

복합재해 영향을 고려한 산불 후 산사태 잠재적 피해 위험도 분석*

이종욱¹⁾ · 이동근²⁾ · 송영일³⁾

¹⁾ 서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 · ²⁾ 서울대학교 조경·지역시스템공학부 ·
³⁾ 환경정책평가연구원 국가기후변화적응센터

Analysis of the potential landslide hazard after wildfire considering compound disaster effect*

Lee, Jong-Ook¹⁾ · Lee, Dong-Kun²⁾ and Song, Young-II³⁾

¹⁾ Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,
²⁾ Department of Landscape Architecture and Rural system Engineering, Seoul National University,
³⁾ Korea Environment Institute, Korea Adaptation Center for Climate Change.

ABSTRACT

Compound disaster is the type that increases the impact affected by two or more hazard events, and attention to compound disaster and multi-hazards risk is growing due to potential damages which are difficult to predict. The objective of this study is to analyze the possible impacts of post-fire landslide scenario quantitatively by using TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis), a physics-based landslide model. In the case of wildfire, soil organic material and density are altered, and saturated hydraulic conductivity decrease because of soil exposed to high temperature. We have included the change of soil saturated hydraulic conductivity into the TRIGRS model through literature review. For a case study, we selected the area of 8km² in Pyeongchang County. The landslide modeling process was calibrated before simulate the post-wildfire impact based on landslide inventory data to reduce uncertainty. As a result, the mean of the total factor of safety values in the case of landslide was 2.641 when rainfall duration is 1 hour with rainfall intensity of 100mm per day, while the mean value for the case of post-wildfire landslide was lower to 2.579,

* 본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업(2014001310006)”의 지원을 받아 수행되었음.

First author : Lee, Jong-Ook, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : jolee21c@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong-Kun, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering,
Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Received : 28 September, 2018. **Revised** : 20 December, 2018. **Accepted** : 17 December, 2018.

showing potential landslide occurrence areas appear more quickly in the compound disaster scenario. This study can be used to prevent potential losses caused by the compound disaster such as post-wild-fire debris flow or landslides.

Key Words : *climate change, impact assessment, disaster restoration, TRIGRS, water repellency, debris flow*

I. 서 론

국내에서도 기후변화의 영향으로 인한 자연재해의 증가가 보고되고 있으며, 미래에는 이로 인한 사회 경제적 피해가 더욱 증가할 것으로 전망되고 있다(KEI, 2015). 기후변화로 인한 재해는 가뭄, 홍수, 산사태, 폭설, 혹한 등의 단일재해의 양상으로 나타날 수 있으나, 두 개 이상의 재해가 복합적으로 해당 지역에 영향을 주어 피해의 크기를 증가시키는 형태로 나타나기도 한다. 이러한 재해의 형태를 복합재해(compound disaster)라 할 수 있으며, 표면적으로 드러나지 않는 잠재적 피해의 규모로 인해 관심이 증가되고 있다(Liu & Huang, 2014). 복합재해는 다중 위험 요소(multi-hazard risk)에 기인한 자연재해로서, Multi-Hazard risk는 Agenda 21 와 Johannes burg plan 등 지속가능한 개발의 필요성에 대하여 소개한 초기의 문헌들에서 거론된 후 지속적으로 그 대응책에 대하여 논의되고 있다(UNCED, 1992).

최근 2018년 1월에 미국 캘리포니아 산타바바라 인근의 Montecito 에서 발생한 토석류 산사태의 경우는 산불 이후 산사태로 연계되는 복합재해의 유형이다. 산불에 의해 산림이 손상되었고 약화된 지층은 한 달가량 후 발생한 집중강우 때문에 mudslide라고 지칭되는 토석류 산사태를 일으켰으며, 인근 거주지에 피해를 주어 21명이 사망하고 160명가량이 부상하였다(Aghakouchak et al., 2018). 국내의 경우 산불-산사태 복합재해 피해를 분석한 학술 자료로는 Jun et al.(2009) 의 강원도 지역 산불 발생 이력

을 고려한 산사태 발생 차이에 관한 연구가 있으며, 이 연구에서 산불 발생지에서는 산사태 주의보 기준에 미달하는 산사태 발생이 40%인데 비하여 산불 미발생지에서는 25%로 나타나 산불 발생 이력이 있는 경우 산사태 발생이 증가함을 보였다. 그 외, Oh et al. (2001)은 산불 후 토양환경의 화학적 성질의 변화 및 물성 변화에 대해 알아보았으며, Kim(2014) 과 Park et al.(2000) 등은 산불 후 강우 시 산사태와 토사 유출에 의한 피해 유발 가능성에 대하여 언급하여 그 위험성과 연구의 필요성에 대하여 언급한 바 있다.

본 연구의 목적은 복합재해의 유형 중 국내에서도 발생이 가능한 산불-산사태 복합재해 시나리오에 대하여 물리식 기반 산사태 모델인 미지질 조사국(U.S. Geological Survey-USGS)의 TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis)을 이용한 분석 방법에 대하여 알아보는 것이다. 아울러 사례연구를 위한 대상지역에 산불-산사태 복합재해 발생을 가정하여 해당 물리식 기반 모델을 위한 입력 변수를 선택하고, 발생 가능한 영향과 피해에 대하여 정량적인 분석을 하고자 한다. 그 외에 다양한 복합재해의 유형과 재해 시나리오에 대하여 알아보고 향후 복합재해 연구를 위한 접근 방향을 제시하고자 한다. 건조한 기후의 영향으로 산불이 발생하는 경우 식생이 소실되며, 지표면이 고온조건에 노출되어 토양의 물리적 특성이 변화하게 된다. 산불 이후에 토양의 물리적 특성이 변화하여 투수 효과를 감소시키고 구조적 안전성을 감소시키는 현

상을 water repellency 효과라고 하며, 산불 이후 변성 정도에 따라 길게는 수개월에 걸쳐 지속되기도 한다고 알려져 있다(Shakesby & Doerr, 2006). TRIGRS와 같은 물리식 기반의 산사태 모델은 입력 변수에 산불 영향에 의해 변화된 표층 토양 성질의 특징을 반영할 수 있어 산불-산사태 복합재해 피해 영향에 대한 시뮬레이션이 가능하다.

산불 후 산사태 발생에 관한 연구로는, Nyman et al.(2011)이 호주 남동부 지역의 산불 이후의 토석류 증가 사례에 대하여 현장 조사를 실시하고, 채취된 토양 시료의 특성을 분석하여 증가 원인에 대하여 밝히고자 한 연구가 있다. Parise & Cannon(2012)은 산불 후 산사태를 우수 토양 유실에 의해 표층부에서 발생하는 토석류 산사태(debris flow)와 우수 침투에 의한 천층부 산사태로(shallow landslide) 구분하여 발생 과정과 영향에 대하여 알아보았다. 또한 Cannon et al.(2008)은 남부 캘리포니아와 콜로라도 주 경계의 산불 발생지역에서 산사태가 발생하기 위한 강우 강도와 지속시간의 임계치에 관한 연구를 수행하였으며, Staley et al.(2013)는 토사류 산사태가 발생하는 정확한 시간을 추가적으로 고려하여 남부 캘리포니아 지역의 산불 후 산사태 강우 임계치의 예측 정확도를 향상시키기 위한 연구를 진행하였다. Lainas et al.(2016)은 서부 그리스 지역의 산불 후 산사태를 유발하는 강우 임계치에 관하여 연구하여 산불 전과 비교하면 20~30% 정도 낮은

강우 강도에서도 산사태가 일어남을 보인 바 있다. 수치 모델링을 활용한 산불-산사태의 영향에 관한 연구로는, Ren et al.(2011)이 geo-fluid model인 SEGMENT를 이용하여 남부 캘리포니아 지역의 산불 후 토석류 특성에 대한 분석이 있으나, 산불영향의 강도를 실제 토양 실험결과에 근거하지 않고 경험적 범주로(empirical severity categories) 구분하여 토양 특성 변화를 반영한 바 있다.

본 연구에서는, 문헌 검토를 통하여 토양시료 실험에 근거한 산불 이후의 토성 변화를 반영하고자 하였으며, TRIGRS 모델에 입력 변수 중 토양의 포화 수리전도도의(Saturated hydraulic conductivity - Ks) 변화를 고려하여 산불-산사태 복합재해 영향을 알아보하고자 하였다. 산사태 모델링 결과는 신뢰성을 향상시키기 위하여 연구 대상지인 평창지역 실제 강우 강도 자료 및 산사태 조사 자료에 근거하여 검정(calibration) 과정을 거쳤다. 본 연구는 단일 재해로서 산사태 경우와 비교하면 복합재해인 산불-산사태의 영향 고려하였을 때 증가되는 산사태 발생 가능지역을 파악하고, 복합재해로 인한 잠재적 피해를 저감하기 위하여 활용될 수 있다.

II. 복합재해의 유형 및 재해 시나리오의 설정

자연재해 형태 중 복합재해를 지칭하기 위한 용어는 다양하게 사용되는 것으로 보인다. Kappes et al.(2012)은 자연재해에 있어 다중 위

Table 1. Type of compound disaster and description

Types of compound disaster	Descriptions of types
Independent events type	Accumulated risk caused by single hazard events that a damage is caused by exposure to A or B event.
Deposition events type	A precedent event changes the susceptibility and increases the probability and magnitude of damage caused by next event.
Domino or cascading events type	Sequential occurrence of hazard events causes a complex disaster in the form of a chain effect.
Coupled events type	Risk associated with the same triggering event that generates different hazard types and increases magnitude

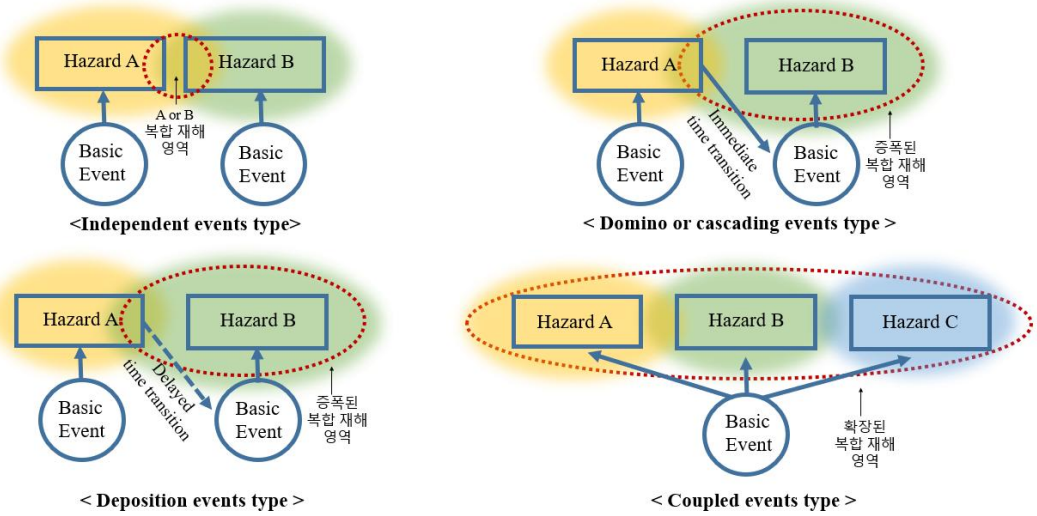


Figure 1. Relation of multi-hazard risk causing compound disaster

험 요소나 복합재해의 인식이 증가 되고 있으나, 일관되게 사용되지 않고 오히려 여러 용어가 사용됨으로써 복합재해의 다양한 유형을 설명해 준다고 하였다. 복합재해를 유발하는 다중 위험 요소 간의 관계는 다음의 Table 1과 Figure 1과 같이 유형별로 분류하여 알아볼 수 있다. (CHARIM, 2018; Liu et al., 2016).

복합재해 유형 중 산불에 이어 산사태가 일어나는 자연재해의 경우는, 산불이 일어난 이후에 일정 기간 시간이 흐른 후 강우에 의한 산사태가 보다 쉽게 증폭되어 나타날 수 있는 현상으로 Deposition events type의 복합재해 경우라 할 수 있다. 국내의 경우 봄철 집중 호우가 이어지면서 산불-산사태 복합재해의 영향이 나타날 수 있으며, 식생이 회복되고 변성된 토양이 원상태로 회복될 때까지 표층 토양유실로 인한 토석류 산사태 등의 피해가 지속될 수 있다. 본 연구에서는 산불이 발생한 이후 일정 기간 동안 지속될 수 있는 water repellency 효과를 고려하여 산불-산사태 복합재해 시나리오를 설정, 피해 영향 분석을 실시하였다.

III. 연구방법 및 데이터

1. 물리식 기반 산사태 모델링

TRIGRS는 강우 침투에 의한 압력 수두 및 지하수위 해석 수문모델, 사면안정 해석을 위한 사면안정도모델로 구성되어 있으며 강우에 의한 표층 산사태 발생 가능성을 평가하는 모델이다(Baum et al., 2008). TRIGRS 모델 이외에 물리식 기반의 산사태 영향을 알아보기 위한 모델들은 SHALSTAB (Shallow Slope Stability Model), The dSLAM (distributed Shallow Landslide Analysis), SHETRAN (System Hydrology European TRANsport), SINMAP (Stability Index MAPPING) 등이 있으며(Park, 2013), TRIGRS는 학술적 검증 자료가 비교적 많고 넓은 대상지에 대한 구동 편리성 때문에 본 연구를 위해 사용되었다.

TRIGRS 수문모델은 불포화 토양층에서의 물의 이동을 시간 변화에 따라 표현하기 위한 Richard 공식을 Iverson(2000)이 정적인 요소와 경과적인 요소를 포함하여 제안한 수정 식에 근거하고 있다. 이 수문모델은 유한 토심 경계 조건과 무한 토심 경계 조건으로 구분하여 지하수 압력 수두에 대한 해를 나타내는데, 일반식은

$$\psi(Z,t) = (Z-d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t-t_n) [D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} \left\{ H(t-t_{n+1}) [D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}$$

여기서

ψ = 지하수 압력 수두(m),

t = 시간(sec),

Z = 토심(m),

d = 지하수위(m),

β = $\cos 2\theta - (IZLT / K_s)$,

K_s = 토양 포화 수리전도도(m/s),

$IZLT$ = 강우전 정상 침투율,

$\ln Z$ = 단위시간의 지표 침투율,

$D1 = D0 / \cos 2\theta$,

$D0$ = 포화 수리 확산계수(m²/s),

θ = 사면경사도(°),

N = 단위시간 개수,

$H(t-t_n)$ = Heaviside 계단 함수,

ierfc = 여오차함수

다음과 같이 표현된다.

TRIGRS 사면 안전성 모델은 무한 사면 안전성 분석에 근거하며 Mohr-Coulomb 식에 의해 표현되는 전단력과 전단응력의 비에 의해 안전율을 나타내게 된다. 모델의 결과는 안전율 (Factor of Safety - FS)의 값으로 도출이 되며 시뮬레이션 결과가 $FS < 1$ 로 나타나는 위치에서 산사태가 발생할 확률이 높은 것으로 해석된다.

안전율을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$F_s(Z,t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \theta} + \frac{c' - \psi(Z,t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \theta \cos \theta}$$

여기서

FS = 안전율 (Factor of safety)

Z = 토심(m),

t = 시간 (s),

c' = 토양 점착력(kPa),

γ_s = 토양 습윤 단위중량(kN/m³),

θ = 사면경사도(°),

ψ = 지하수 압력 수두(m),

γ_w = 물 단위중량(kN/m³),

ϕ' = 토양 내부 마찰각(°)

2. 대상지 및 모델링 입력 변수

모델링 대상지로는 산불 및 산사태 발생의 위험도가 높은 강원도 평창군 지역 중 용평면 일대의 약 8km²를 선택 하여 분석을 진행하였다. 대상지에 대한 TRIGRS 모델 결과 값 도출을 위해 지형자료, 토양자료, 기상자료 세 종류의 자료를 입력하였다. 본 연구를 위하여 지형자료는 10m 해상도의 수치 지형도(Digital Elevation Map - DEM) 을 이용하였으며, 지형도를 기반으로 GIS 프로그램을 이용하여 경사도 및 사면방향 자료를 생성하였다. 토양자료로는 농촌진흥청에서 제공하는 정밀 토양도를 이용하였으며, 대상지 토성별로 입력해야 하는 점착력, 포화 수리전도도, 내부 마찰각, 습윤 중량, 공극률의 토양 물성 자료는 미국 농업국(United States Department of Agriculture)에 의해 제공되는 SPAW 프로그램의 토성별 기본값(default value) 을 사용하였다.

토양 포화 수리 확산계수는 문헌을 참조하여 포화 수리전도도의 100배에 해당하는 수치를 사용하였으며 (Liu and Wu, 2008), 강우 전 정상 침투율은 모델 결과의 불확실성을 감소시키

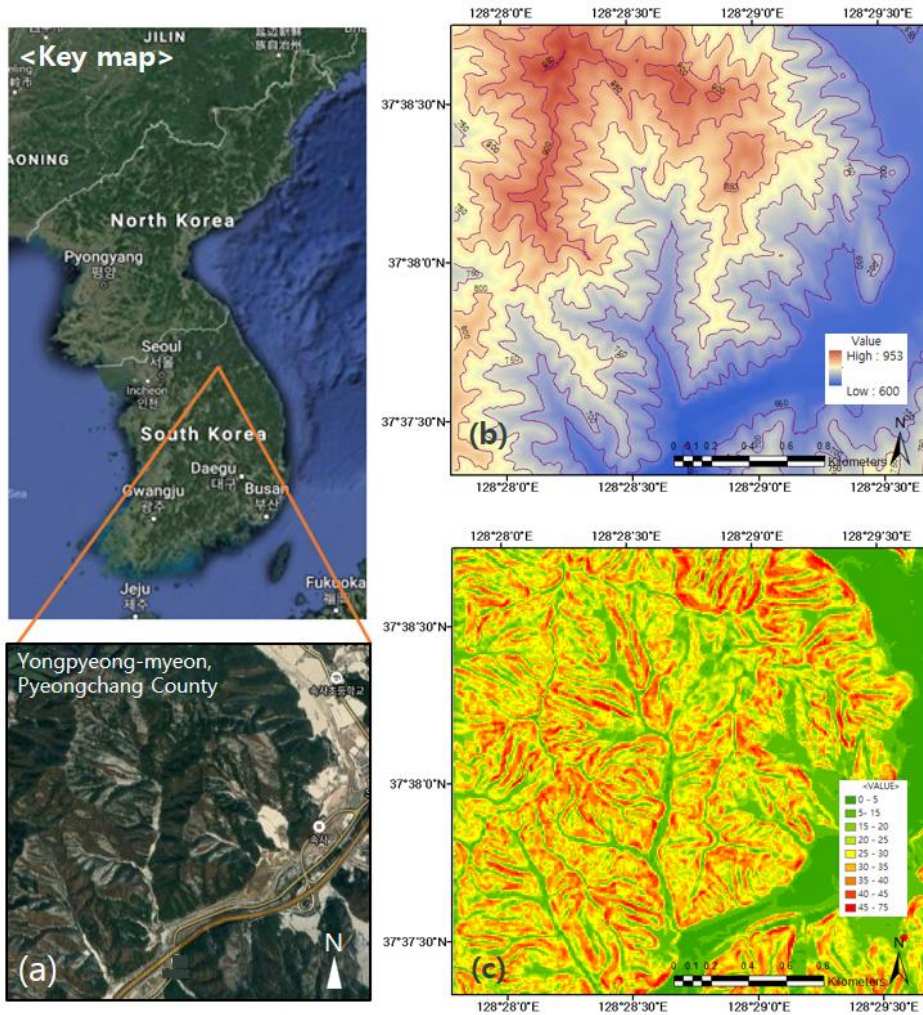


Figure 2. Location and topography of the study area, (a) Key map and satellite image (from Google map), (b) Digital elevation map (meter) (c) Slope map (degree,°)

기 위하여 Receiver Operating Characteristic (ROC) 분석을 통하여 선택하도록 하였다. ROC 분석을 통한 검정(calibration)은 2006년 태풍 에위니아(Ewiniar) 피해 직후 보고된 평창지역 산사태 조사 자료를 사용하여 실시하였으며, 실제 산사태 발생 자료와 입력 변수별 모델링 결과를 비교하여 산사태 발생지역에 대한 판별력이 가장 좋은 입력 변수를 사용하도록 하였다. 초기 지하수위는 자료 부재 및 넓은 대상지에 대하여 특정하기 힘들다는 한계를 고려하여, 암반 위에

형성되는 토양의 유효 심도와 동일한 값을 사용하였다. 토양의 물성 입력 값 및 지형과 위치 자료는 Figure 2 와 Table 2와 같다.

모델링 검정을 위한 강우 자료는 기상청에서 제공하는 평창 인근의 대관령 관측소 강우 강도 자료를 사용하였으며, 태풍 에위니아가 피해를 준 2006년 7월 15일에서 16일 사이 강우 자료를 ROC 검정을 위하여 사용하였다. 산불-산사태 복합재해 영향평가를 위한 강우 강도는 국내에서 48시간 동안 200mm 이상의 강우가 지속될

Table 2. Summary of soil property values used for modelling

Soil texture	Soil cohesion	Soil internal friction angle	Soil unit weight	Saturated hydraulic conductivity	Porosity
	Kpa	Degree	KN/m ³	m/s	ratio
Sandy loam	10	32	20	1.34×10 ⁻⁵	0.53
Clay loam	12	25	19	1.81×10 ⁻⁶	0.53
Sand	5	35	21	2.49×10 ⁻⁵	0.53
Clay	7	23	18	3.14×10 ⁻⁷	0.51

경우 산사태가 유발된다는 연구 결과를 반영하여(Kim & Chae, 2009) 1일 100mm의 강우 강도를 설정하여 결과를 모의하였다. 다만 높은 강우 강도 입력 값에서 토양층 포화 후 안전율에 대한 민감도가 현저히 감소하는 TRIGIRS 모델의 특성을 반영하여, 산사태 단일 재해의 경우에 비교한 산불-산사태 복합재해 발생 가능 면적의 차이가 크게 나타나는 강우 초기 시간에 대하여 분석하였다.

3. 산불에 의한 토양 물성 변수 조건

산불 후 산사태 발생의 복합재해 시나리오 적용 시 추가로 고려해야 하는 변수 조건을 적용하기 위하여 산불에 의한 토양 물성의 변화에 대하여 문헌 조사를 하였다. 산불 이후 산사태 발생에 의한 피해 가중 원인은 식생의 강우 차단 효과 상실 및 토양 유기물 등에 의한 소수층(hydrophobia coating) 생성에 기인하는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2000). 식생에 의한 강우 차단은 초기에 일시적으로 유지된 후 일정한 수관 투과 우량과 수간 유하 우량이 유지되기 때문에 그 영향이 상대적으로 미약 하며(Kim, 2013), 산불-산사태의 복합재해를 가중시키는 가장 큰 원인은 산불에 의한 토양 물성 변화 후 water repellency 효과 증가라고 볼 수 있다(Nyman et al., 2011).

산불 발생 시 토양 유기물 및 밀도 등이 변성되어 토양 투수를 감소시키게 되는데, 토양의 고온조건 노출에 의해 토양 포화 수리 전도도가 감소하고 와 토양의 흡수성(Sorptivity of water)

등이 변화되어 산사태 발생 및 토석류 증가 등에 영향을 주게 된다(Moody & Ebel, 2012). Wieting et al.(2017)은 실제 산림에서 채취한 토양 샘플에 대한 고온 노출 실험을 통하여 온도 조건에 따른 토양 물성의 변화 정도를 연구하였다. 실험에 따르면, 토양 시료는 대조구에서 평균 3.7×10⁻⁵ cm·s⁻¹의 수리전도도를 보였으나, 실험에 의해 저온 노출 (표면기준 200 - 250 °C) 조건을 가한 후 평균 2.0×10⁻⁵ cm·s⁻¹으로 0.54 배 정도의 감소된 결과를 보였다. 고온 노출 (표면 기준 450 - 500 °C) 조건의 경우 수리전도도가 평균 14.0×10⁻⁵ cm·s⁻¹ 로 증가하여 소수층이 파괴돼 오히려 산사태 유발 요인이 감소하는 것으로 나타났다.

이 실험은 유기물의 손실 정도의 차이를 반영하지 못하였다는 점에서 한계점이 있으나, 현장 토양 시료에 대한 실험을 통하여 토양의 물성 변화를 분석했다는 점을 고려하여 산불-산사태 복합재해 시나리오 적용을 위한 변수 조건으로 반영하였다. 그밖에 현장 시료 채취에 의한 토양 물성 변화 연구를 보면, 산불 미발생지에 비해 산불 발생지에서 토양 포화 수리전도도가 0.65~0.83배 감소하는 산불에 의한 영향을 확인할 수 있었다(Nyman et al., 2011). 토질의 다양성과 유기물 함량의 차이 등에 따라 산불에 의한 토성 변화는 대상지 별로 상이할 것으로 예상되나, 국내 실험 데이터의 부족 및 재해 대비를 위한 최악의 시나리오(worst case scenario) 적용을 감안하여 상기 연구 결과에서 제시된 0.54배의 포화 수리전도도 감소를 복합재해 모

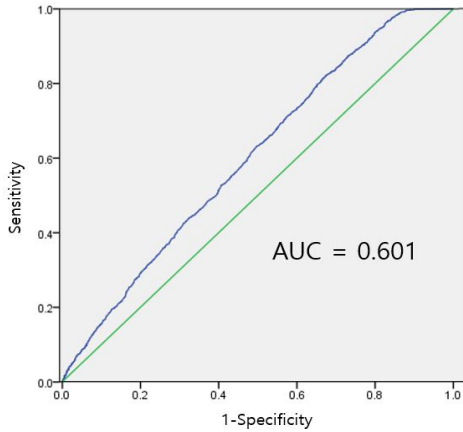


Figure 3. ROC graph (IZLT = 1.0×10^{-7})

Table 3. Result of ROC analysis

Steady pre-storm infiltration rate	AUC value	95% lower limitation	95% upper limitation
1.0×10^{-6}	0.597	0.582	0.612
1.0×10^{-7}	0.601	0.586	0.616
1.0×10^{-8}	0.600	0.585	0.615
1.0×10^{-9}	0.599	0.584	0.615

델링을 위한 토양 변수 조건으로 적용하였다.

그 외 문헌 조사에 의하면 강우 전 정상 침투율 값은 토양의 포화조건에서 포화 수리전도도와 동일한 수치 혹은 0.01배에 해당하는 수치의 입력을 제안한다 (Liu and Wu, 2008). 본 연구에서는 대상지의 토양 포화 수리전도도 입력 값들의 약 0.1배에서 0.01배의 값들을 0.1의 구간으로 나누어 1.0×10^{-6} 에서 1.0×10^{-9} 까지 4개의 시나리오에 대하여 ROC 분석을 실시하였다.

IV. 결 과

1. ROC 모델링 검증

강우 전 정상 침투율 수치 선정을 위한 ROC 모델링 검증 결과, AUC (Area Under Curve)는 근소한 차이지만 강우 전 정상 침투율 1.0×10^{-7}

을 입력했을 때 AUC 수치가 가장 크게 나타났다. 따라서 해당 수치를 대상 지역에 대한 산불-산사태 복합재해 모델링을 위한 입력 값으로 선택하였다. ROC 분석 결과는 Table 3 와 같으며, Figure 3은 1.0×10^{-7} 의 강우 전 정상 침투율 값을 입력했을 때의 ROC 그래프이다. 다른 입력 값에서의 그래프 형태도 유사하게 나타난다.

2. 산불-산사태 복합재해 모델링 결과 비교

산사태 발생 조사 자료를 근거로 검증 과정을 거친 모델 및 입력자료 대하여, 산불-산사태 복합재해 발생 시 피해 영향에 대해 알아보았다. 동일한 강우 지속시간 조건에서 산사태 단일 재해 경우에 비교한 산불-산사태 복합재해 TRIGRS 모델링 결과는 Figure 4 와 같이 나타났다.

모델링 결과, 산불에 의한 토양의 포화 수리전도도 감소로 인한 산사태 발생 가능지역 증가는 Figure 4의 (a) 와 (c)의 비교에서 볼 수 있듯이, 동일한 강우 지속시간 1시간 조건에서 산사태 단일 재해 경우보다 산불-산사태 복합재해 경우가 위험지역이 (안전율 $FS < 1$) 보다 넓은 지역에서 급속히 나타났다. 강우 지속시간이 4시간 경과 하면서 두 경우의 위험지역의 편차는 적게 나타났으나, 토양층이 포화 되어 비슷한 안전율 수치를 보이기 전까지는 산불-산사태 복합재해 경우에서 위험지역 면적이 더 넓게 나타났다. 결과와 같이 평상시 단일 재해로서 산사태 발생위험이 낮은 강우 조건에서도 산불-산사태의 복합재해 시나리오 고려 시 산사태 발생위험이 큰 지역이 될 수 있다.

Figure 5의 그래프 (a)는 시간 경과에 따른 안전율 변화 추이를 나타낸다. 강우 1시간 경과 시 산사태 단일 재해 경우에서의 전체 안전율 평균값은 2.641인 반면 산불-산사태 복합재해 경우 안전율 평균값은 2.579로 보다 낮은 수치를 보였다. 즉, 복합재해 시나리오에서 산사태 발생위험이 큰 지역이 더욱 넓게 분포하는 경향을 보였다. 복합재해와 단일 재해 경우 모두 강우

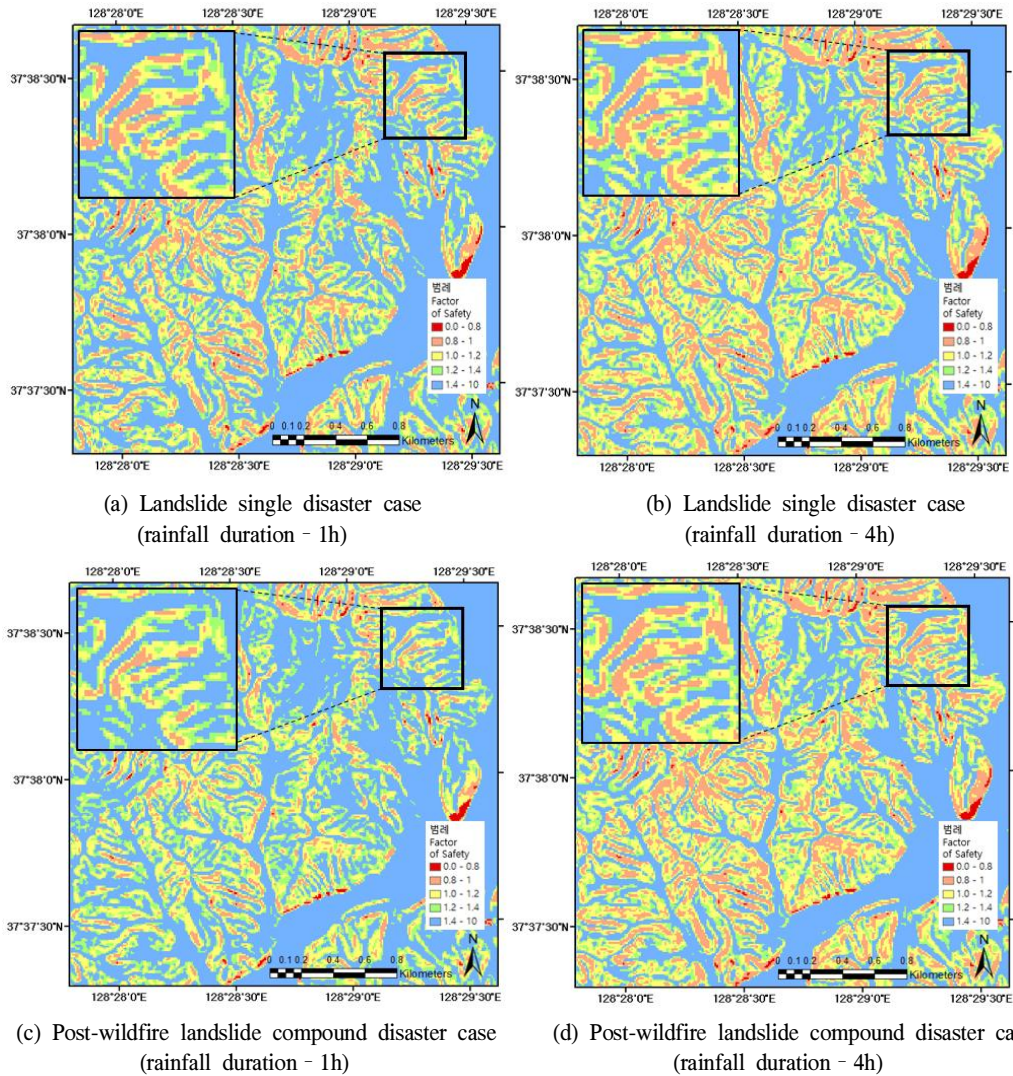


Figure 4. TRIGRS modeling result maps of post-wildfire landslide compound disaster case compared to landslide single disaster case (rainfall intensity of 100mm/day), (a) Landslide single disaster case (rainfall duration - 1h), (b)Landslide single disaster case (rainfall duration - 4h), (c) Post-wildfire landslide compound disaster case (rainfall duration - 1h), (d) Post-wildfire landslide compound disaster case(rainfall duration - 4h)

시간이 경과 하면서 안전율 감소 비율은 감소하였으나 산불-산사태 복합재해 경우에서 안전율 평균값이 지속적으로 낮게 유지되었으며, 강우 4시간 경과 후 안전율 평균값은 각각 2.42 와 2.41로 두 경우 모두 유사한 수치로 수렴하였다. 강우와 함께 지하수 상승 후 토양층이 포화되면 강우량이 증가하더라도 안전율 변화가 현저히

둔화되는 TRIGRS 모델 특성상 강우 시간이 4 시간 이상 지속되는 조건에는 더 이상의 결과 값 변화는 크게 나타나지 않았다.

Figure 5의 그래프 (b)는 시간 경과에 따른 산사태 위험지역 면적 변화를 나타낸다. 강우 1시간 경과 시 산사태 단일 재해 경우는 안전율이 1 미만인 (FS<1) 위험지역의 전체 면적이 0.56

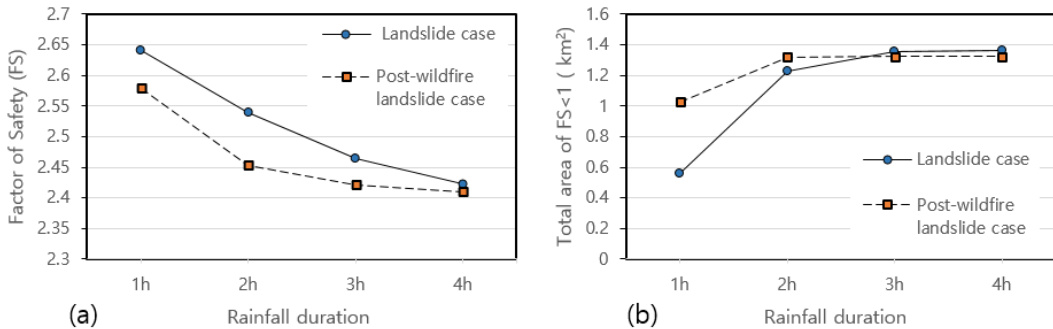


Figure 5. TRIGRS modeling result graphs of post-wildfire landslide compound disaster case compared to landslide single disaster case (rainfall intensity of 100mm/day), (a) Changes of factor of safety (FS) at different rainfall duration, (b) Changes of total area of FS less than 1 at different rainfall duration

km² 인 반면 산불-산사태 복합재해 경우 안전율 1 미만 지역의 면적은 1.03 km² 으로 보다 넓은 면적이 산사태 위험지역으로 분석되었다. 복합재해와 단일 재해 경우 모두 시간의 경과에 따라 위험 지역 증가 하였으나 증가 비율은 강우가 지속되면서 둔화되는 경향을 보였다. 특히, 산불-산사태 복합재해의 시나리오는 산사태 단일 재해 경우 보다 위험지역이 급속히 최대치로 수렴하였으며, 3시간 경과 후로는 1.32km²의 동일한 면적이 유지 되었다. 분석 결과, 복합재해 시나리오를 위해 전체적으로 감소된 포화 수리전도도가 입력되었기 때문에 강우 시간 4시간 경과 기준, 위험지역 최대 면적은 복합재해 시나리오에서 1.32 km²로 단일 재해 산사태의 경우 1.37km² 보다 약간 작은 면적으로 나타났다.

V. 고 찰

본 연구의 결과에서 확인 할 수 있듯이 TRIGRS와 같은 물리식 기반 모델을 이용할 경우 실제 대상지의 지형, 토양, 기상 자료에 근거한 물리 변수 들을 입력하여 산사태 발생 확률이 높은 위험 지역 분석이 가능하다. 산불 후 산사태로 인한 피해지역의 확대는 복합재해 시나리오를 적용한 물리변수 반영을 통해 모델링이 가능하였다. 이것은 통계 기반 모델링과는 차별

화되는 물리식 기반의 모델링 장점으로, 특정 강우 사상에 의해 실제 유발될 수 있는 산불-산사태 복합재해 발생 위험지역의 분포 추정이 가능하였다. 본 결과를 봄철 건조기 산불 발생지역에 적용할 경우, 산사태에 비교적 안전한 지역이었지만 평년 치 강우 강도에서도 산사태 발생이 가능한 지역을 분석 할 수 있으며, 여름철 우기에 예측하지 못한 산사태 발생에 대비할 수 있을 것이다.

그러나 수치 모델의 한계점을 고려할 경우 물리식 기반 모델링을 통한 산사태 발생 위험지역 분석 결과는 다양한 전문가 의견을 종합할 때 참고자료로써 활용될 필요가 있다. 산불에 의한 water repellency 효과는 노출 온도와 시간, 식생의 종류, 토성, 토양 습윤도 등에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 정밀 토양도 등 자료의 특성상 같은 토성으로 분류되어 있더라도 지역에 따른 편차가 분명 존재 할 수 있으므로, 실제 시료 채취 및 실험에 근거하여 해당 지역의 지질, 지형적 특성이 반영된 모델링 및 영향평가가 이루어져야 한다. 또한, 현재 자료 부재로 인해 산불-산사태의 영향 결과에 대한 검증은 실시하지 하지 못하였다. 실제 산불-산사태 복합재해가 일어난 지역에 대한 충분한 조사 자료가 있다면 입력변수의 불확실성을 고려한 다양한 시나리오 기반의 검증이 가능할 것이다. 향후, 조사 자

료가 구비된다면 Modified Success Rate (MS) 혹은 Cohen's Kappa와 같은 지수를 이용하여 산불-산사태 복합재해에 대한 물리 모델 예측의 정확성 평가도 가능할 것이다.

기후 변화 및 기상 이변으로 인한 자연재해를 단일 재해로써 만 인식할 경우, 복합재해로 인한 잠재적 영향을 간과하여 예측하지 못한 피해를 입을 수 있다. Jordan(2016)은 브리티시 컬럼비아 지역에서 과거에 보고되지 않던 산불 후 산사태의 영향이 2007년에서 2009년 사이에 증가된 사례에 관하여 연구하였다. 국내에서도 향후 산불-산사태의 복합재해뿐만 아니라 다른 양상의 복합재해 발생이 증가 될 것으로 예상되므로 발생 가능한 다양한 유형의 복합재해에 관하여 연구가 지속될 필요가 있다.

산불 후 산사태를 방지하기 위해서는 영향 예측뿐만 아니라 토양유실을 줄이기 위한 저감 방안 실시 및 식재를 통한 복원이 필요하다. Cawson et al.(2013)은 10m 이상의 타지 않고 남은 산림 패치가 토양유실을 막는 역할을 하므로 산불-산사태 모델링 시 고려될 필요가 있다고 하였다. 산불 후 단기간의 전체 식생 복원이 어렵다면, 토양유실 방지 효과가 있는 식생 패치를 우선적으로 만드는 것도 재해 예방을 위한 활동이 될 수 있을 것이다. 그 밖에도 경사면의 등고선을 따라 조성하는 측구 형태의 배수로 설치 (contour plowing) 토양 유실을 효과적으로 감소 시키므로(Fernandez et al., 2019), 장기간이 소요 되는 식재 활동 이전에 응급 복구의 일환으로 이와 같은 저감 활동을 실시한다면 복합재해로 인한 잠재적 피해를 감소시킬 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 산불 후 산사태 복합재해 시나리오를 실제 대상지에 적용하여 물리식 기반의 모델링을 수행하기 위하여 평창군 용평면 일대의 지형자료, 토양자료, 강우자료 등을 이용

TRIGRS 모델 결과를 분석하였다. 산사태 발생 가능성에 대한 모델링 결과는 불확실성을 감소시키기 위하여 이 지역에 발생하였던 산사태 조사 자료와 비교하여 ROC 분석을 통한 검정을 실시하였다. 산불 후 토양의 포화 수리전도도 감소로 인한 산사태 발생 가능지역 증가는 동일한 강우 조건에서 단일 재해에 비교하여 산불-산사태 복합재해 경우에서 위험지역이 보다 증가하여 나타났다. 본 연구의 결과는 특정 강우 사상에 의해 실제 유발될 수 있는 산불-산사태 복합재해 발생 위험지역의 분포 추정이 가능하다는 점에서 봄철 건조기 산불 발생 후 예측하지 못한 산사태 피해 예방을 위해 활용될 수 있다. 수치 모델 결과의 불확실성을 감안 하더라도, 복합재해로 인한 잠재적 피해를 사전에 알아볼 수 있다는 점에서 향후 물리 모델을 이용한 다양한 유형의 복합재해에 관한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업(2014001310006)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- AghaKouchak, A., Huning, L. S., Chiang, F., Sadegh, M., Vahedifard, F., Mazdiyasn, O., ... & Mallakpour, I. 2018. How do natural hazards cascade to cause disasters?. *Nature*, 561, 458-460.(Proceeding, Nature comment)
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. 2008. TRIGRS – A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis version 2.0, US Geological Survey Open-File Report, 2008-1159.

- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Wilson, R. C., Bowers, J. C. & Laber, J. L. 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96, 250-269.
- Caribbean Handbook on Risk Management (CHARIM) : Multi-hazard risk assessment, <http://www.charim.net/methodology/54>, last access : Oct30, 2018.
- Cawson, J. G., Sheridan, G. J., Smith, H. G. & Lane, P. N. J. 2013. Effects of fire severity and burn patchiness on hillslope-scale surface runoff, erosion and hydrologic connectivity in a prescribed burn. *Forest Ecology and Management*, 310, 219-233.
- Fernández, C., Fontúrbel, T. & Vega, J. A. 2019. Effects of pre-fire site preparation and post-fire erosion barriers on soil erosion after a wildfire in NW Spain. *Catena*, 172, 691-698.
- Iverson, R.M. 2000. Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, 36-7, 1897-1910
- Jordan, P. 2016. Post-wildfire debris flows in southern British Columbia, Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 25, 322-336.
- Jun, K. , Lee, S. & Yune, C. 2009. Analysis on the effect of the forest fire and rainfall on Landslide in Gangwon area. Korean Geotechnical Society conference proceedings, 1020-1025. (Proceeding in Korean)
- Kappes, M. S., Keiler, M., Von Elverfeldt, K. & Glade, T. 2012. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 64, 1925-1958.
- Kim, D., Im, S., Lee, C. & Woo, C. 2013. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed. *Ecological Engineering*, 61, 658-668.
- Kim, W. Y., and Chae, B. G. 2009. Characteristics of Rainfall, Geology and failure Geometry of the Landslide Areas on Natural Terrains in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 19, 331-344. (in Korean)
- Kim, W. Y. 2014. Landslide vulnerability in wildfire area. *The Journal of Engineering Geology conference proceedings*, 377-378. (Proceeding in Korean)
- Korea Environment Institute 2015. 2nd study on the establishment of national climate change adaptation, Korea Environment Institute
- Lainas, S., Sabatakakis, N. & Koukis, G. 2016. Rainfall thresholds for possible landslide initiation in wildfire-affected areas of western Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 883-896.
- Liu, C. N. & Wu, C. C. 2008. Mapping susceptibility of rainfall triggered shallow landslides using a probabilistic approach, *Environ. Geol.*, 55, 907-915,
- Liu M., & Huang M. 2014. Compound Disasters and Compounding Processes: Implications for Disaster Risk Management, UNISDR
- Liu, B. Siu, Y.L. and Mitchell, G. 2016. Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: A systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 629-642.
- Moody, J.A. & Ebel, B.A. 2012. Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena* 93, 58-63.
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. G. & Lane, P. N. J. 2011. Evidence of debris flow occur-

- rence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125, 383-401.
- Parise, M. & Cannon, S. H. 2012. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Natural Hazards*, 61, 217-227.
- Oh, G., Kim, J. Jeong, W. & Min, J. 2001. The Changes of Forest Vegetation and Soil Environmental after Forest Fire. *Journal of Korean Environmental Restoration And Revegetation Technology*, 4, 19-29.
- Park, D., Shim, J. & Kim, Y. 2000. Landslide Hazards by Wildfires along the East Seacoast and Field .Survey of Landslide Damages Triggered by July 2000 Torrential Rain. *Korean Society of Civil Engineers conference proceedings*, 159-162. (Proceeding in Korean)
- Park, D.W., Nikhil, N.V. & Lee, S.R. 2013. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2833-2849.
- Ren, D., Fu, R., Leslie, L. M. & Dickinson, R. E. 2011. Modeling the mudslide aftermath of the 2007 Southern California Wildfires. *Natural Hazards*, 57, 327-343.
- Shakesby, R. A. & Doerr, S. H. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74, 269-307.
- Staley, D. M., Kean, J. W., Cannon, S. H., Schmidt, K. M. & Laber, J. L. 2013. Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California. *Landslides*, 10, 547-562.
- United Nations Conference on Environment and Development. 1992. Agenda 21, Rio Declaration, Forest Principles. New York, United Nations.
- Wieting, C.; Ebel, B.A.; Singha, K. 2017. Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the boulder creek critical zone observatory. *J. Hydrol. Reg. Stud*, 13, 43-57.