and Travel Time (Sub-basin A)

Basin	Basin Area (km ²)	Basin Length (m)	Average Slope of Stream	Travel Time (sec)
A	0.17	614	0.097	123.8

Table 3. Comparison of Flood Discharge Before and After Forest Fire (Sub-basin A)

Basin	Return Period	Total Flood Discharge (m ³)		Increase Rate (%)	Peak Flood Discharge (cms)		Increase Rate (%)
		Before Fire	After Fire		Before Fire	After Fire	
A	30 year	52.42	56.93	7.9	4.87	5.48	11.1
	100 year	63.03	68.22	7.6	5.98	6.49	7.9
	Rusa	69.67	76.40	8.8	10.99	11.05	0.5

Fig. 12. Runoff-Rainfall Graph of Sub-Basin A

Fig. 13. Simulated Results From RAMMS Model

Table 4. Calculated Depth and Damage Area (Sub-basin A)

		Maximum Depth (cm)	Increase Rate (%)	Damage Area Scale (m ²)	Increase Rate (%)
30 year	Before Fire	51	32.9	9,375	22.0
	After Fire	76		12,025	
100 year	Before Fire	59	27.2	10,000	31.8
	After Fire	81		14,675	
Rusa	Before Fire	84	17.6	15,100	11.3
	After Fire	102		17,025	

가 증가하였고, 피해면적은 각 각 22.0%, 31.8%, 11.3%가 증가한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 2019년 4월 발생했던 강릉·고성 산불 피해지역을 대상으로 S-RAT모형과 RAMMS모형을 이용하여 홍수량과 토석류의 유동심, 피해면적을 산정하였다. 산불 후의 토지피복은 산림·초지가 나지로 변화하는 것으로 재분류(Reclassify)하여 분석하였다. 산불 후의 영향을 토지 피복-CN Number-침투율 변화로 S-RAT모형에서 마찰력과 투수계수의 변화로 반영하였고, 홍수량 변화가 큰 산불 피해 지역에서 토석류 위험지역을 선정하여 루사 강우사상 및 빈도별 확률강우량(30년, 100년)을 이용하여 산불 전·후의 토석류 발생시 피해규모를 비교 분석하였다.

- (1) S-RAT모형을 통한 홍수량 분석 결과 강릉의 주수천은 하류부에서 29%의 피해를 받았고, 이에 홍수량은 2.7% 증가하였으며, 고성의 용춘천은 상류부-하류부 전체지역에 피해를 받아 11.8%의 홍수량 증가를 보였다. 산불피해지역이 유역에서 차지하는 비율이 높고 경사가 급한 상류에서 발생할수록 홍수량 증가율이 커지는 것으로 판단된다.
- (2) 홍수량 변화가 큰 고성의 용춘천 유역에서 산림청의 산사태위험지도와 위성지도를 이용하여 홍수량 증가로 토석류 피해가 예상되는 지역을 선정하여 RAMMS모형을 통해 토석류 피해규모를 모의한 결과, 산불 후의 토석류 유동심 증가율은 평균 26% 증가한 것으로 나타났다으며, 피해면적 증가율은 평균 21.7%로 나타났다.

산불로 인해 산림·초지가 나지로 변화하여 식생 소실로 강우가 직접 토양에 도달되고 토양공극을 빠르게 포화시켜 토양표면으로 유출되기 때문에 홍수량이 증가한다. 이와 같이 산불피해지역은 토지피복변화에 따른 홍수량 증가로 인한 유출 및 토양침식 발생뿐만 아니라 극심한 호우에 의해 홍수 및 토석류 피해 위험에 노출되기 쉽다. 따라서

산불피해지역은 고도, 식생에 따른 차별화된 재해대책방안의 수립과 산불피해지역 토지피복변화에 따른 유출량에 대한 장기적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발의 연구비 지원(2017-MOIS31-004)에 의해 수행되었습니다.

본 연구는 행정안전부 재난예측및저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05).

이 논문은 행정안전부장관의 재난관리분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

References

- Choi, H. (2013). Determination of hydrologic parameters for runoff analysis. *Asia-Pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, Vol. 7, No. 4, pp. 363-373.
- Choo, T.H., Yoon, H.C., Noh, H.S., and Ko, H.S. (2013). Estimation of sediment yield in a disaster area by a fired forest. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 6, pp. 257-263.
- Chung, J.W. (2015). Hazard assessment of post-fire debris flow induced by rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 4, pp. 177-183.
- Costa, M.H., Botta, A., and Cardille, J.A. (2003). Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, Vol. 283, No. 1-4, pp. 206-217.
- Desta, Y., Goitom, H., and Aregay, G. (2019). Investigation of runoff response to land use/land cover change on the case of Aynalem catchment, North of Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 153, pp. 130-143.
- Kang, J.M., Zhang, C., Park, J.K., and Kim, M.G. (2010).

- Forest fire damage analysis using satellite images. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 28, No. 1, pp. 21-28.
- Kang, S.H., Lee, S.H., Lee, J.B., and Jung, Y.J. (2003). A study on the assessment of flood damage caused by Typhoon RUSA in the east coast following the 2000 large scale fire disaster. *Proceedings of 2003 Spring Conference*, Korea Institute of Fire Science and Engineering, pp. 32-36.
- Kim, B.S., Yoon, S.K., Yang, D.M., and Kwon, H.H. (2010). Development of grid-based conceptual hydrologic model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 7, pp. 667-679.
- Kim, S.J., Park, G.A., and Chun, M.K. (2005). Analysis of runoff impact by land use change. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 4, pp. 301-311.
- Kim, Y.M. (2009). *Influence of vegetation recovery on runoff, sediment yield, and nutrient losses following a forest fire in Samcheok, Korea*. Master's thesis, Kangwon National University.
- Korea Aerospace Research Institute. *KARI Image*.
- Lee, K.S., Choung, Y.S., Kim, S.C., Shin, S.S., Ro, C.H., and Park, S.D. (2004). Development of vegetation structure after forest fire in th east coastal region, Korea. *Korean J. Ecol.*, Vol. 27, No. 2, pp. 99-106.
- Marques, M.A., and Mora, E. (1998). Effects on erosion of two post-fire management practices: Clear-cutting versus non-intervention. *Soil and Tillage Research*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 433-439.
- Nam, D.H., Kim, M.I., Kang, D.H., and Kim, B.S. (2019). Debris flow damage assessment by considering debris flow direction and direction angle of structure in South Korea. *Water*, Vol. 11, No. 2, 328. doi:10.3390/w11020328
- Park, J.H., No, S.H., and Lee, G.S. (2013). Outlook analysis of future discharge according to land cover change using CA-Markov technique based on GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 16, No. 3, pp. 25-39.
- Shin, S.S., Park, S.D., Cho, J.W., and Lee, K.S. (2008). Effects of vegetation recovery for surface runoff and soil erosion in burned mountains, Yangyang. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4B, pp. 393-403.
- Wang, F., Ge, Q., Yu, Q., Wang, H., and Xu, X. (2017). Impacts of land-use and land-cover changes on river runoff in Yellow River basin for period of 1956-2012. *Chinese Geographical Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 13-24.
- Wissmar, R.C., Timm, R.K., and Logsdon, M.G. (2004). Effects of changing forest and impervious land covers on discharge characteristics of watersheds. *Environmental Management*, Vol. 34, No. 1, pp. 91-98.
- Yang, I.T., Park, J.H., and Chun, K.S. (2003). A study on soil loss in forest fire area. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 11, No. 2, pp. 11-16.

Received	October 11, 2019
Revised	October 15, 2019
Accepted	November 1, 2019