

기후 리스크 대응을 위한
산사태 연구 방법론의 유형과 특성
-유형별 연구사례를 중심으로-



청주대학교
김 호 걸

목차

1. 서론
2. 산사태 연구 사례
 - 1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가
 - 2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석
 - 3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석
3. 향후 연구 계획
4. 결론

1. 서론

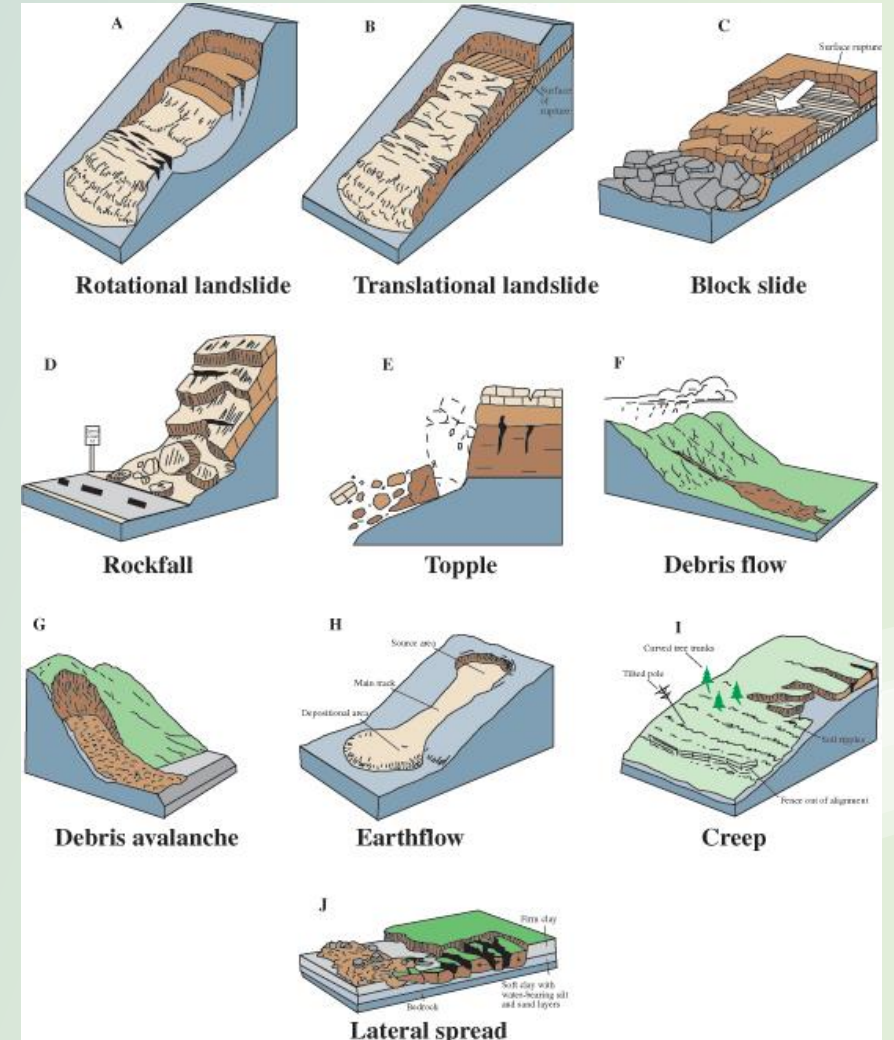
1. 서론

❖ 산사태의 정의

- 폭우, 지진, 화산 등의 영향으로 산 사면의 표토와 암석체가 경사면을 따라 아래쪽으로 이동하는 현상
- 표토층이 빠른 시간 내에 수분이 포화되어 급경사인 암반 위의 표토층이 미끄러져 빠른 속도로 산지 하부로 이동하는 것
- 사면붕괴 후 발생하는 토석류는 직접적인 인명피해와 주거환경 및 사회기반시설의 파괴로 이어짐
- 우리나라는 주로 Shallow landslide(얕은 산사태)가 발생하며, 산사태의 유형은 환경적 조건에 따라 다양하게 나타남



[2011년 서울 우면산에서 발생한 산사태]

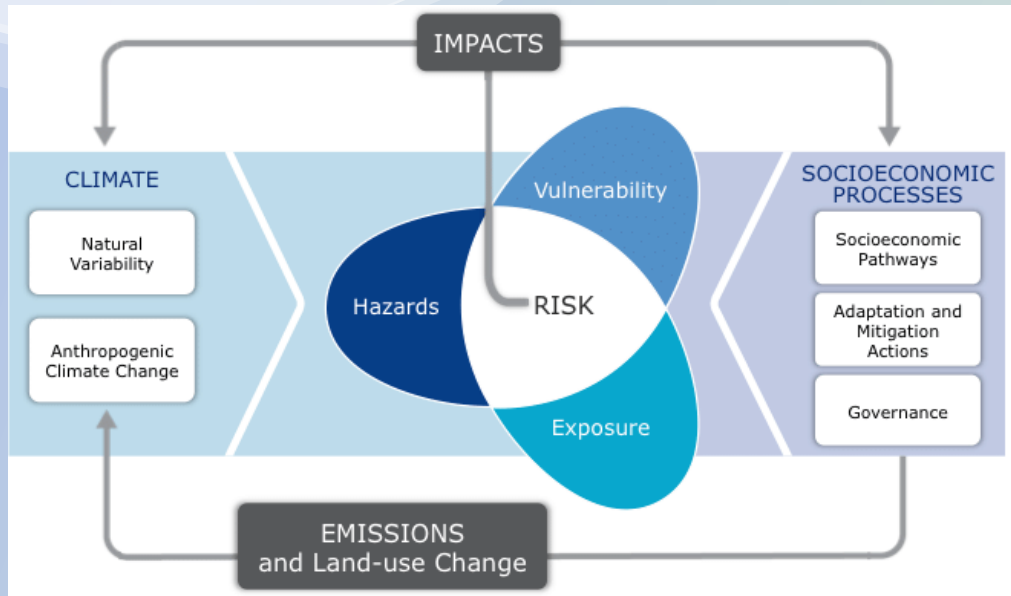


[USGS(미지질조사국)이 구분한 산사태 유형]

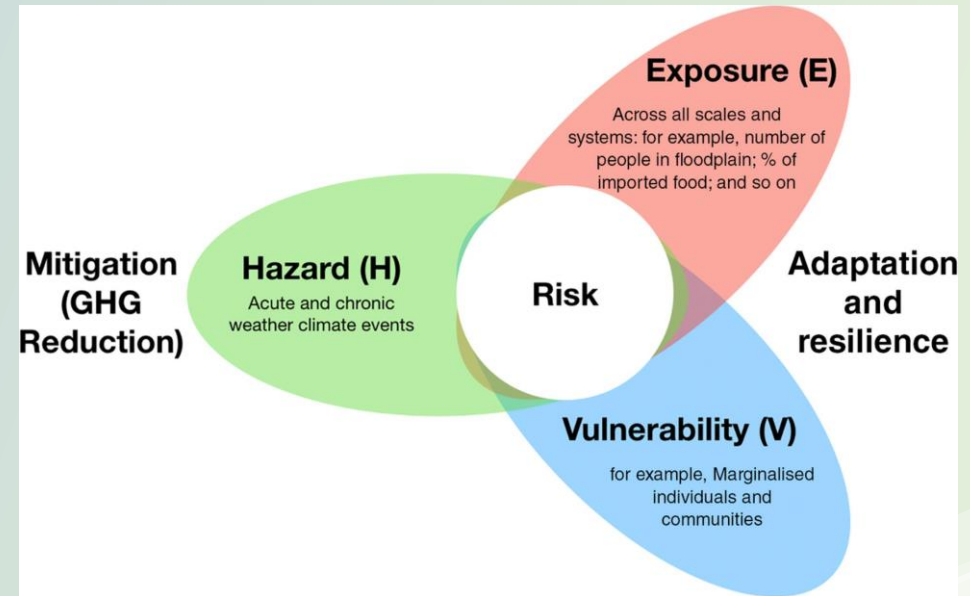
1. 서론

❖ 산사태 관련 용어

- 기후변화 리스크에서는 다양한 개념들이 활용되고 있음



Risk as a function of hazard, exposure and vulnerability
(IPCC, 2012 & 2014)



A conceptual representation climate risk as a function of hazard, exposure and vulnerability based upon the IPCC SREX definition of risk (Viner et al., 2020)

1. 서론

❖ 산사태 관련 용어

- 산사태와 관련된 용어는 다음과 같이 정의 및 활용되고 있음

용어	정의
Exposure	<ul style="list-style-type: none">• 산사태의 영향을 받을 수 있는 구역의 사람, 구조물, 재산, 시스템 또는 기타 요소의 존재
Vulnerability	<ul style="list-style-type: none">• 주어진 크기/강도의 산사태 발생에 노출된 주어진 요소 또는 요소 세트의 손실 정도• 0(손실 없음)에서 1(총 손실)까지의 척도로 표현
Susceptibility	<ul style="list-style-type: none">• 과거 산사태 지점 정보 기반의 미래 산사태 발생 가능성 예측 (정량, 정성)
Hazard	<ul style="list-style-type: none">• 산사태 발생 가능성 + 발생 시점 + 빈도(주기) + 토석류에 의한 피해 범위 예측• Susceptibility는 Hazard의 공간적 구성 요소에 해당
Risk	<ul style="list-style-type: none">• 건강, 재산 또는 환경에 대한 악영향의 확률과 심각도를 측정한 것• 위험은 산사태 사건의 확률에 결과를 곱한 것으로 정의됨• 예) 주어진 연도에 주어진 규모(강도)의 산사태가 발생했을 때의 대상지 내 예상 손실 발생 확률

1. 서론

❖ 연구 방법론 유형

- 산사태 분석을 위한 대표적인 방법론은 다음과 같이 분류할 수 있음

분류		세부 방법
평가지표		관련 지표의 선행연구, 전문가 델파이 조사에 따른 지표별 가중치 설정
공간분포모형 (SDM, Spatial Distribution Model)	통계기반모형 (Statistically based)	과거 발생지점-환경변수의 관계를 통계적으로 해석하여 발생확률 추정(회귀모형)
	기계학습모형 (Machine learning)	과거 발생지점-환경변수의 관계를 학습하여 발생확률 추정
물리모형		대상지의 환경조건에 따른 안전율(Safety factor) 계산

2. 산사태 연구 사례

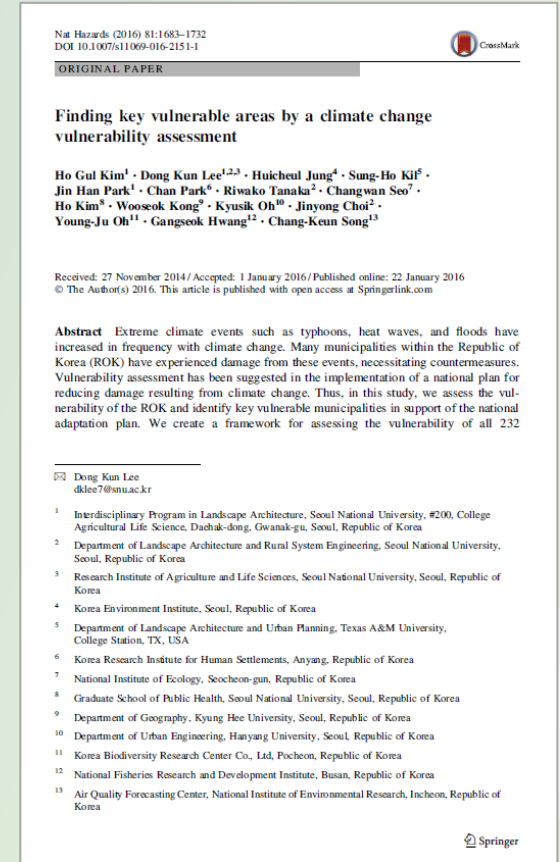
1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 서론

- 기후변화 영향에 대한 다양한 연구가 수행되고 있으나, 일반적으로 특정 분야에 집중된 연구를 수행
 - 산사태, 홍수 등
- 연구목적
 - 하나의 체계를 바탕으로 다양한 분야의 기후변화 취약성을 평가할 수 있는 방법론의 개발
 - 한국의 232개 시군구를 대상으로 기후변화 적응 예산의 투입이 시급한 지역 우선순위 파악
 - 평가지표 기반의 분석 기법 개발
 - 7개 분야에 대한 핵심 취약지역 분석



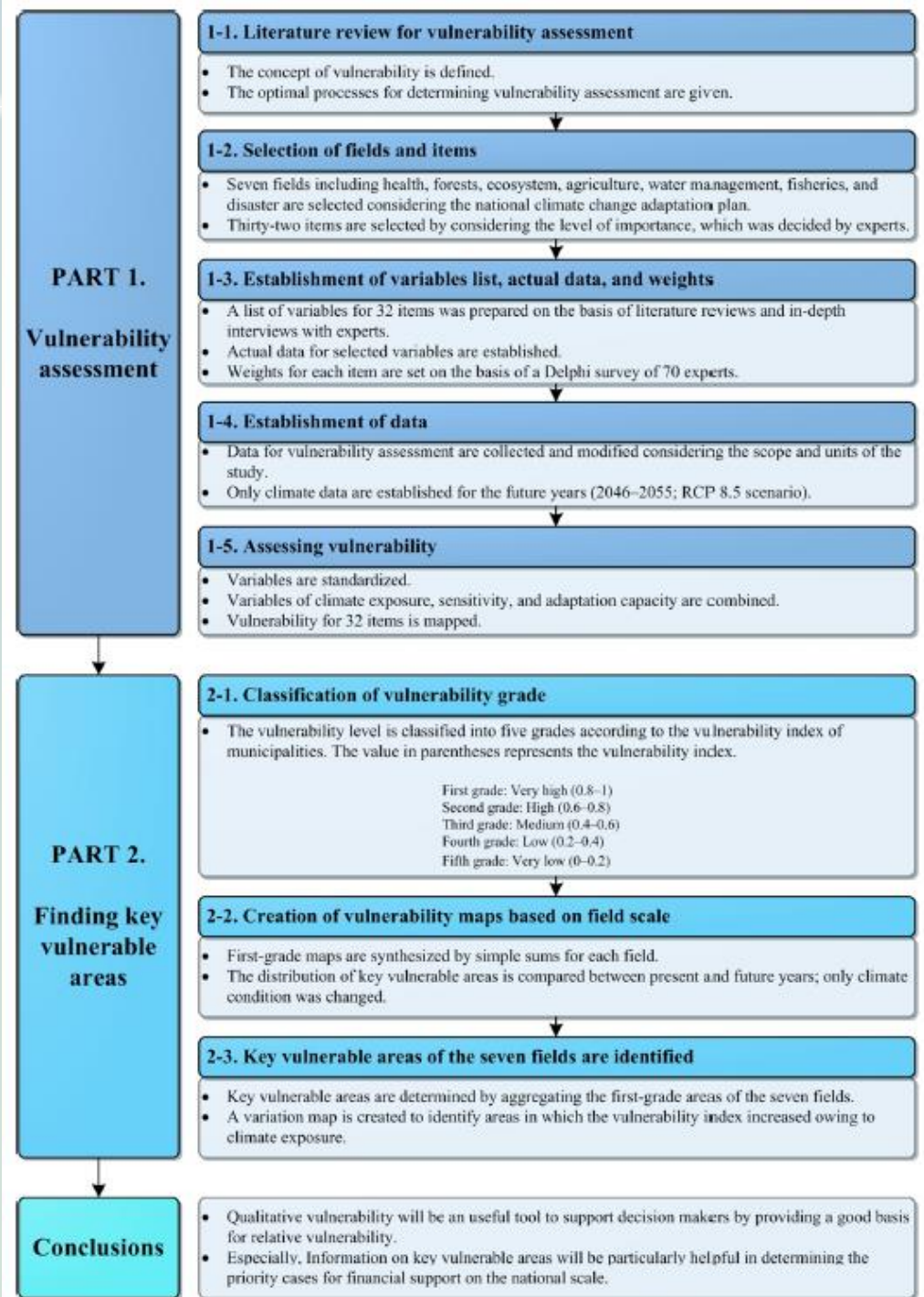
2016년 게재
(Natural hazards)

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구방법 : 흐름도

- 파트 1 : 취약성 평가
- 파트 2 : 핵심 취약 지역 탐색



2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구방법 : 평가분야 및 항목

- 7개 분야, 32개 항목
- 건강, 산림, 생태계, 농업, 수자원, 수산업, 재해
- 산림 분야 내에 “집중호우에 의한 산사태” 포함

Table 1 List of items considered for vulnerability assessment

No.	Field	No.	Item
1	Health	1	Health vulnerability due to floods
		2	Health vulnerability due to typhoons
		3	Health vulnerability due to heat waves
		4	Health vulnerability due to cold waves
		5	Health vulnerability due to ozone enhancement
		6	Health vulnerability due to fine dust
		7	Health vulnerability due to air pollutants
		8	Health vulnerability due to infectious diseases
		9	Health vulnerability by waterborne epidemics
2	Forests	10	Landslides due to heavy rainfall
		11	Vulnerability of trails due to landslides
		12	Vulnerability to forest fire
		13	Vulnerability of pine trees to disease and pests
		14	Vulnerability of pine trees to pine fungi
		15	Vulnerability of forest productivity
		16	Vulnerability of vegetation due to drought
		17	Vulnerability of vegetation growth
		18	Vulnerability of insects
3	Ecosystem	19	Vulnerability of management of protected areas
		20	Vulnerability of farmlands to erosion
		21	Vulnerability of cultivation facility
4	Agriculture	22	Vulnerability of productivity of rice crops
		23	Vulnerability of productivity of apple crops
		24	Vulnerability of productivity of livestock
		25	Vulnerability of flood regulation
5	Water management	26	Vulnerability of water utilization
		27	Vulnerability of water quality
		28	Vulnerability of fisheries due to change in water temperature
6	Fisheries	29	Vulnerability of infrastructure to floods
7	Disaster	30	Vulnerability of infrastructure to heat waves
		31	Vulnerability of infrastructure to heavy snow
		32	Vulnerability of infrastructure to sea level increase

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구방법 : 가중치 설정

- 각 분야 별 항목에 대해 전문가 델파이 조사를 실시하여 가중치 설정
- 기후노출, 민감도, 적응역량에 대한 가중치, 세부 변수에 대한 가중치로 구성

Table 2 Method of setting weights

Item	Variable	First weights	Sum of weights	Specific variable	Second weights	Sum of weights
Item A	Climate exposure	FWce	1	Variable a	SWa	1
				Variable b	SWb	
				Variable c	SWc	
				Variable d	SWd	
	Sensitivity	FWs		Variable e	SWe	1
				Variable f	SWf	
				Variable g	SWg	
				Variable h	SWh	
				Variable i	SWi	
	Adaptation capacity	FWac		Variable j	SWj	1
				Variable k	SWk	
				Variable l	SWl	

Table 3 Variables and weights for landslide vulnerability due to heavy rainfall

Item	Variable	First Weight	Specific variable	Second weight
Landslide due to heavy rainfall	Climate exposure	0.40	Number of dates with more than 80 mm of precipitation	0.24
			Daily maximum precipitation (mm)	0.39
			Summer daily precipitation (mm)	0.21
			Five days of maximum precipitation (mm)	0.16
	Sensitivity	0.37	Average slope of regional forest (°)	0.35
			Area of coniferous forest (ha)	0.24
			Average height of regional forest (m)	0.12
			Denuded area (ha)	0.29
			Government officials per population	0.20
			Area of preventing forest destruction (ha)	0.24
Adaptation capacity	0.23	GRDP (trillion won)	0.18	
		Financial independence (%)	0.38	

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구방법 : 취약성 지수 계산, 핵심 취약지역 분석

- 2차 가중치를 각 변수에 반영하고, 모든 변수를 더하고, 0~1의 값으로 표준화 함
- 1차 가중치를 표준화 된 값에 곱하여 최종 취약성 지수를 도출함

$$V = FW_{ce} \times CE_n + FW_n \times S_n - FW_{ac} \times AC_n \quad (2)$$

$$CE = \sum (SW_i \times Variable_i)$$

$$S = \sum (SW_i \times Variable_i) \quad (3)$$

$$AC = \sum (SW_i \times Variable_i)$$

- 32개 항목별 취약성 지도를 5등급으로 제작, 가장 취약한 1등급 지역(0.8~1)을 추출
- 추출된 1등급 지역들만 중첩하여 분야별 핵심 취약지도 제작

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구결과 : 취약성 평가 지도

- 집중호우에 의한 산사태 취약성 평가 결과
- 232개 시군구별 기후노출, 민감도, 적응능력, 취약성에 대한 지도

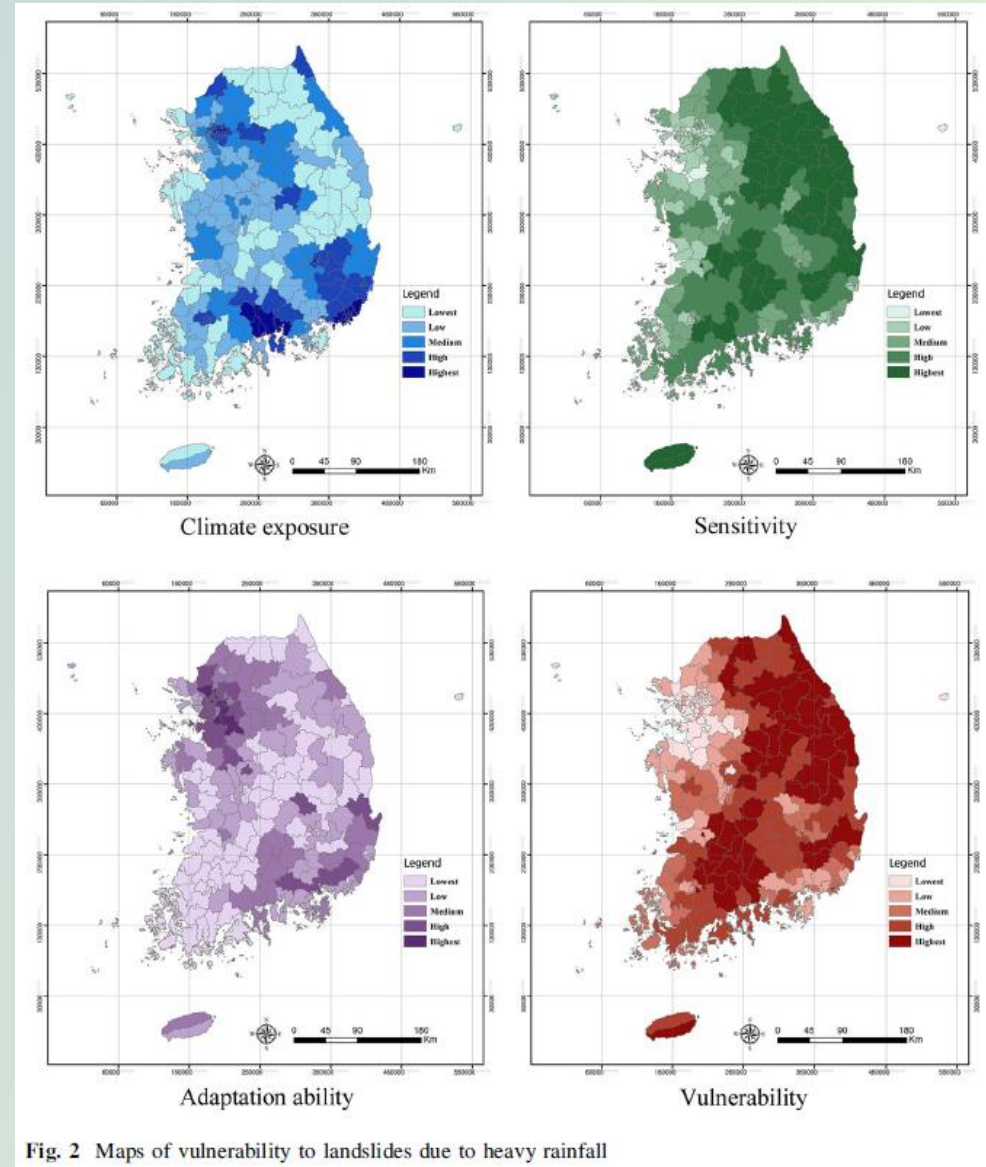
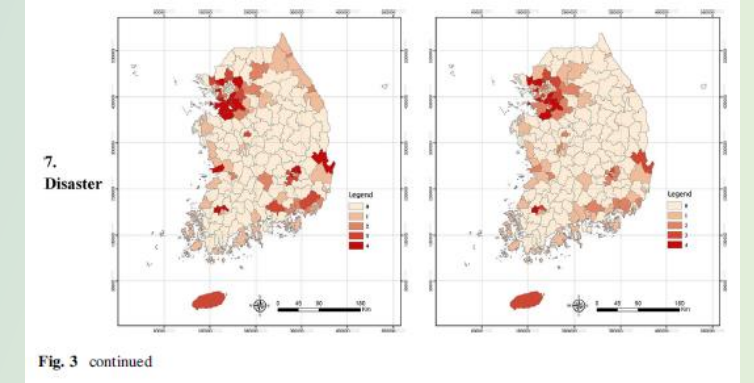
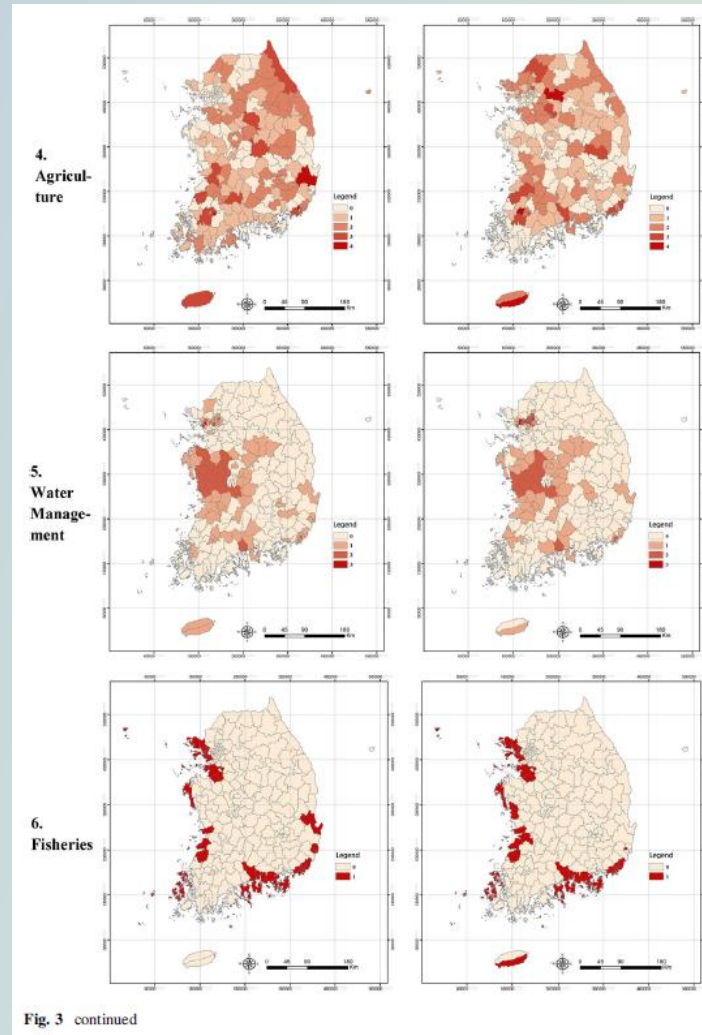
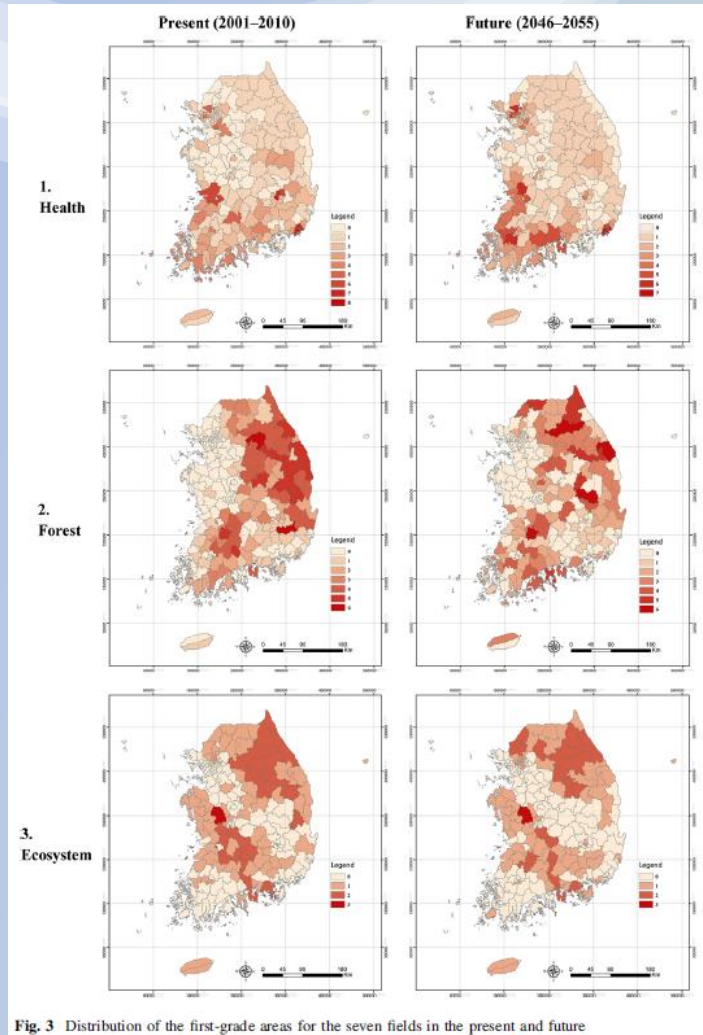


Fig. 2 Maps of vulnerability to landslides due to heavy rainfall

2. 산사태 연구 사례

1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

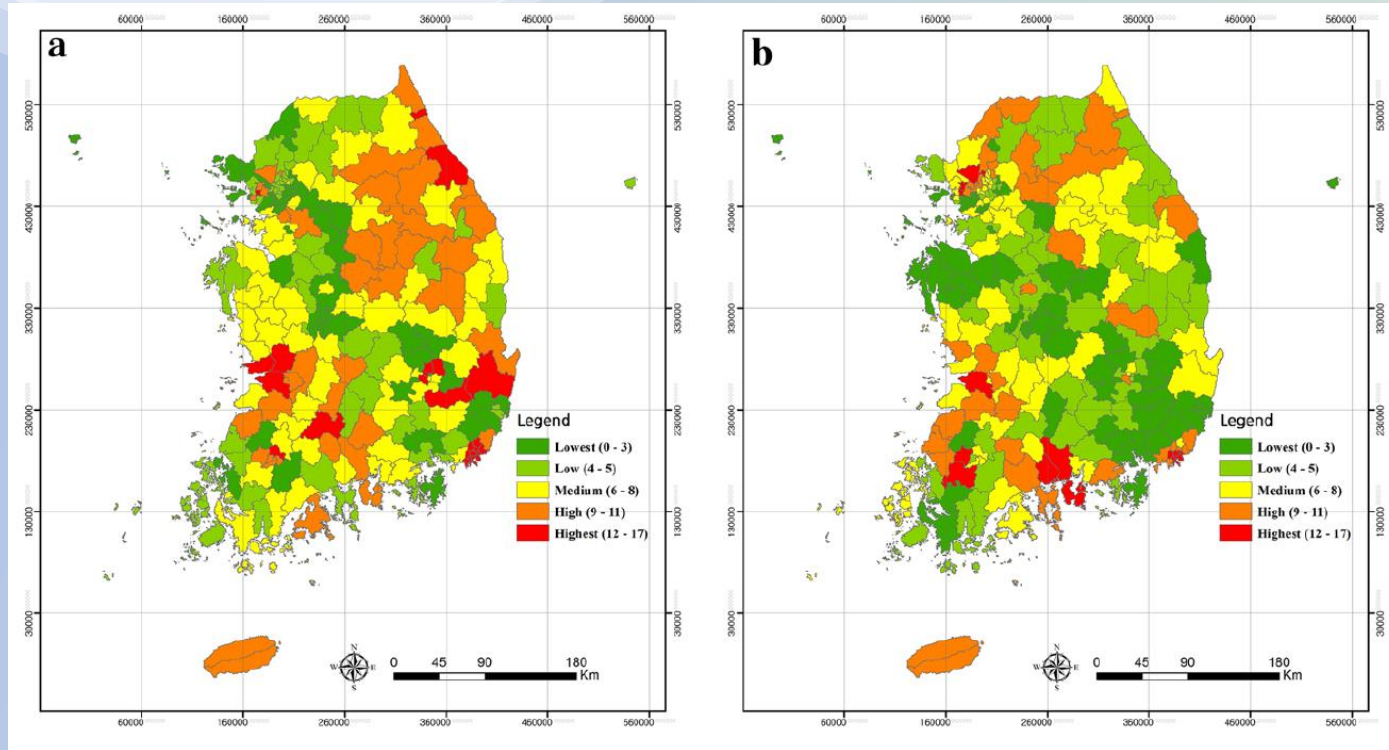
❖ 연구결과 : 7개 분야 핵심 취약지역



2. 산사태 연구 사례

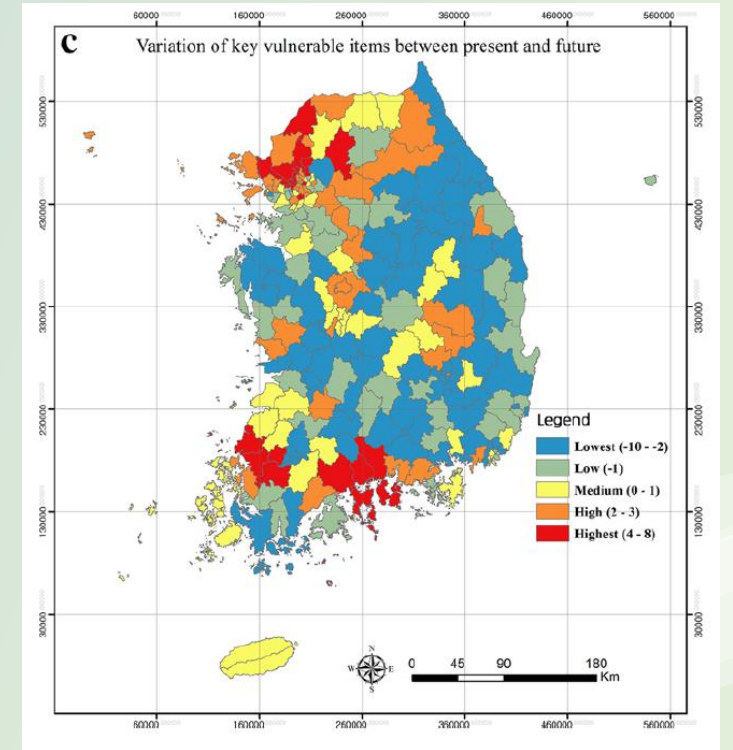
1) 평가지표 기반의 산사태 취약성 평가

❖ 연구결과 : 핵심 취약지역 종합



현재

미래
(RCP8.5, 2046-2055)



미래-현재 취약지역 변화

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 연구주제

- 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석 연구는 다양한 영역에서 활용되고 있음
- 2015~2018년 단일 모형을 이용한 분석에서 다중 모형을 활용하여 개별 모형의 불확실성을 보완하는 연구로 발전
- 2018년 산사태로 인한 피해비용 추정, 적응대책의 비용 대비 피해 감소 효과 분석 (비용/편익)
- 2021년 태양광 발전소의 산사태 민감성 분석

Environ Earth Sci (2015) 73:185–1400
DOI 10.1007/s12665-014-3775-7

ORIGINAL ARTICLE

Evaluating landslide hazards using RCP 4.5 and 8.5 scenarios

Ho Gul Kim · Dong Kun Lee · Chan Park · Sungjo Kil · Yonghoon Son · Jin Han Park

Received: 16 April 2014 / Accepted: 3 October 2014 / Published online: 19 October 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract Recently, extreme meteorological events have occurred frequently owing to climate change and its influence. Impacts of concentrated precipitation events include the damage caused by landslides. Many areas in Gangwon-do (Korea) are located at high elevation and have large elevation differences; these areas are thus at high risk of landslides. The purpose of this study was to evaluate the landslide hazard of the province using representative concentration pathways (RCP) scenarios 4.5 and 8.5 and to compare results. This study produced an optimal landslide model for the province through analysis of variables and points of landslide origin. Estimates indicate that the landslide hazard area will increase to 154 km². The RCP 8.5 scenario showed a larger (by about 59 km²) landslide hazard area than the RCP 4.5 scenario. The uncertainty of climate change scenarios was also explored using statistical values of each scenario period. An overlay analysis (overlay of landslide hazard areas and land cover map) showed that 40.6 % of farmlands would be susceptible to landslides in 2070–2099 (RCP 8.5). Additionally, damage to the alpine agriculture due to landslides was also identified as a critical area. In the RCP 8.5 scenario, the land-use types that occupy more than 20 % of the landslide hazard area are transportation, recreational facilities, and vine house for farming. This suggests that casualties from landslides will increase in future. It also highlights a lack of policies to manage development. Therefore, the local government of Gangwon-do should consider landslide hazard areas when planning future land uses.

Keywords Climate change scenario · Maximum entropy model · Landslide susceptibility map · Gangwon-do

Introduction

The Wisoseom area of Jeju Island recorded precipitation of 810 mm on May 27, 2013. This event constituted a record for single-day rainfall in May and is the second highest incidence of single-day rainfall on an annual basis, surpassed only by the 978.5 mm of precipitation received on August 18, 2004 (Korea Meteorological Administration 2013). This heavy rain caused large-scale and small-scale damage, including flooding of farmland and houses, the isolation of people owing to flooded valleys, and blocked roads. The significance of this rainfall event becomes evident when one considers that average annual rainfall in Korea is approximately 1,300 mm.

H. G. Kim · D. K. Lee · J. H. Park
Institute for Land-use and Environment, Seoul National University, Seoul, South Korea
e-mail: hkgil@plaza.snu.ac.kr

D. K. Lee
Research Institute of Agriculture Life Science, Seoul National University, Seoul, South Korea

J. H. Park (✉)
Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, CAS, Seoul National University, Seoul, South Korea
e-mail: ahlee7@snu.ac.kr

S. Kil
National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

C. Park
Department of Landscape Architecture and Urban Planning, College of Architecture, Texas A&M University, Texas, USA

Y. Son
Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, South Korea

Springer

2015년 게재 - 단일모형
(Environmental Earth
and Sciences)

Stochastic Environmental Research and Risk Assessment
http://dx.doi.org/10.1007/s10241-014-0494-9

ORIGINAL PAPER

Estimating landslide susceptibility areas considering the uncertainty inherent in modeling methods

Ho Gul Kim¹ · Dong Kun Lee^{2,3,4} · Chan Park⁵ · Yoonjung Ahn⁶ · Sung Ho Kil⁷ · Sunyoung Sump² · Gregory S. Blight⁸

© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2014

Abstract Landslides are one of the most dangerous types of natural disasters, and damage due to landslides has been increasing in certain regions of the world because of increased precipitation. Policy decision makers require reliable information that can be used to establish spatial adaptation plans to protect people from landslide hazards. Researchers previously identify areas susceptible to landslides using various spatial distribution models. However, such data are associated with a high amount of uncertainty. This study focuses on quantifying the uncertainty of several spatial distribution models and identifying the effectiveness of various ensemble methods that can be used to provide reliable information to support policy decisions. The area of study was Inje-gun, Republic of Korea. Ten models were selected to assess landslide susceptibility. Moreover, five ensemble methods were selected for the aggregated results of the 10 models. The uncertainty was quantified using the coefficient of variation and the uncertainty map we developed revealed areas with strongly different values among the models. A matrix map was created using an ensemble map and a coefficient of variation map. Using matrix analysis, we identified the areas that are most susceptible to landslides according to the ensemble model with a low uncertainty. Thus, the ensemble model can be a useful tool for supporting decision makers. The framework of this study can also be applied to support the establishment of landslide adaptation plans in other areas of the Republic of Korea and in other countries.

Keywords Spatial distribution model · Ensemble model · Coefficient of variation · Adaptation plans

1 Introduction

Extreme weather events, such as heavy rainfall, typhoons, heat waves, and cold waves, have increased because of climate change and have caused extensive damage in the Republic of Korea (ROK) (Boo et al. 2006; Sung et al. 2012). Landslides caused by heavy rainfall represent one of the worst types of disasters, and local governmental decision makers are attempting to establish disaster prevention zones in order to reduce landslide damage. These zones restrict construction activities in areas susceptible to landslides and specify safe separation distances for development (Choi et al. 2015). In addition, government officials of the ROK are attempting to implement climate adaptation plans that will prevent future losses of life and property from landslides.

Ho Gul Kim¹ · Dong Kun Lee^{2,3,4} · Chan Park⁵ · Yoonjung Ahn⁶ · Sung Ho Kil⁷ · Sunyoung Sump² · Gregory S. Blight⁸

¹ Department of Human Environmental Design, Major in Landscape Urban Planning, Cheongju University, Cheongju City 28503, Korea

² Research Institute of Agriculture Life Science, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

³ Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

⁴ Department of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul 02534, Korea; cheongul@plaza.snu.ac.kr

⁵ Correspondence: hkgil84@gmail.com (H.G.K.); dlee@snu.ac.kr (D.K.L.); Tel.: +82-43-228-8500 (H.G.K.); +82-2-480-4885 (D.K.L.)

Received: 15 April 2018; Accepted: 15 May 2018; Published: 18 May 2018

Abstract The amount of damage caused by landslides has increased due to climate change. Adaptation plans are required to help cope with landslides in order to reduce the extent of the damage. Landslide hazard analysis can help create adaptation plans. Analyzing the cost of damage of and the effect of adaptation to landslides is an effective way to support decision makers. The cost of damage is calculated using the costs of damage incurred in residential and transportation areas in the past, based on data from annual reports. Spatial distribution models are used to analyze landslide hazard areas in the present and the future. Future or potential landslide hazards are estimated by using climate change scenarios through representative concentration pathways. The effects of adaptation measures are assessed using modified variables and a cost-benefit analysis. The uncertainty of the cost of damage is considered using average, minimum, and maximum values. As a result, the methods used to estimate future costs of damage are developed, and the effects of adaptation are analyzed. The future cost of damage is calculated for every climate change scenario. The effect of adaptation are analyzed and areas with a reduced risk of landslides are identified, reducing the cost of damage and adaptation costs, as well as the costs and benefits of adaptation measures. Improving soil drainage is the most effective measure among the four measures analyzed. This study can help estimate future costs of damage and analyze the effect of adaptation in creating effective adaptation plans.

Keywords adaptation plans; effective decision making; shallow landslides; spatial distribution model; benefit and cost analysis for adaptation

¹ Department of Human Environmental Design, Major in Landscape Urban Planning, Cheongju University, Cheongju City 28503, Korea

² Research Institute of Agriculture Life Science, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

³ Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

⁴ Department of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul 02534, Korea; cheongul@plaza.snu.ac.kr

⁵ Correspondence: hkgil84@gmail.com (H.G.K.); dlee@snu.ac.kr (D.K.L.); Tel.: +82-43-228-8500 (H.G.K.); +82-2-480-4885 (D.K.L.)

Received: 15 April 2018; Accepted: 15 May 2018; Published: 18 May 2018

Springer

2018년 게재 - 다중모형
(Stochastic Environmental
Research and Risk Assessment)

sustainability

MDPI

Article
Assessing the Cost of Damage and Effect of Adaptation to Landslides Considering Climate Change

Ho Gul Kim¹ · Dong Kun Lee^{2,3,4} · Chan Park⁵

¹ Department of Human Environmental Design, Major in Landscape Urban Planning, Cheongju University, Cheongju City 28503, Korea

² Research Institute of Agriculture Life Science, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

³ Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul 08026, Korea

⁴ Department of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul 02534, Korea; cheongul@plaza.snu.ac.kr

⁵ Correspondence: hkgil84@gmail.com (H.G.K.); dlee@snu.ac.kr (D.K.L.); Tel.: +82-43-228-8500 (H.G.K.); +82-2-480-4885 (D.K.L.)

Received: 15 April 2018; Accepted: 15 May 2018; Published: 18 May 2018

Abstract The amount of damage caused by landslides has increased due to climate change. Adaptation plans are required to help cope with landslides in order to reduce the extent of the damage. Landslide hazard analysis can help create adaptation plans. Analyzing the cost of damage of and the effect of adaptation to landslides is an effective way to support decision makers. The cost of damage is calculated using the costs of damage incurred in residential and transportation areas in the past, based on data from annual reports. Spatial distribution models are used to analyze landslide hazard areas in the present and the future. Future or potential landslide hazards are estimated by using climate change scenarios through representative concentration pathways. The effects of adaptation measures are assessed using modified variables and a cost-benefit analysis. The uncertainty of the cost of damage is considered using average, minimum, and maximum values. As a result, the methods used to estimate future costs of damage are developed, and the effects of adaptation are analyzed. The future cost of damage is calculated for every climate change scenario. The effect of adaptation are analyzed and areas with a reduced risk of landslides are identified, reducing the cost of damage and adaptation costs, as well as the costs and benefits of adaptation measures. Improving soil drainage is the most effective measure among the four measures analyzed. This study can help estimate future costs of damage and analyze the effect of adaptation in creating effective adaptation plans.

Keywords adaptation plans; effective decision making; shallow landslides; spatial distribution model; benefit and cost analysis for adaptation

1. Introduction

Negative impacts of climate change have been on the rise [1]. The most common natural disaster in the Republic of Korea (ROK) is landslides [2]. ROK has suffered significant damage to human life, property and infrastructural facilities due to landslides [3]. Reducing the damaging impacts of landslides is one of the most important objectives of creating adaptation plans related to climate change. However, adaptation budgets are limited, and thus, effective adaptation plans should be established within limited means.

Analyzing landslide hazard areas is a good way to support the creation and implementation of adaptation measures. Several studies have focused on finding landslide hazard areas [4–6]. Those studies were largely centered around analyzing spatial information from areas vulnerable to

Springer

2018년 게재 - 비용편익
(Sustainability)

GEOMATICS, NATURAL HAZARDS AND RISK
2021, VOL. 12, NO. 1, 2128–2131
http://dx.doi.org/10.1007/s12574-021-19502-9

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

OPEN ACCESS Check for updates

Landslide susceptibility analysis of photovoltaic power stations in Gangwon-do, Republic of Korea

Ho Gul Kim¹ and Chae Yeon Park²

¹Department of Human Environmental Design, Cheongju University, Cheongju, Republic of Korea;
²Social Systems Division, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan

ABSTRACT In the Republic of Korea (ROK), photovoltaic power stations (PPSs) are typically installed in mountainous areas because of the low levelized cost of electricity values. However, intensified precipitation due to climate change has increased landslide occurrence, threatening PPSs installed in mountainous areas. Previous studies have focused on the possibility of landslide occurrence considering specific years, which could not generate general landslide susceptibility areas (LSAs). Therefore, this study aimed to analyze the general LSAs and compare it with PPS-installed areas to identify the potential landslide damages to the PPSs. Gangwon-do was selected as the study site and maximum entropy model was used to evaluate LSAs in multiple target years (2006, 2013, 2019, and 2020). The results showed that 3.2–10.0% of PPSs are located in LSAs during 2013–2020. Considering the government PPS installation regulations, 43% of installable areas were identified as LSAs, suggesting that new criteria are required for future PPS installation. We propose that PPS installation should be prohibited in very shallow soil, very deep soil area, areas with good drainage capacity, a slope between 10 and 30°, north aspect and coniferous forest area. Our results can help in improving the regulatory plans and prevent reckless development of PPSs in susceptible regions.

ARTICLE HISTORY
Received 18 March 2021
Accepted 26 June 2021

KEYWORDS
Shallow landslide; Maximum entropy model; solar power station; multi target year analysis; renewable energy

1. Introduction

Globally, efforts to mitigate climate change are intensifying, with many countries adopting the objective of attaining net-zero emissions (Darby and Gerretsen 2021). Consequently, research and investment in eco-friendly energy sources are increasing worldwide (Koutra et al. 2018; Harkouss et al. 2019; Kim et al. 2019). As the government of Republic of Korea (ROK) is implementing a policy of reducing nuclear power generation, photovoltaic power generation has expanded more rapidly in the last decade.

CONTACT Chae Yeon Park cheonyeon28@ni.ac.kr
© 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

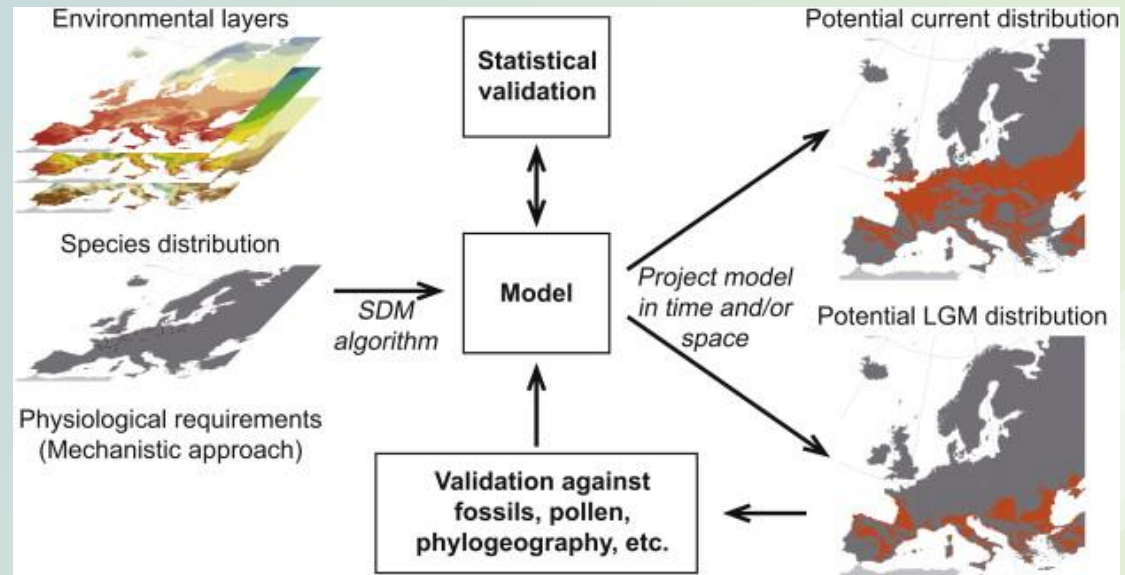
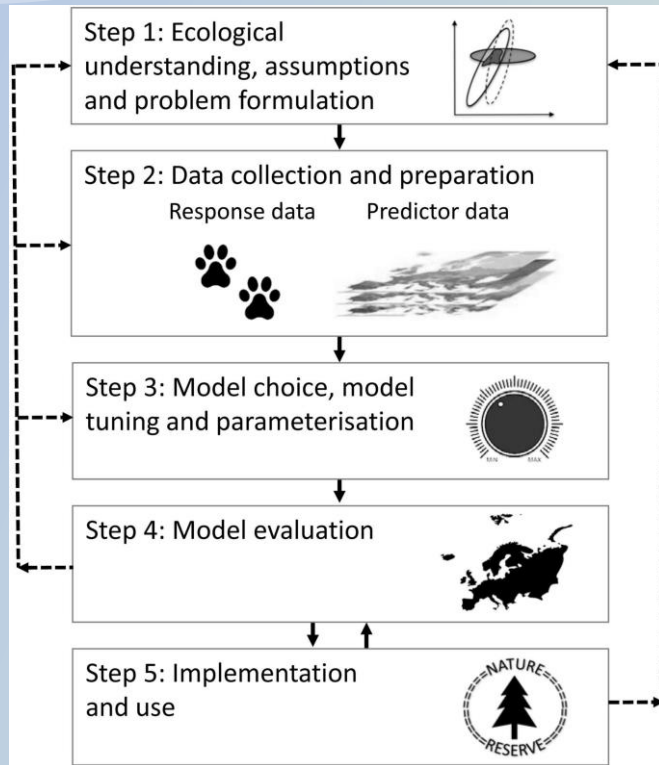
2021년 게재 - 태양광 발전소
(Geomatrics, Natural Hazards
and Risk)

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 연구주제

- 공간분포모형은 현상에 대한 이해를 바탕으로 조사 지점과 데이터와의 관계를 통계 혹은 기계학습 등을 통해 해석함
- 해석된 관계를 연구 대상지에 적용하여 현상을 예측함



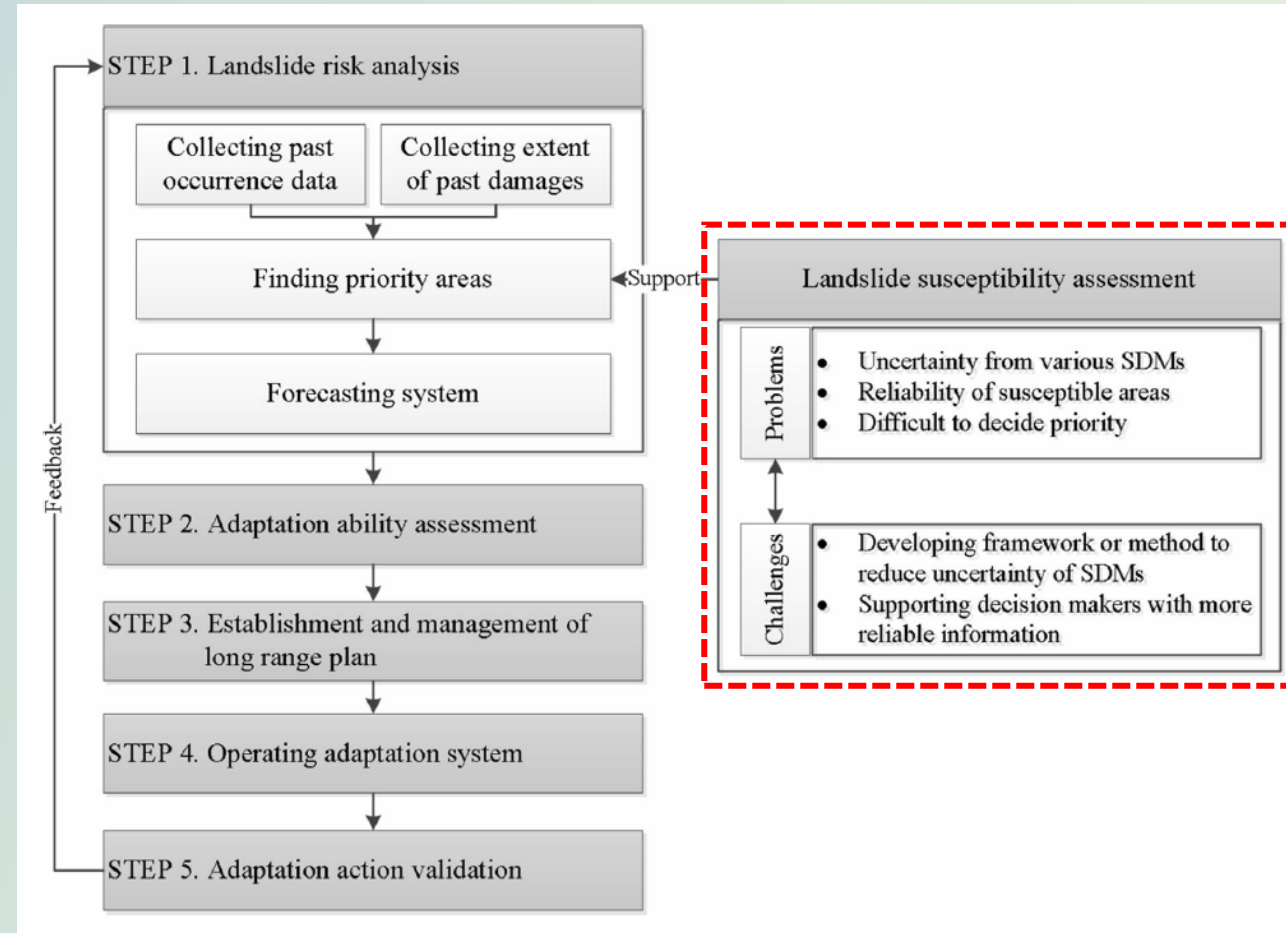
공간분포모형의 개념

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 - 배경

- 미래 예측/추정 연구의 이슈인 불확실성 문제
- 산사태에서는 개별 모형이 갖는 불확실성의 문제가 대두
- 다양한 모형을 활용하여 개별 모형의 과소/과대 추정 해결 노력

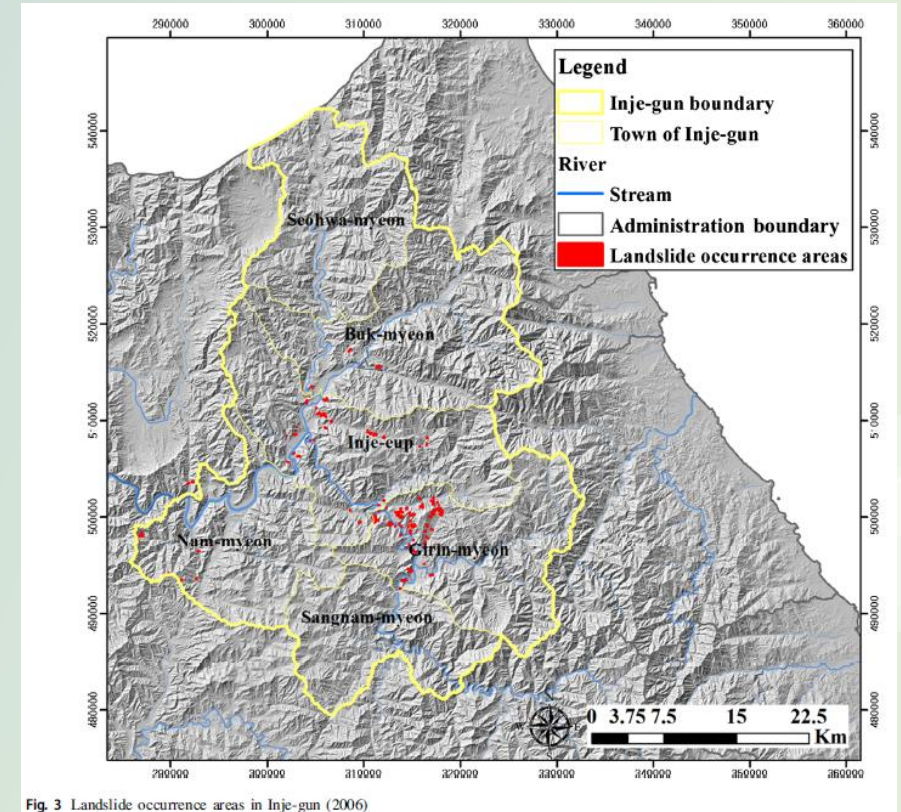
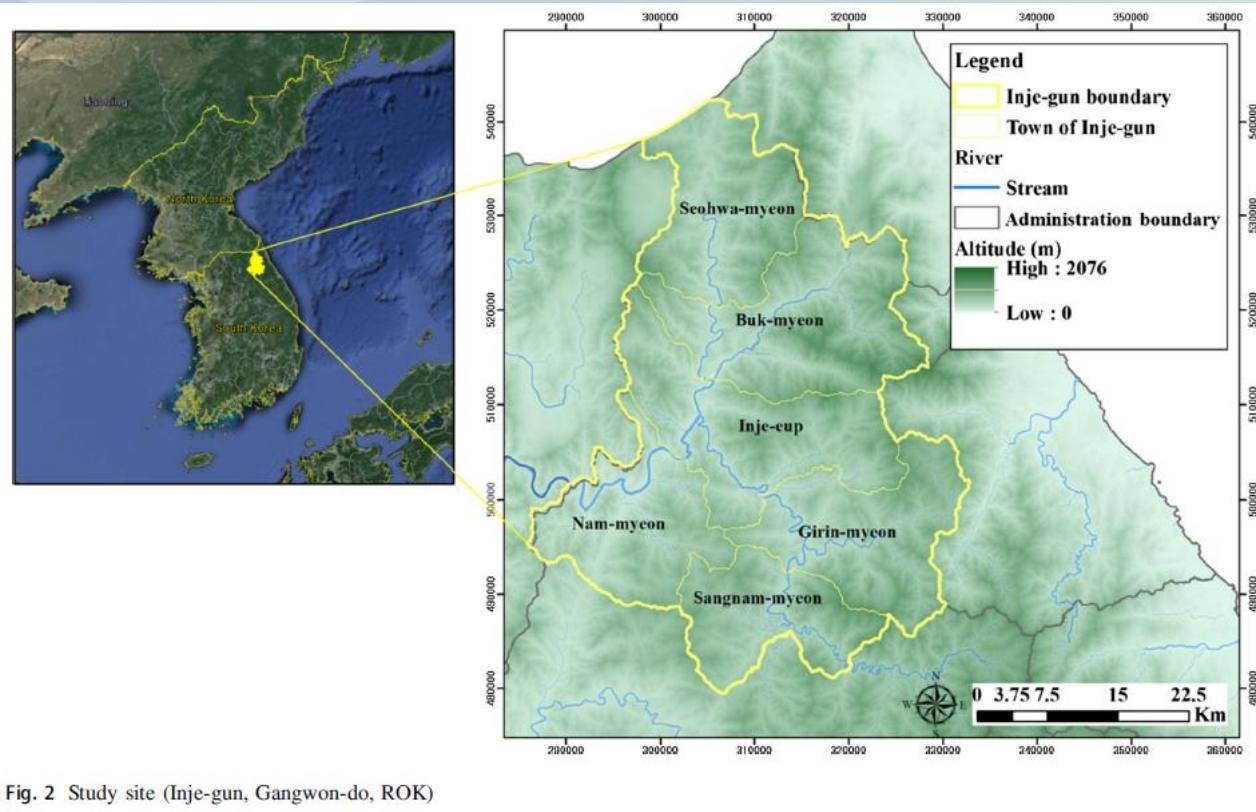


2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 – 연구 범위

- 2006년 산사태 피해가 심각했던 강원도 인제군을 대상지로 선정



2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 - 연구 흐름도

- 산사태 민감성 분석을 위해 10개의 공간분포모형 구동
- 환경변수 최적화 과정 (13개 > 10개)
- 10개 모형 종합을 위한 앙상블 기법 적용

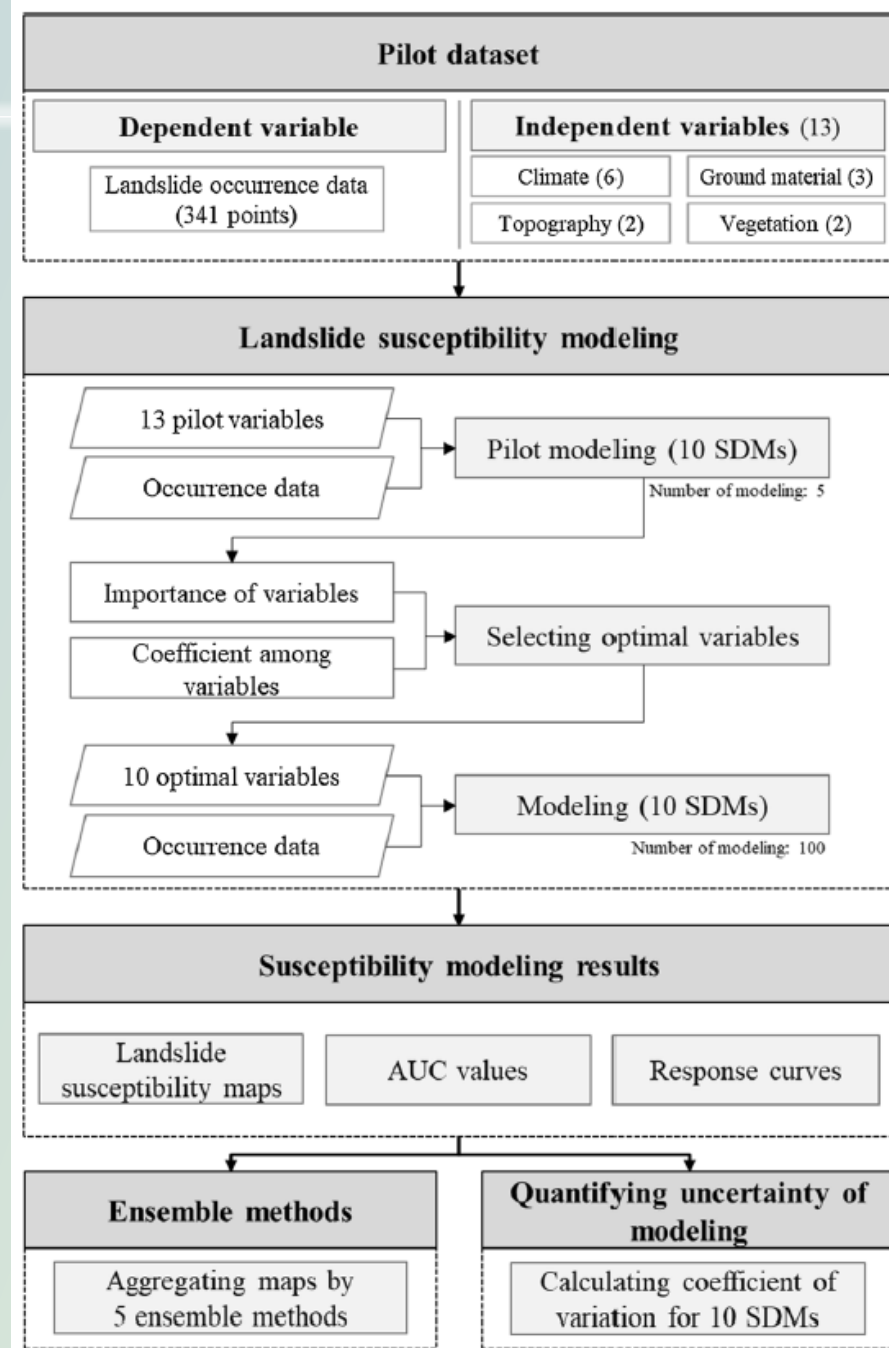


Fig. 4 Flowchart of modeling process

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 – 환경변수

- 기후, 지형, 지질, 식생에 관한 환경변수 적용
- 산사태를 유발하는 요인, 산사태에 민감한 요인이 포함

Table 1 Input variables for SDMs

Category	Variables	Code name	References	Data references
Climate factor	(1) Number of days with over 100 mm of rainfall	X011_100mm	Kim and Chae (2009), Choi et al. (2011) and Yoo et al. (2012)	Observation data (Korea Meteorological Administration 2011)
	(2) Number of days with over 120 mm of rainfall	X012_120mm		
	(3) 3 days of maximum rainfall (mm)	X021_3days		
	(4) 5 days of maximum rainfall (mm)	X022_5days		
	(5) Number of days with over 150 mm for 3 days of maximum rainfall	X060_3day		
	(6) Daily maximum rainfall (mm)	X070_dailymax		
Topography factor	(7) Slope (degrees)	slope	Ayalew and Yamagishi (2005, Ermini et al. (2005), Kim and Chae (2009), Oh (2010), Choi et al. (2011) and Yeon (2011)	Digital elevation model (DEM) (KME 2008)
	(8) Altitude (m)	altitude		
Ground material	(9) Soil depth	soildepth_km	Pradhan and Lee (2010), Oh (2010) and Yeon (2011)	Soil map (WAMIS 2006)
	(10) Soil drainage	soildrain_km		
	(11) Soil type	soiltype_km		
Vegetation factor	(12) Age of forest	ageclass	Yeon (2011) and Oh (2010)	Map of forest type (KME 2005)
	(13) Class of diameter at breast height	diamclass		

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 – 앙상블 기법

- 개별 모형을 종합하는 앙상블 기법에는 5가지 방법이 존재
- 단순 평균, 상위 신뢰구간, 중위값, 이항(0/1)지도의 평균, 신뢰도가 높은 모형에 가중치를 적용한 평균
- 이 중 가장 신뢰도가 높은 앙상블 기법의 결과를 최종 결과로 활용

Table 3 Ensemble methods to integrate results of SDMs Thuiller et al. (2015)

Abbreviation	Description
PM	Mean of probabilities. The PM ensemble model calculates the mean of probabilities for the selected models
PCI (upper and lower)	Confidence interval. The ensemble model for PCI is the confidence interval for the probability of the mean. This model is a good complement for the probability of means. Two ensemble models are constructed using this model: 1. The upper model (there is less than a $100 \times \text{PCI}/2\%$ chance to obtain probabilities higher than the ones given) 2. The lower model (there is less than a $100 \times \text{PCI}/2\%$ chance to obtain probabilities lower than the ones given)
PME	Median of probabilities. The PME ensemble model is the same as the probability of the median for the selected models. The median is better than the mean for assessing the impacts of outliers
CA	Models committee averaging. The CA ensemble model first transforms the probabilities of selected models into binary values by using the cutoff value of each model. After transformation, the model calculates the average of binary values
PMW	Weighted mean of probabilities. The PMW calculates the relative importance of the weights by using the proportion of evaluation scores. Therefore, the results of “good” models are discriminated from those of “bad” models

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 - 결과

- 개별 모형별 환경변수 기여도, 개별 모형의 신뢰도 도출
- 어떤 모형에서 어떤 변수가 기여도가 높은지, 어떤 모형이 신뢰도가 높은지 비교 검토

Table 4 Average importance of variables for 100 evaluations

Variables	Average of a hundred evaluations										
	MAX ENT	CTA	SRE	FDA	MARS	RF	GLM	GBM	GAM	ANN	
X012_120mm	0.198	0.159	0.021	0.155	0.175	0.065	0.197	0.043	0.184	0.103	
X022_5days	0.213	0.173	0.182	0.235	0.208	0.187	0.133	0.131	0.144	0.586	
X060_3day	0.167	0.316	0.163	0.049	0.056	0.266	0.064	0.063	0.064	0.360	
X070_dailymax	0.500	0.516	0.231	0.645	0.590	0.434	0.644	0.450	0.631	0.366	
ageclass	0.038	0.026	0.036	0.001	0.005	0.023	0.008	0.002	0.029	0.027	
altitude	0.345	0.450	0.330	0.411	0.401	0.279	0.401	0.403	0.354	0.417	
slope	0.088	0.023	0.064	0.001	0.001	0.011	0.002	0.002	0.004	0.036	
soildepth_km	0.055	0.002	0.147	0.001	0.002	0.006	0.005	0.002	0.059	0.005	
soildrain_km	0.001	0.002	0.103	0.001	0.003	0.002	0.003	0.000	0.039	0.007	
soiltype_km	0.034	0.002	0.139	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.013	0.010	

Table 5 Results of the evaluation of the landslide models

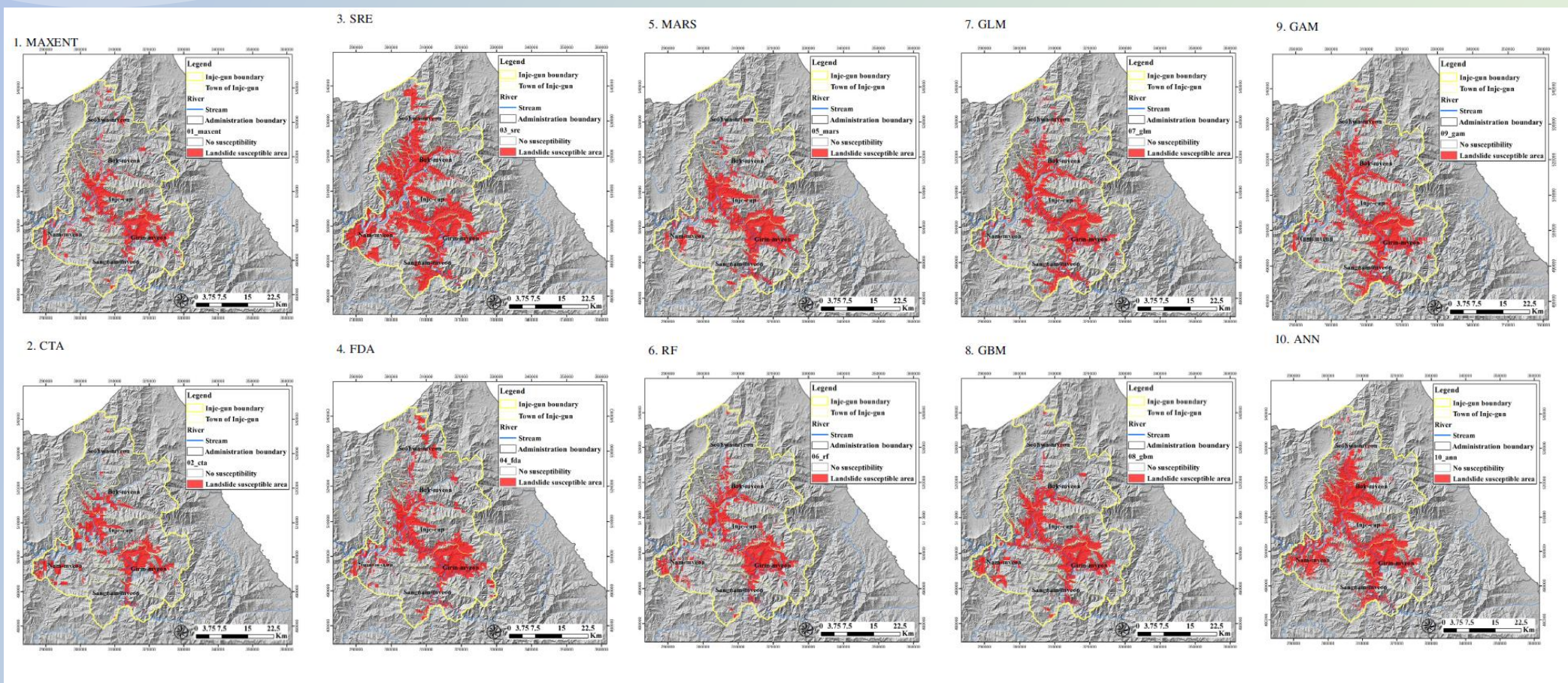
Model	AUC value (average of 100 run)	Rank
MAXENT	0.861	9
CTA	0.925	6
SRE	0.812	10
FDA	0.929	4
MARS	0.930	3
RF	0.979	1
GLM	0.922	7
GBM	0.959	2
GAM	0.926	5
ANN	0.908	8

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 - 결과

- 개별 모형의 산사태 민감 지도
- 서로 다른 민감지역 분포 확인 가능



2. 산사태 연구 사례

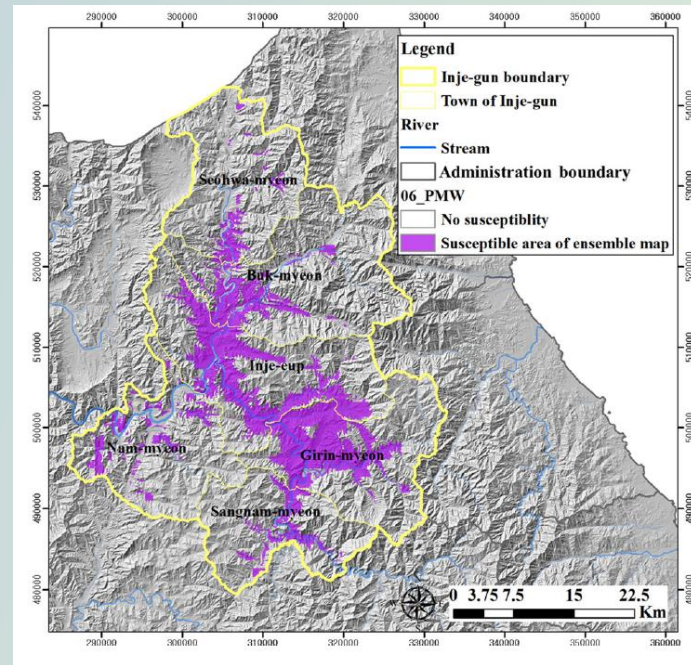
2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 다중 공간분포모형 적용 사례 - 결과

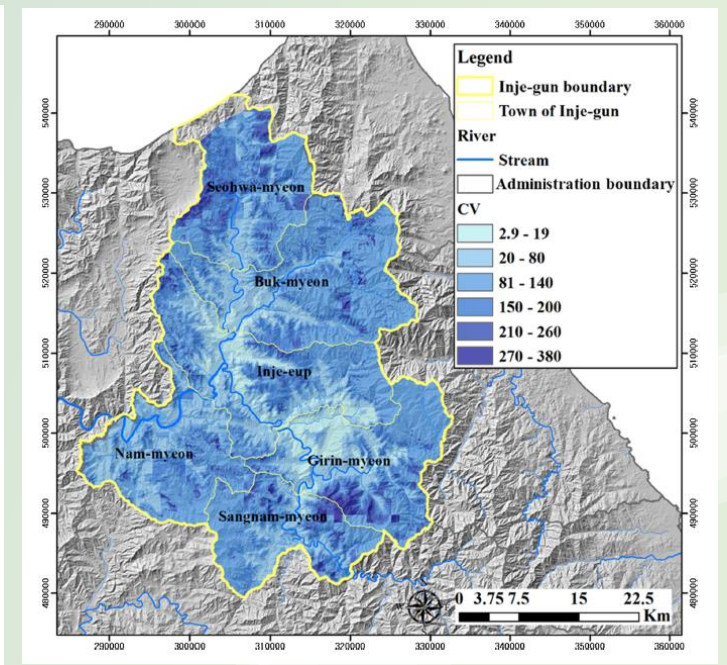
- 앙상블 기법을 통한 개별 모형 결과 종합
- 가중 평균 기반의 분석결과가 가장 높은 신뢰도
- 불확실성 지도(공분산)를 통해서 불확실성이 높은 지역 확인 가능

Table 6 Results of the evaluation of the ensemble models

Abbreviation	Cutoff	Sensitivity	Specificity	AUC	Rank
PM	568.500	93.200	96.149	0.986	2
PCI (lower model)	463.500	93.600	95.764	0.985	3
PCI (upper model)	668.000	93.200	96.021	0.986	2
PME	708.000	92.400	96.277	0.982	4
CA	470.000	95.600	92.426	0.985	3
PMW	546.000	94.400	96.149	0.988	1



가중 평균 기반 산사태 민감 지도



불확실성 지도

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 - 연구 흐름도

- 비용 : 산사태 피해비용 분석, 적응대책 비용 분석
- 편익 : 적응대책 적용 시 피해 저감비용(편익) 분석, 적응대책 별 비용-편익 분석

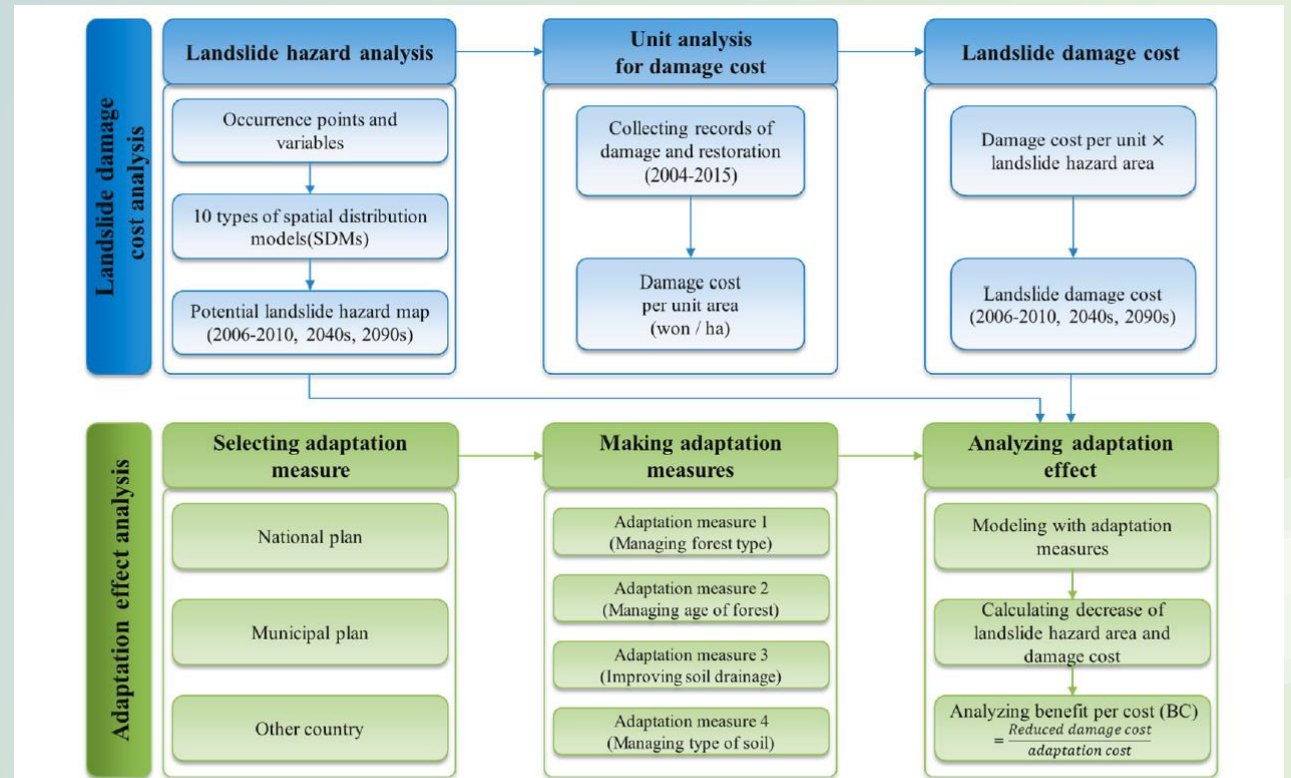


Figure 1. Framework for assessing landslide hazard, damage cost, and adaptation effect and benefit per cost.

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 미래 산사태 민감지역 분석 결과

- 10개 공간분포모형을 종합한 앙상블 모형을 이용하여 민감지역 분석
- 현재 모형을 기준으로 기후변화 시나리오를 반영하여 미래 민감 지역 예측
- RCP 8.5 기준 2090년대에는 현재(2001-2010) 대비 217%까지 증가

Table 6. Future landslide hazard areas.

Target Year	Landslide Hazard Area (ha)	Area Ratio Comparing Present Hazard Area (%)
Present (2001-2010)	1,334,600	-
RCP 2.6	2040s	13.14%
	2090s	32.95%
RCP 4.5	2040s	55.79%
	2090s	123.88%
RCP 6.0	2040s	41.29%
	2090s	144.42%
RCP 8.5	2040s	19.14%
	2090s	217.42%

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 피해비용 추정 근거

- 현재(2001~2010) 시기 피해비용 분석 및 검증
- 과거 18년(1997년~2014년) 간 재해연보에 기록된 산사태로 인한 1ha당 피해 처리 및 복구 비용을 기준으로 최소값, 평균값, 최대값을 분석에 적용(2010년을 기준으로 환산)
- 재해연보에 따르면, 산사태 발생지역 1ha당 최소 9,000만원, 평균 1억6,900만원, 최대 4억8,300만원까지 피해비용 발생

Table 7. Cost of damage per unit area [3].

Year	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Cost of damage per 1 ha (million won)	161	90	117	127	202	133	200	483	209
Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cost of damage per 1 ha (million won)	193	210	166	247	154	176	193	186	198

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 피해비용 추정 방법 신뢰성 검토

- 2001~2010년 간 실제 발생한 피해비용 평균값(1,312억원)과 비교 결과, 18년 간 평균값을 바탕으로 피해비용을 추정한 경우에 실제와 가장 유사한 비용(1,208억원)을 보임
- 산사태 모형을 기반으로 한 피해비용 분석결과가 실제보다 약 7.93% 적게 추정하고 있음(어느정도 신뢰성 확보)

Table 8. Estimated cost of damage by using landslide hazard model and past cost of damage per unit.

(Unit: Million Won)			
Target Year	Estimated landslide Cost of Damage		
	Minimum (90.75 Million Won per 1 ha)	Average (169 Million Won per 1 ha)	Maximum (483.78 Million Won per 1 ha)
2001-2010	64,886	120,878	345,903

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 미래 산사태 피해비용 추정

- 4개 시나리오, 2개 목표연도(2040년대, 2090년대)에 대하여 산사태 민감 지역 면적 도출
 - 시나리오별 민감 지역 면적에 피해비용 최소, 평균, 최대값을 곱하여 피해비용 추정
 - 가장 신뢰도가 높은 것은 평균값을 기준으로 추정한 결과(빨간 테두리)이며, 피해비용 추정 결과는 다음과 같음
- ✓ 현재(2001~2010) : 1,208억원
 - ✓ 2040년대 : 최소 233억원~최대 1,735억원
 - ✓ 2090년대 : 최소 1,001억원~최대 5,215억원

Table 10. Estimation of future landslide cost of damage.

(Unit: Million Won)			
Target Year	Cost of Damage		
	Minimum (90.75 Million Won per 1 ha)	Average (169 Million Won per 1 ha)	Maximum (483.78 Million Won per 1 ha)
Present	64,886	120,878	345,903
RCP 2.6			
2040s	12,514	23,312	66,710
2090s	53,763	100,156	286,605
RCP 4.5			
2040s	93,158	173,546	496,617
2090s	219,223	408,395	1,168,657
RCP 6.0			
2040s	82,498	153,688	439,791
2090s	218,759	407,531	1,166,186
RCP 8.5			
2040s	21,320	39,717	113,654
2090s	279,938	521,502	1,492,323

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 적응대책 유형 설정, 효과 분석

- 적응대책 유형 4가지 선정

- ✓ 산림 유형(수종) 관리 – 산사태에 덜 민감한 수종으로 관리
- ✓ 임령 관리 – 산사태 확률이 낮은 임령으로 관리
- ✓ 토양 배수 조건 개선 – 산사태에 덜 민감한 배수조건으로 개선
- ✓ 토양 유형 관리 – 산사태에 덜 민감한 토양 유형으로 관리

- 적응대책 적용 효과 분석 결과

- ✓ 각 시나리오에 적응대책 4가지를 적용하여 산사태 민감지역 면적의 감소량 추정
- ✓ 적응대책이 없는 경우에 대비하여, 산사태 민감지역 면적 감소 효과가 높은 적응대책의 순서는 “산림유형관리(1) – 토양유형관리(4) – 임령관리(2) – 토양배수조건개선(3)”으로 나타남

Table 11. Results of adaptation effect analysis.

Target Year	Adaptation Measure																	
	No Measure	1		2		3		4										
	Hazard Area (ha)	Hazard Area (ha)	Ratio Compare to No Measure	Hazard Area (ha)	Ratio Compare to No Measure	hazard Area (ha)	Ratio Compare to No Measure	Hazard Area (ha)	Ratio Compare to No Measure									
RCP 2.6	2040s 175,400	2090s 439,700	118,500	320,600	67.56%	72.91%	139,400	357,500	79.48%	81.31%	154,400	383,100	88.03%	87.13%	133,100	343,400	75.88%	78.10%
RCP 4.5	2040s 744,600	2090s 1,653,300	501,100	1,236,500	67.30%	74.79%	568,600	1,366,500	76.36%	82.65%	622,800	1,449,900	83.64%	87.70%	545,000	1,333,000	73.19%	80.63%
RCP 6.0	2040s 551,100	2090s 1,927,400	429,300	1,613,500	77.90%	83.71%	463,600	1,711,000	84.12%	88.77%	478,500	1,746,600	86.83%	90.62%	447,500	1,657,700	81.20%	86.01%
RCP 8.5	2040s 255,400	2090s 2,901,700	191,100	2,300,800	74.82%	79.29%	208,500	2,466,900	81.64%	85.02%	227,600	2,547,200	89.12%	87.78%	204,600	2,394,700	80.11%	82.53%
Total reduced area (ha)	-	-	1,937,200	-	-	-	1,366,600	-	-	-	1,038,500	-	-	1,589,600	-	-	-	-
Average reduced ratio	-	-	-	-	74.79%	-	-	-	82.42%	-	-	-	87.61%	-	-	-	-	79.71%

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 적응대책의 피해비용 감소 효과, 적응 비용

- 적응대책 적용에 따른 피해비용 감소 효과 분석 결과
 - ✓ 적응대책에 따라서 감소된 산사태 민감지역을 기준으로 피해비용 추정
 - ✓ 적응대책별로 감소된 산사태 피해비용이 도출됨

- 적응비용
 - ✓ 복구사업에 관련된 국내 자료를 바탕으로 적응대책 수행 시 1ha당 소요되는 비용을 추정
 - ✓ 피해비용과 마찬가지로 최소, 평균, 최대값으로 추정

Table 12. Reduced cost of damage by adaptation measures.

Target Year		(Unit: Million Won)				
		Adaptation Measure				
		No Measure	1	2	3	4
RCP 2.6	2040s	23,312	14,678	18,132	19,859	17,268
	2090s	100,156	76,844	86,341	91,522	75,980
RCP 4.5	2040s	173,546	116,561	125,195	133,829	113,971
	2090s	408,395	281,473	311,692	309,102	296,151
RCP 6.0	2040s	153,688	120,878	128,649	126,058	115,697
	2090s	407,531	315,146	339,322	325,507	307,375
RCP 8.5	2040s	39,717	26,766	30,219	31,083	29,356
	2090s	521,502	379,039	417,029	412,712	391,126

Table 13. Estimated adaptation cost for adaptation measures.

(Unit: Million Won/ha)			
Adaptation Measure	Minimum	Average	Maximum
1 (Managing forest type)	416,069	456,464	513,017
2 (Managing age of forest)	452,994	496,974	558,546
3 (Improving soil drainage)	3,641,040	5,461,560	7,282,080
4 (Managing type of soil)	777,828	875,057	972,285

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 피해비용, 적응대책 비용편익 분석 사례 – 적응대책별 비용편익 분석 결과

- 비용 : 적응대책에 소요되는 비용
- 편익 : 적응대책 적용 시 감소되는 피해비용
- 비용대비 편익(B/C)이 높은 순서는 “산림유형관리(1)-임령관리(2)-토양유형관리(4)-토양배수조건개선(3)”으로 나타남
- 단순한 산사태 민감지역 면적 감소 순서는 “산림유형관리(1)-토양유형관리(4)-임령관리(2)-토양배수조건개선(3)”이었지만, 비용 대비 편익을 고려한 경우 순서가 달라짐
- 최종적으로, 산림유형관리(1), 임령관리(2)가 비용 대비 효과가 좋은 적응대책으로 파악됨

Table 15. BC based on average of adaptation cost.

Target Year	Adaptation Measure				
	1	2	3	4	
RCP 2.6	2040s	0.19	0.10	0.01	0.07
	2090s	0.51	0.28	0.02	0.28
RCP 4.5	2040s	1.25	0.97	0.07	0.68
	2090s	2.78	1.95	0.18	1.28
RCP 6.0	2040s	0.72	0.50	0.05	0.43
	2090s	2.02	1.37	0.15	1.14
RCP 8.5	2040s	0.28	0.19	0.02	0.12
	2090s	3.12	2.10	0.20	1.49
Average		1.36	0.93	0.09	0.69

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 태양광 발전소 설치 수량은 급증하고 있음
- 2018년까지 누적 발전소 수량보다 최근 3년간 설치 수량이 더 많은 상황

구분	(단위: 개소)				발전소 개소 (2021년까지 누적)
	~2018년 설치발전소	2019년 설치발전소	2020년 설치발전소	2021년 설치발전소	
서울특별시	319	74	53	59	505
부산광역시	239	94	102	92	527
대구광역시	210	177	157	204	748
인천광역시	298	165	118	61	642
광주광역시	676	240	198	221	1,335
대전광역시	200	71	77	85	433
울산광역시	114	71	95	88	368
세종특별자치시	150	81	57	56	344
경기도	2,845	1,867	1,728	1,786	8,226
강원도	2,369	1,348	1,601	1,645	6,963
충청북도	2,194	1,621	2,039	1,848	7,702
충청남도	4,054	2,577	3,520	3,995	14,146
전라북도	9,206	3,896	5,876	5,172	24,150
전라남도	6,221	2,421	3,843	3,286	15,771
경상북도	3,597	2,197	3,058	4,968	13,820
경상남도	2,208	1,452	1,565	1,704	6,929
제주특별자치도	608	260	304	362	1,534
합계	35,508	18,612	24,391	25,632	104,143

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 주로 산지에 설치되는 우리나라 태양광 발전소의 특성상, 산사태에 취약할 수 밖에 없는 상황



(철원=뉴스1) 김정호 기자 = 지난달 31일부터 5일까지 계속되고 있는 집중호우로 무너져 내린 강원 철원 갈말읍의 태양광 시설.(철원군 제공) 2020.8.5/뉴스1



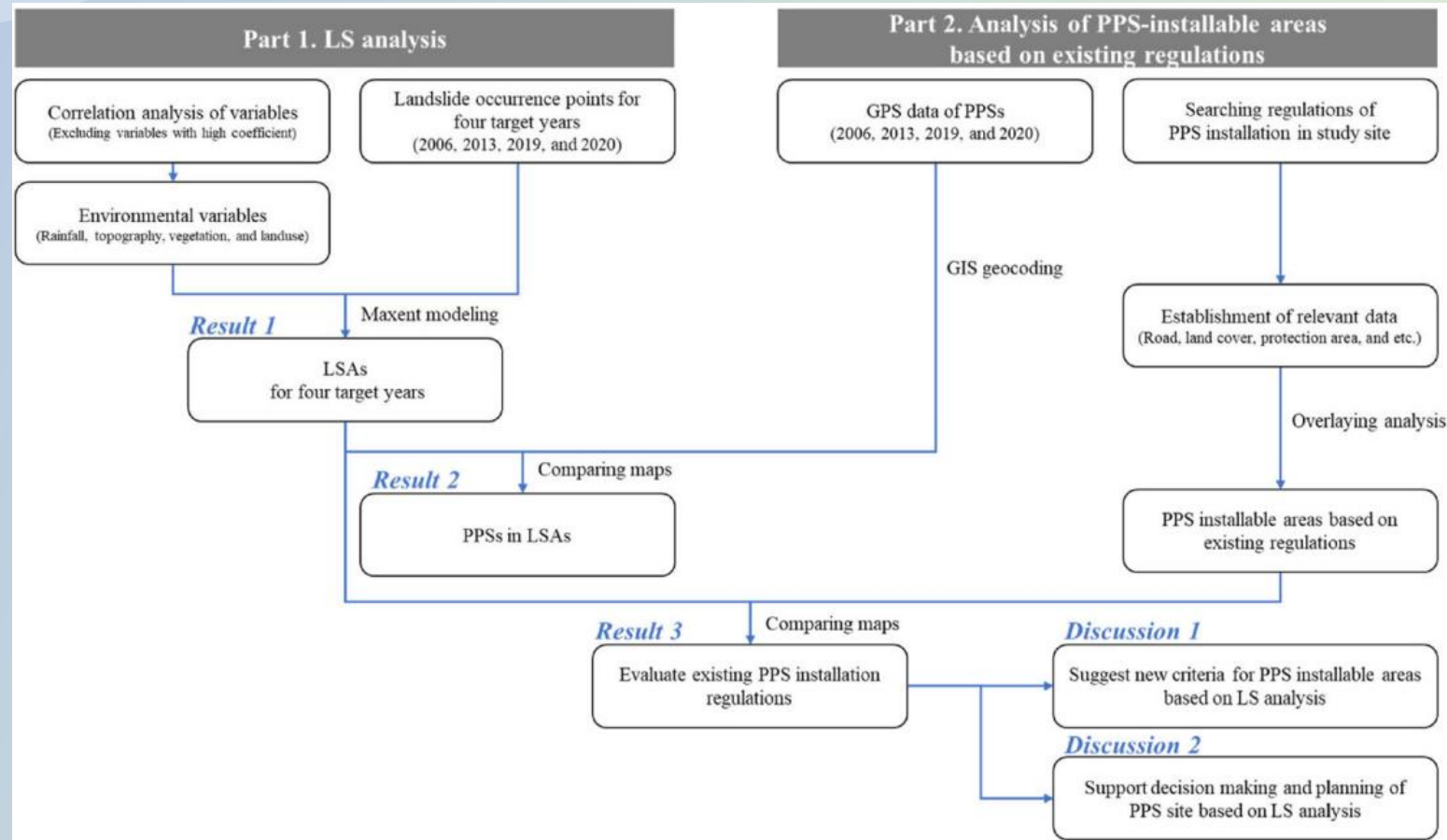
지난해 8월 발생한 충북 제천시 대량동 태양광 설비가 산사태 사고.(사진=연합)

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 연구 흐름도

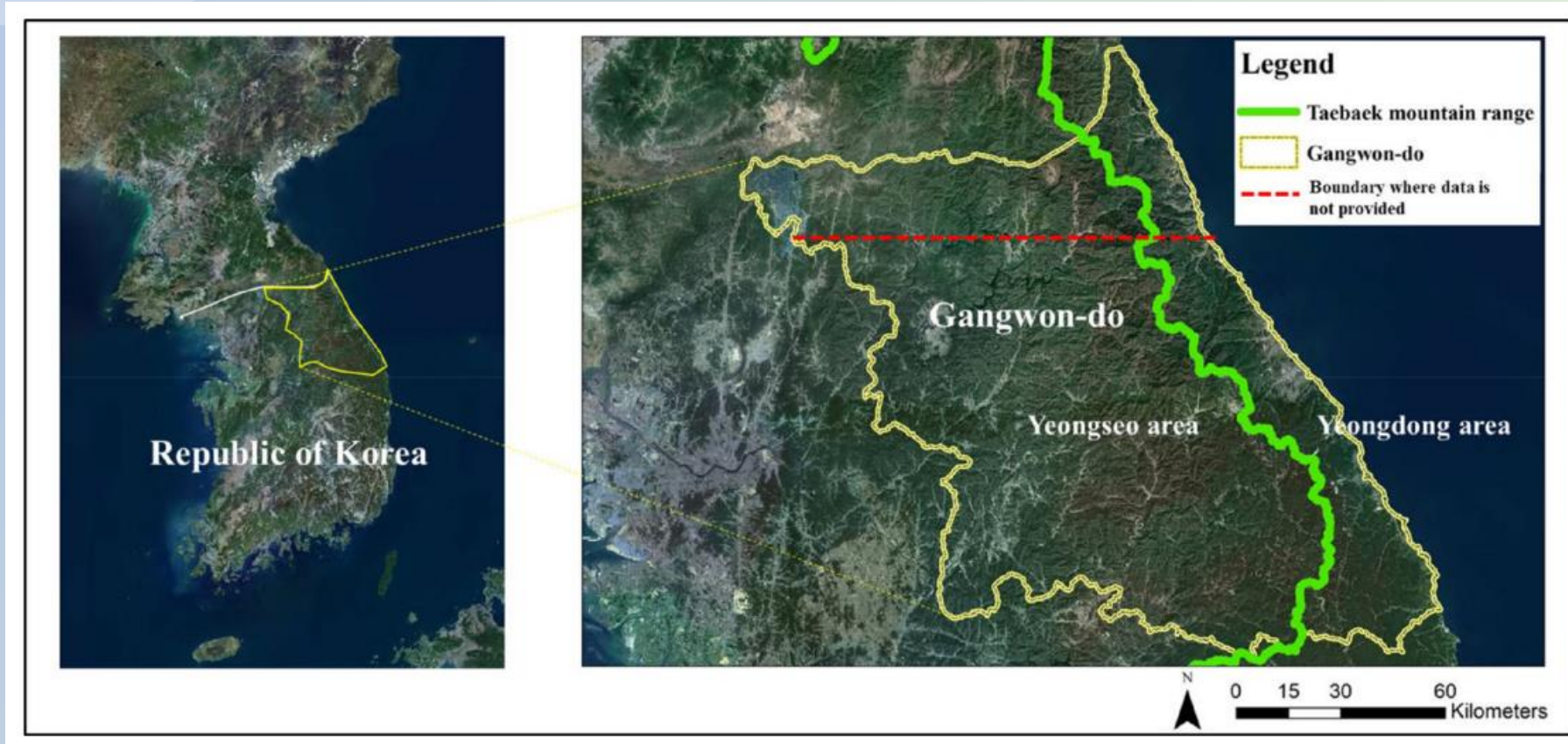


2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 대상지는 산사태 발생이 잦고, 태양광 발전소의 수도 많은 것으로 확인된 강원도로 설정

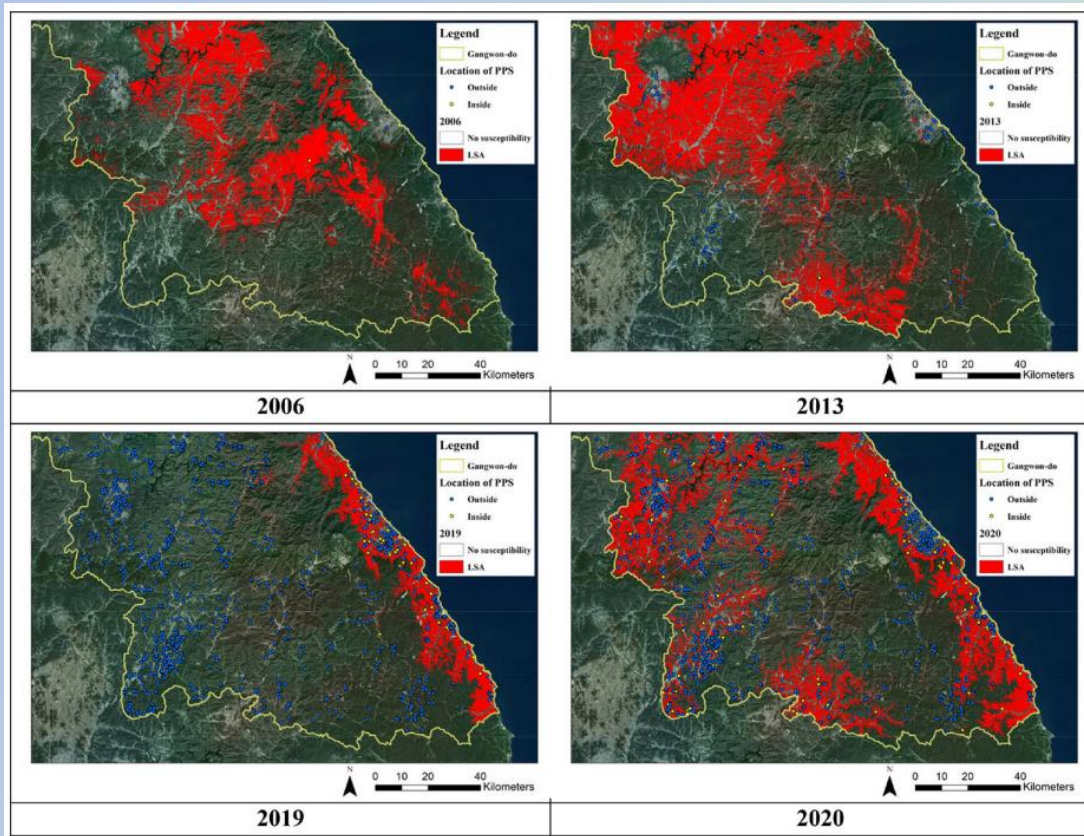


2. 산사태 연구 사례

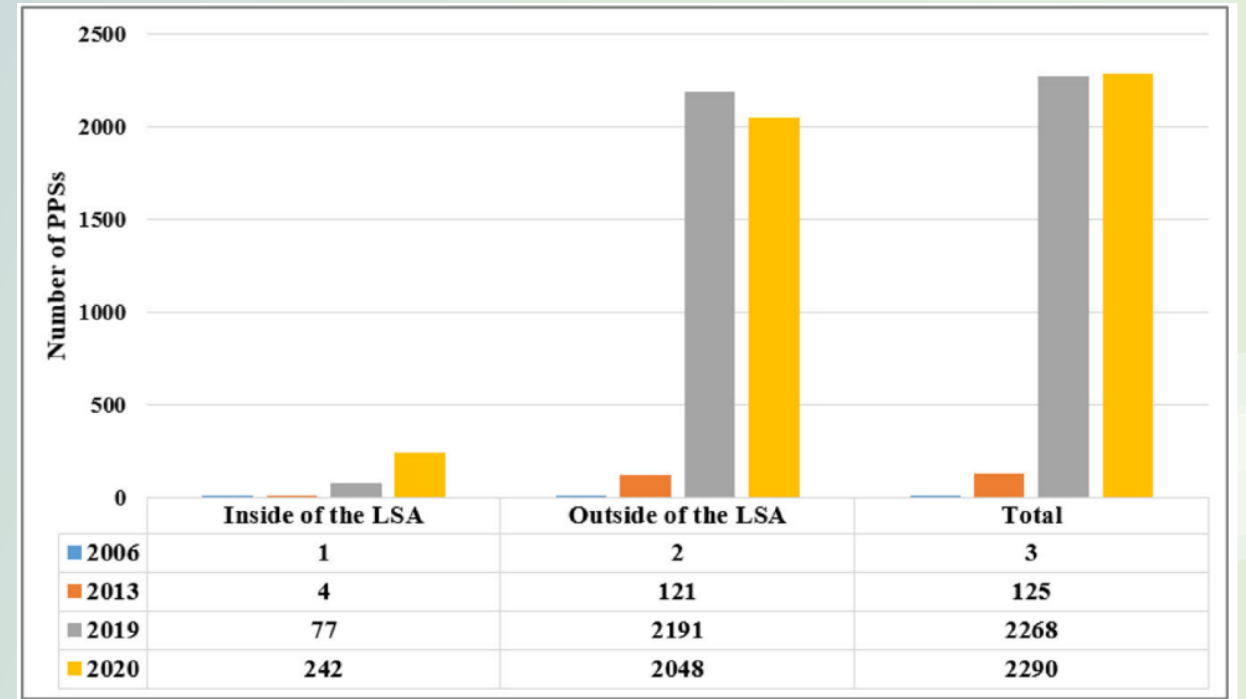
2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 4개 시기의 산사태 민감성 평가 수행 후 태양광 발전소 위치와 겹치는 개소 파악
- 산사태 민감지역 내 태양광 발전소의 수가 시간의 흐름에 따라서 증가하는 경향



시기별 산사태 민감지역과 태양광 발전소 위치



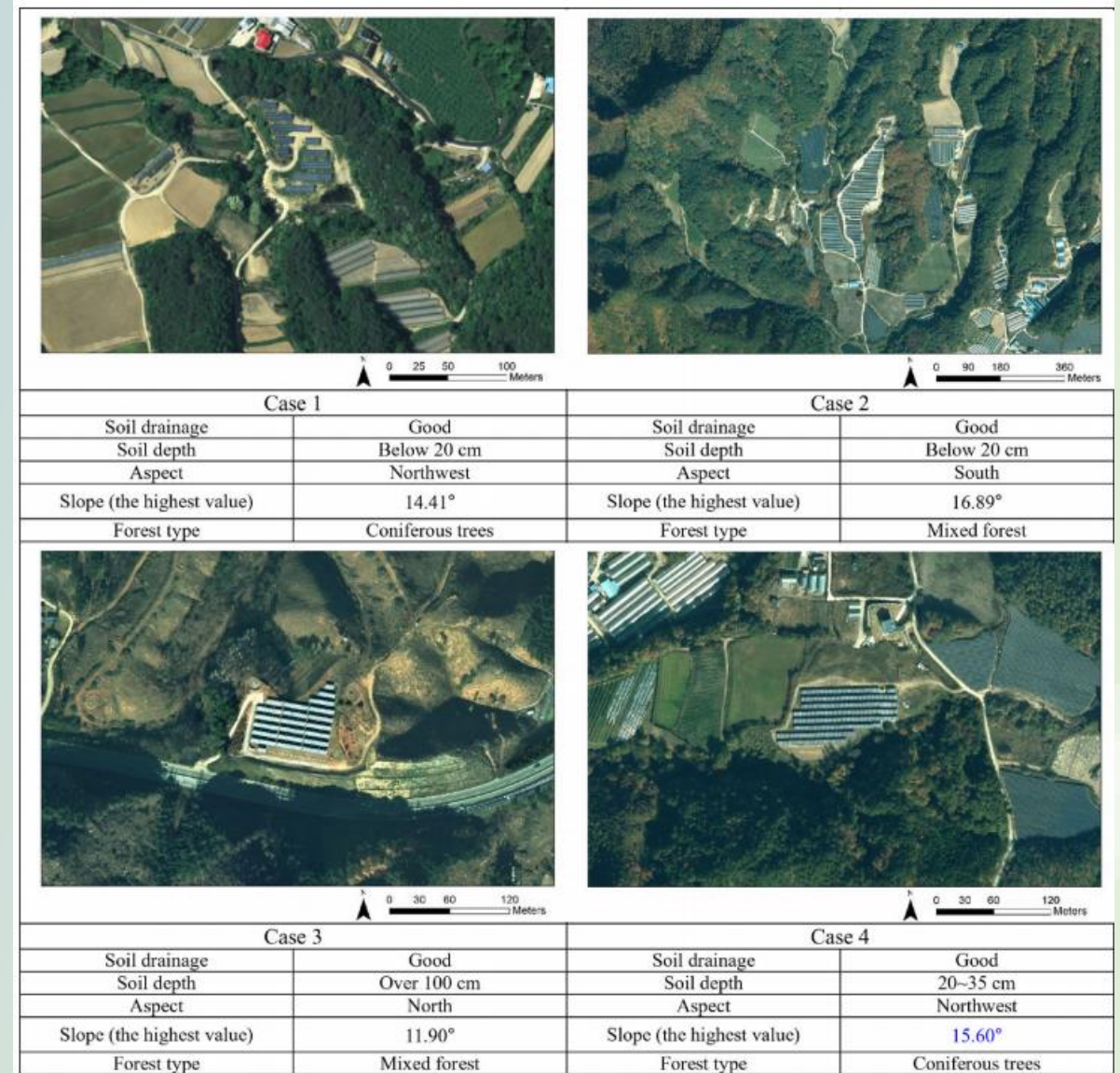
시기별 산사태 민감지역 내/외의 태양광 발전소의 수

2. 산사태 연구 사례

2) 공간분포모형 기반의 산사태 민감성 분석

❖ 태양광 발전소의 산사태 민감성 평가 사례

- 민감지역 내에 위치하는 태양광 발전소를 찾아 특성 파악
- 산사태에 민감한 것으로 파악되는 환경변수 특성을 갖는 지역들이 다수 존재
- 산사태 민감지역의 특성을 고려하여 태양광 발전소 위치 선정, 사전 위험성 평가 기준 개선 등의 고려 필요



2. 산사태 연구 사례

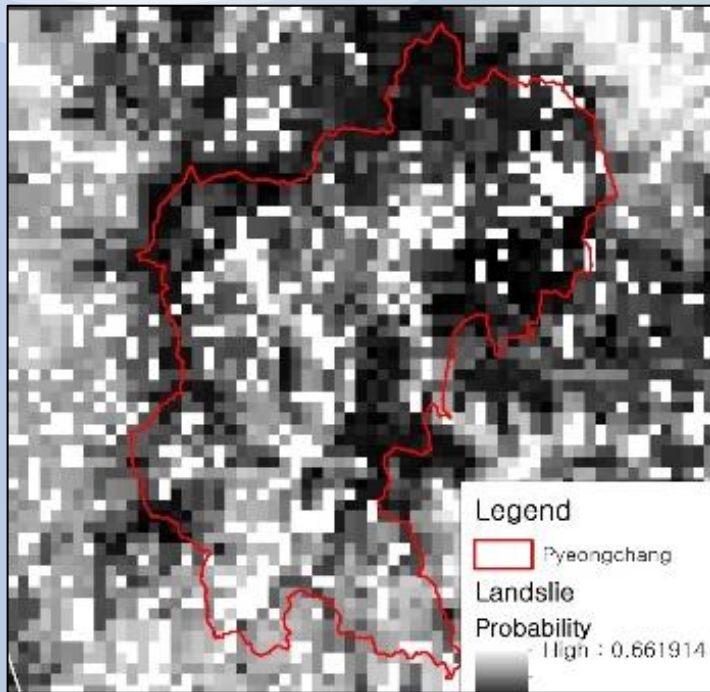
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

2. 산사태 연구 사례

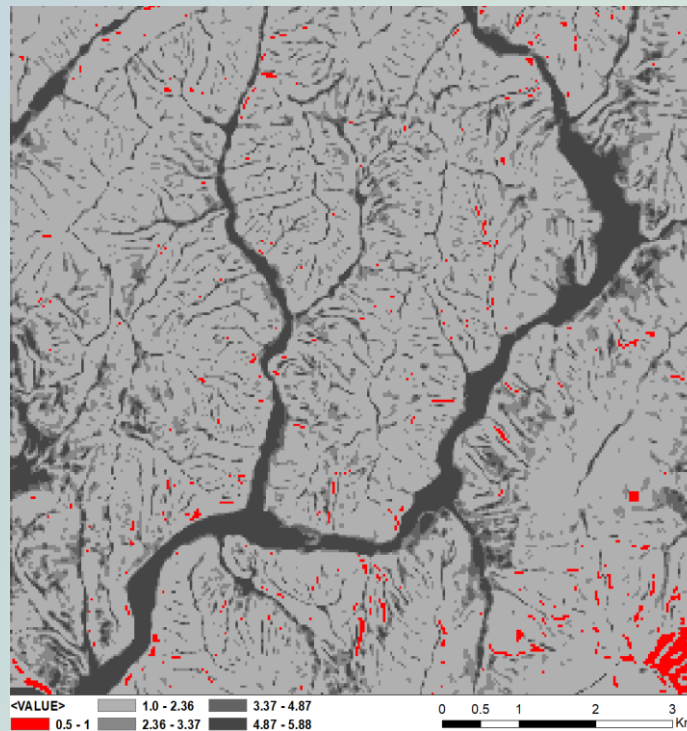
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 연구방법

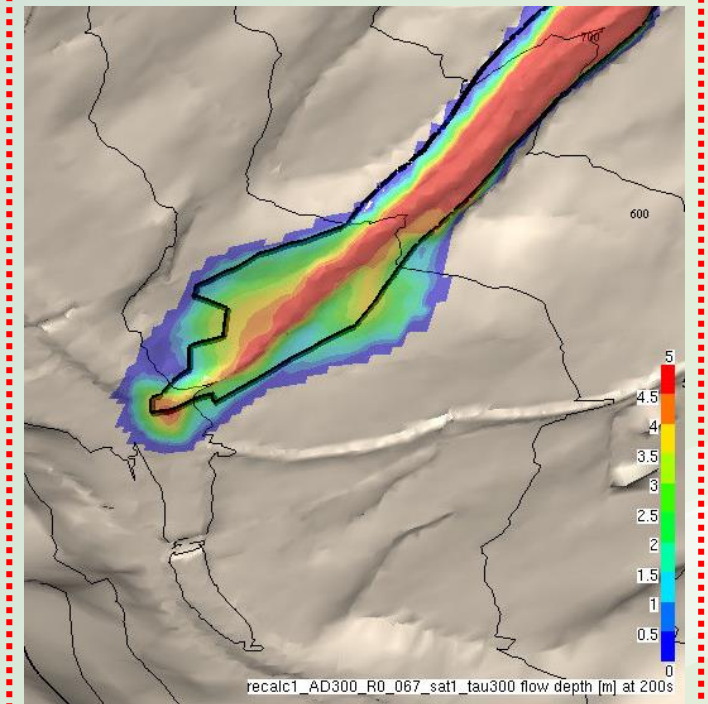
- 공간분포모형과 물리모형의 산사태 흐름을 결합하여 피해범위 분석



공간분포모형 기반의
산사태 발생확률 예측
Ex) Maxent, Markov-chain, Basian etc



물리식 기반의 발생가능성 예측
Ex) TRIGRS, IHG etc



Granig et al., 2009

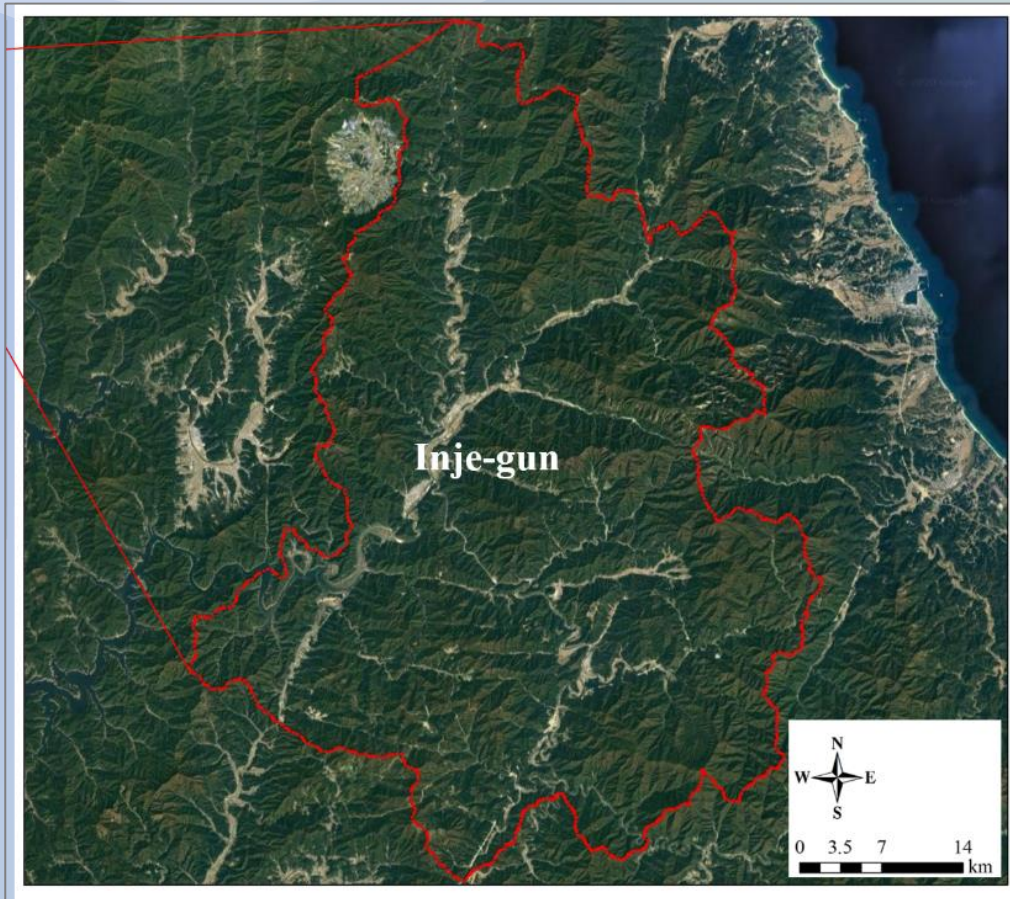
물리식 기반의 산사태 흐름 예측
Ex) LAHAZRZ, SamosAT, Flo-2D

2. 산사태 연구 사례

3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 연구범위

- 강원도 인제군을 대상으로 현재~미래 시기의 산사태 피해범위 분석

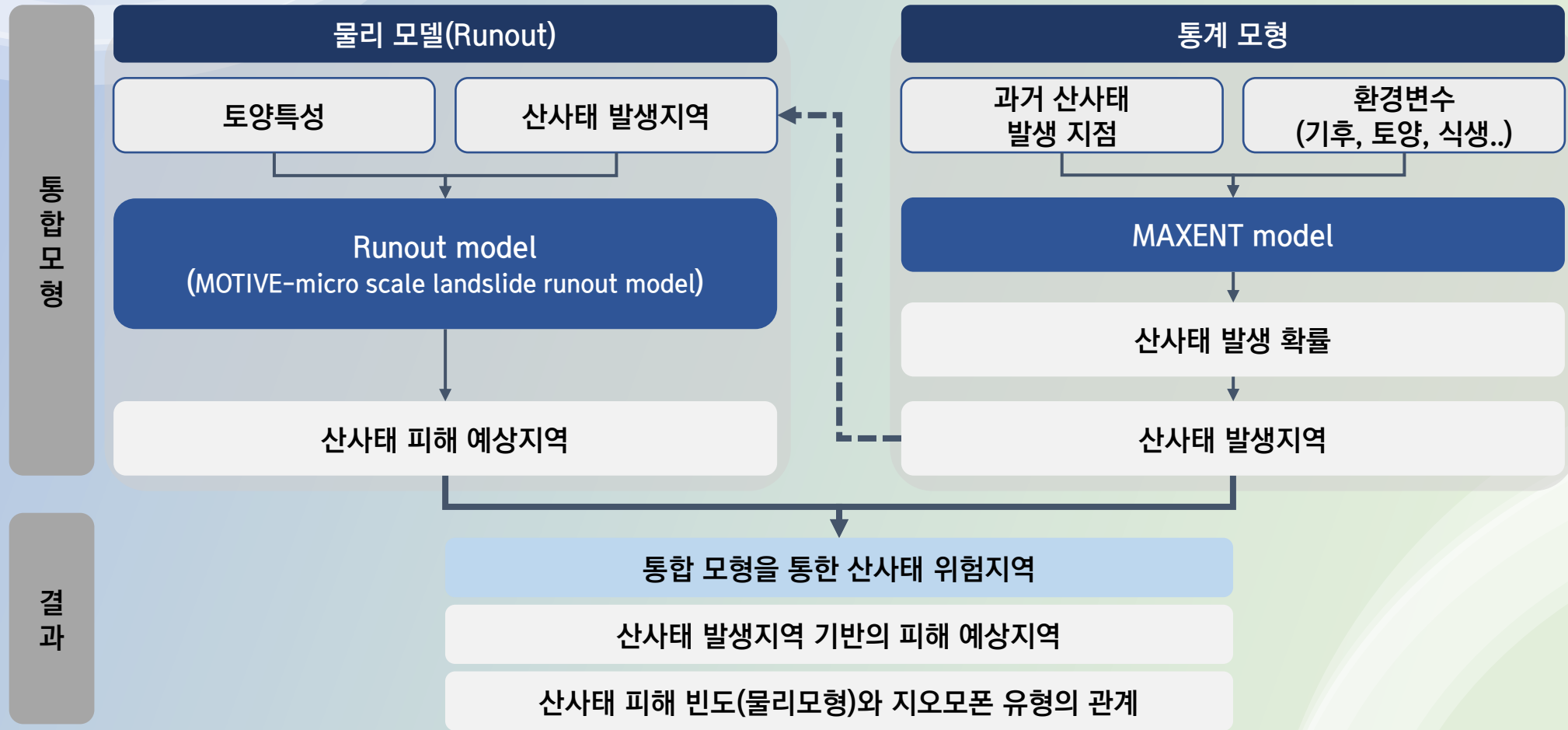


공간적 범위	
강원도	인제군
시간적 범위	
현재	2006
미래 (RCP 시나리오)	2011-2040
	2041-2070
	2070-2099

2. 산사태 연구 사례

3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 연구 흐름도

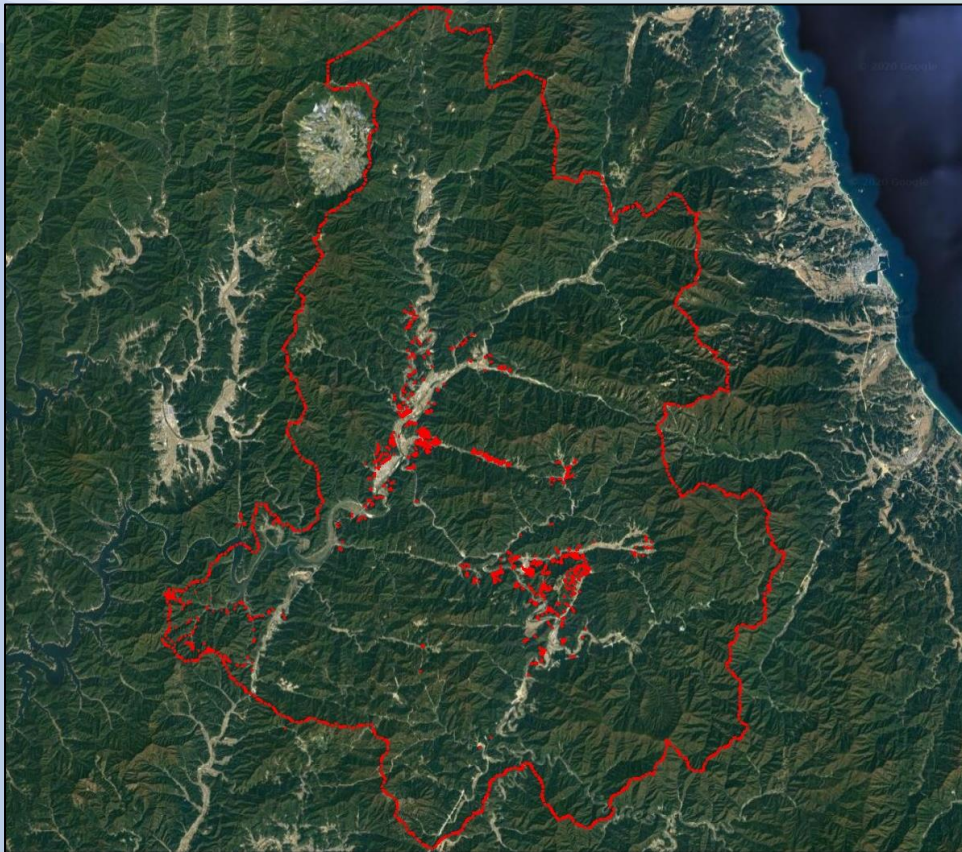


2. 산사태 연구 사례

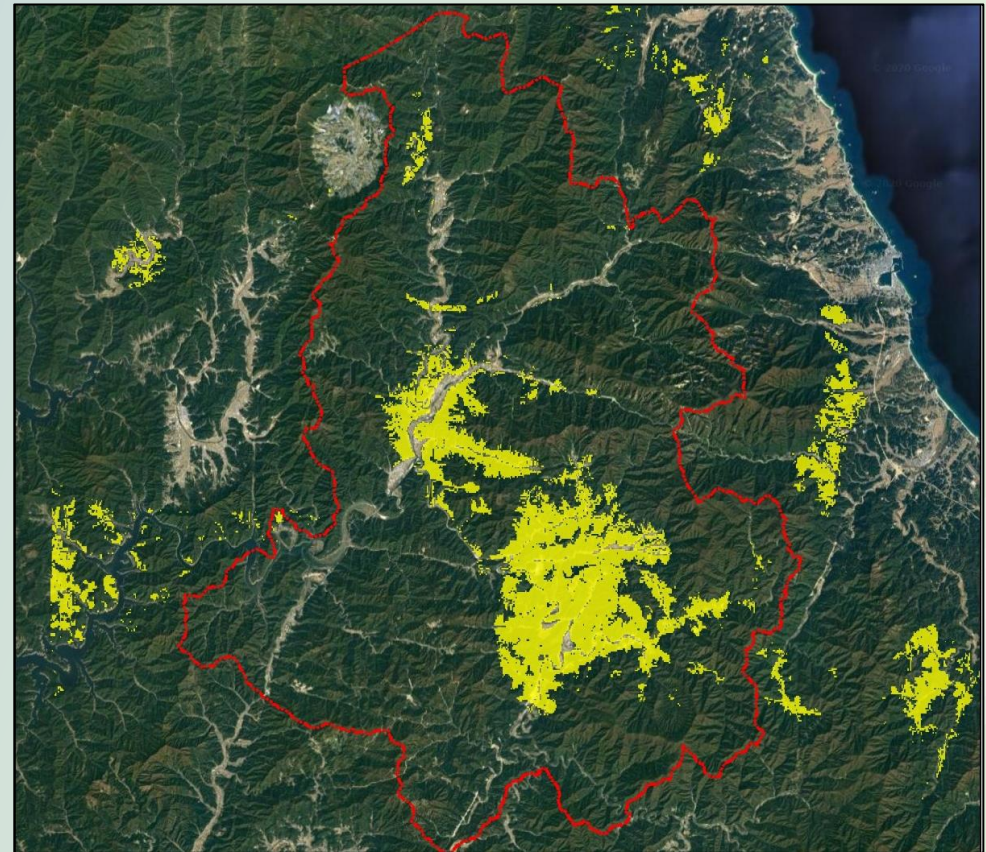
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 공간분포모형 기반 산사태 민감지역

AUC : 0.807



〈산사태 발생 관측지점 2006년〉



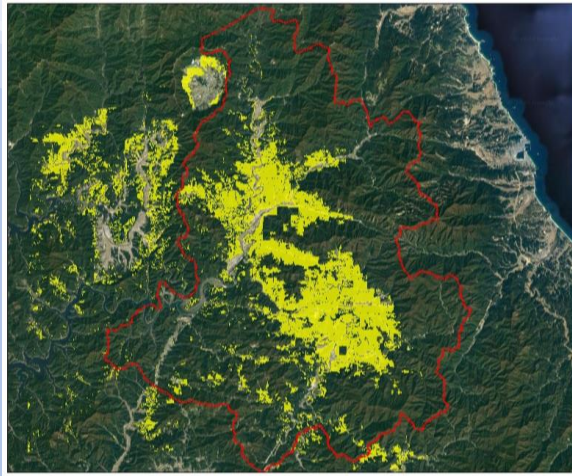
〈MAXENT 활용 산사태 민감지역 2006년〉

2. 산사태 연구 사례

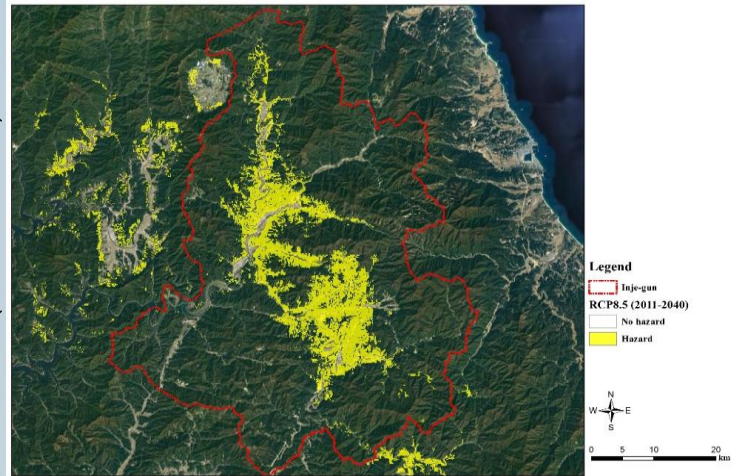
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 공간분포모형 기반 산사태 민감지역 (미래)

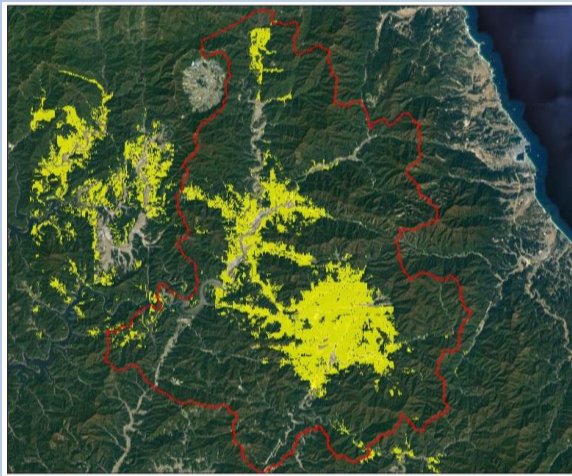
RCP4.5(2011-2040)



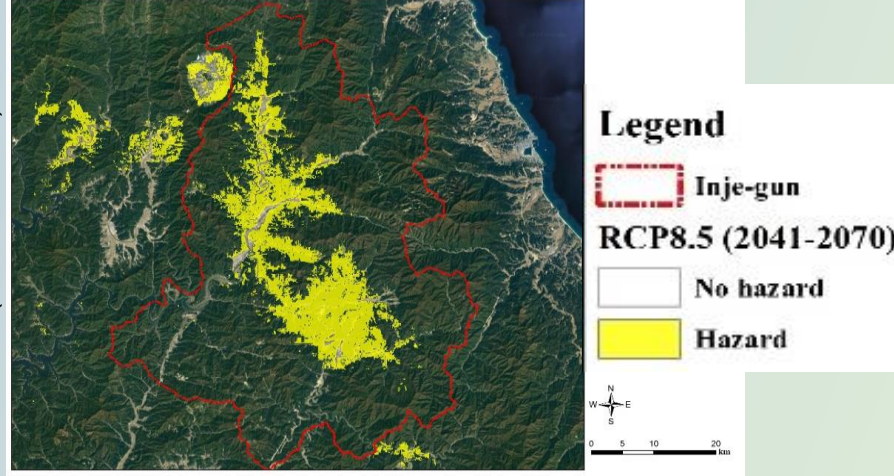
RCP8.5(2011-2040)



RCP4.5(2041-2070)



RCP8.5(2041-2070)



산사태 발생 확률이 증가(2006년 기준)

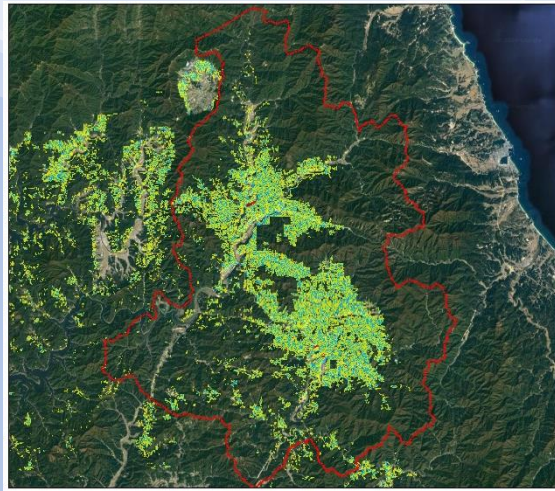
- 전체적으로 2006년보다 산사태 발생확률이 증가한 것으로 나타남
- 2011-2040년에는 RCP4.5가 8.5보다 더 많은 강우량을 보였기에 넓은 범위의 위험지역이 나타난 것으로 보임
- 2040년 이후 기간에서는 RCP 8.5가 4.5 시나리오보다 산사태 위험지역이 넓게 나타남

2. 산사태 연구 사례

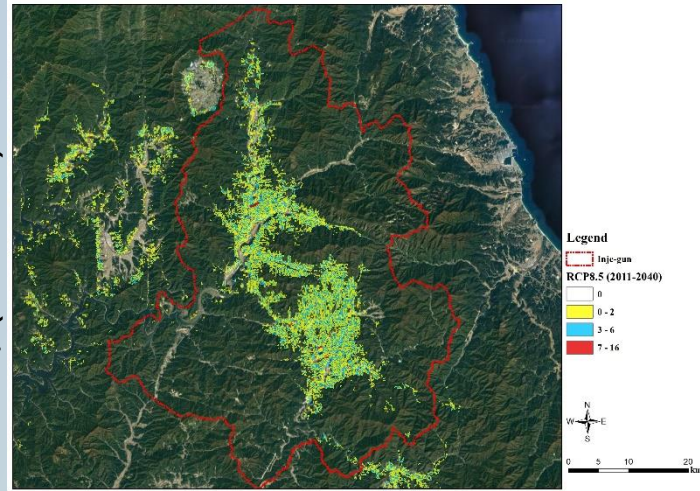
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 물리모형 기반 산사태 피해범위 도출

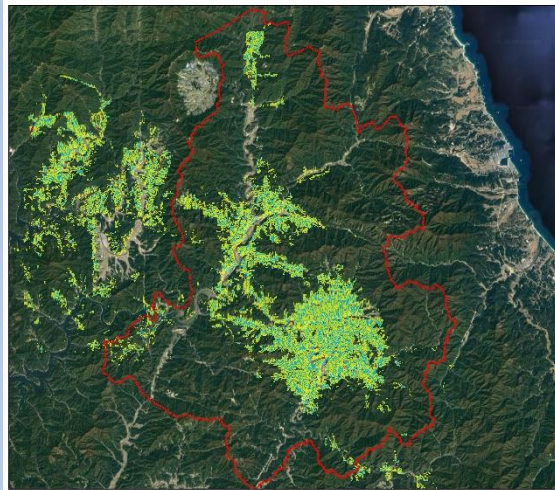
RCP4.5(2011-2040)



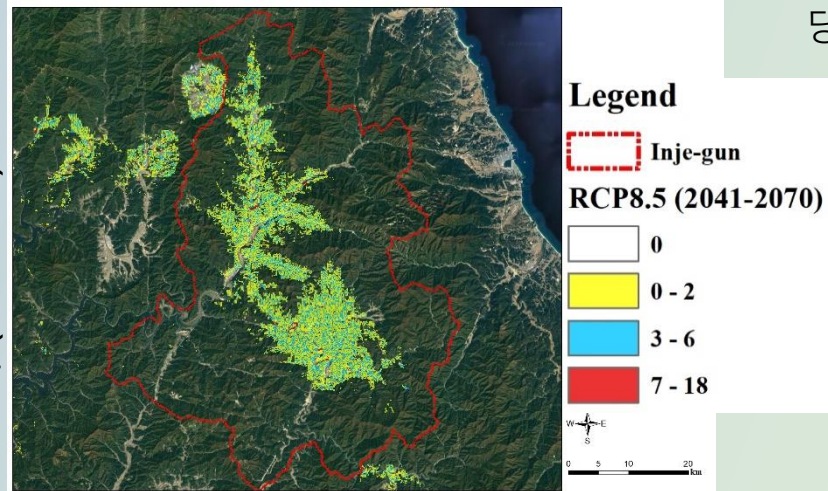
RCP8.5(2011-2040)



RCP4.5(2041-2070)



RCP8.5(2041-2070)



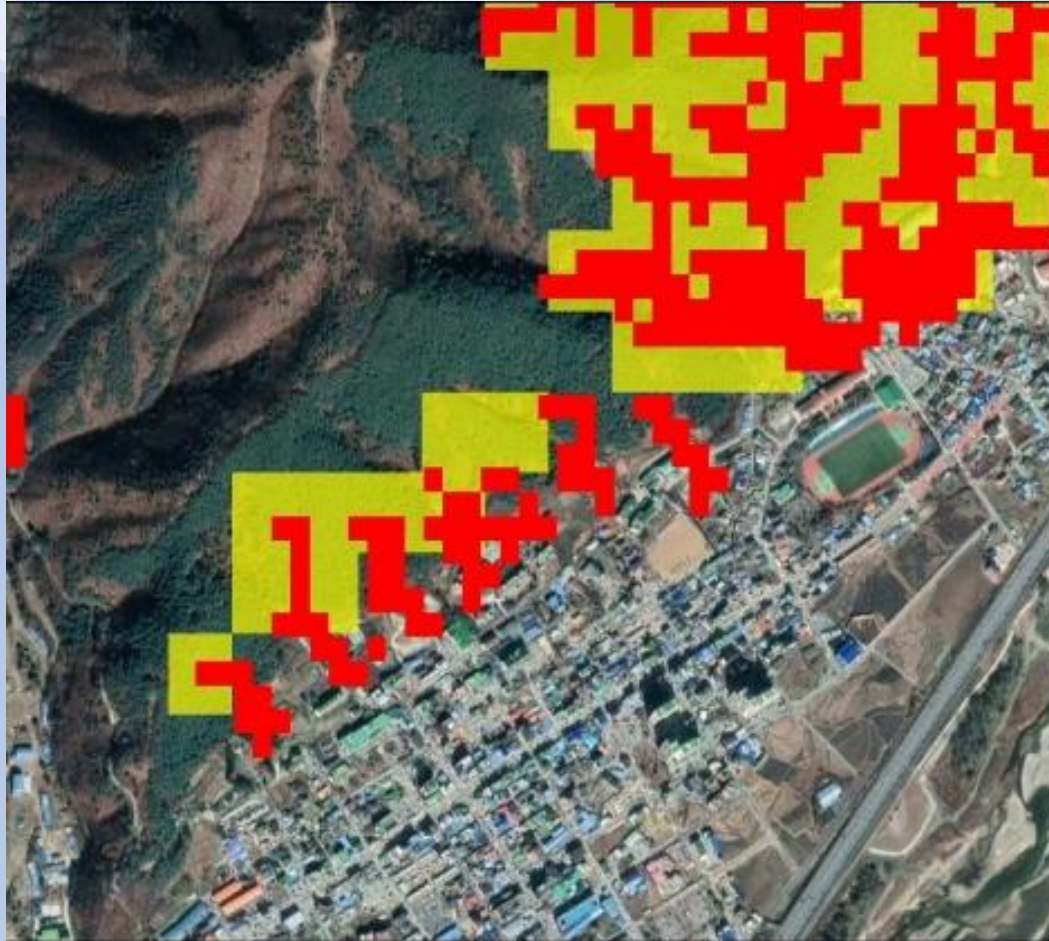
Runout 모형에 통계모형의 산사태 발생지점을 반영하여 산사태 흐름 예측

- 모형 결과는 통계모형을 통해 나온 결과에서 산사태가 발생했을 시, 각 셀에 산사태 피해를 몇 번 입을 지 추정한 값 (0-16사이의 값 도출)
- 4구간으로 등급화 (0 / 1-2 / 3-6 / 7-16)
- 7-16 구간은 주로 산사태 위험지역으로 둘러 쌓인 지역이며, 해당 지역은 다른 지역보다 위험하다고 이야기 가능

2. 산사태 연구 사례

3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 통계 모형과 물리 모형의 분석 결과 비교



- 통계모형에서 나타난 결과(노랑)에서 밝히지 못하는 지역에 대해서 물리모형 결과(빨강)가 도출됨
- 통계모형은 산사태가 발생할 수 있는 지역에 대해서 예측하게 되고, 따라서 주로 산림 내부에 위치한 지역이 위험지역으로 도출됨
- 물리모형에서는 산림지역 경계 밖의 공간에 대해서도 위험지역으로 추정 가능
- 산사태가 가지는 '흐른다'는 성질을 반영하여 산사태 위험지역을 도출하기 때문에 통계모형이 가지는 불확실성을 줄일 수 있음

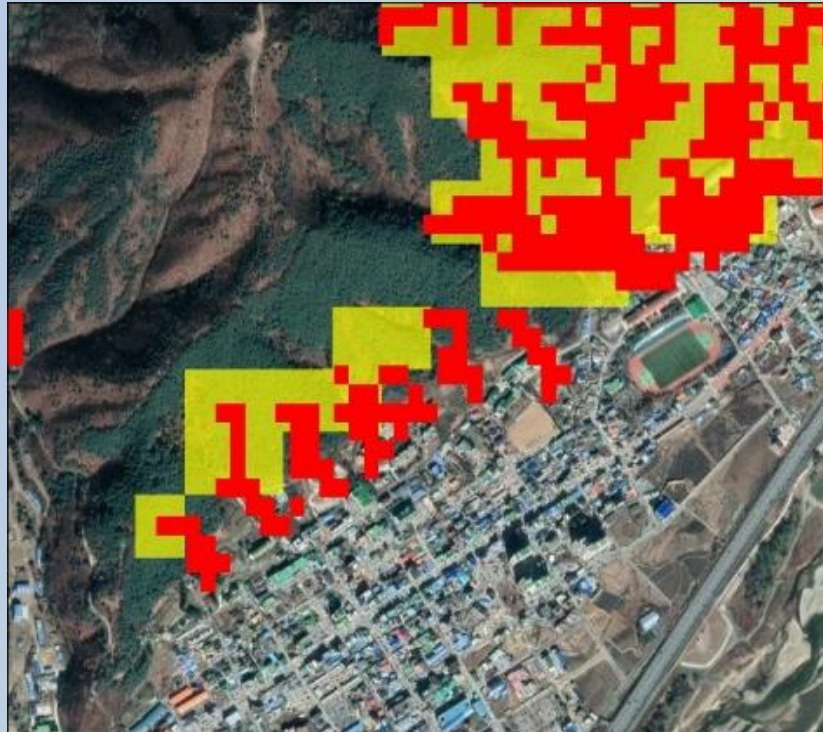
〈 통계모형과 물리모형 결과 2006년 〉

2. 산사태 연구 사례

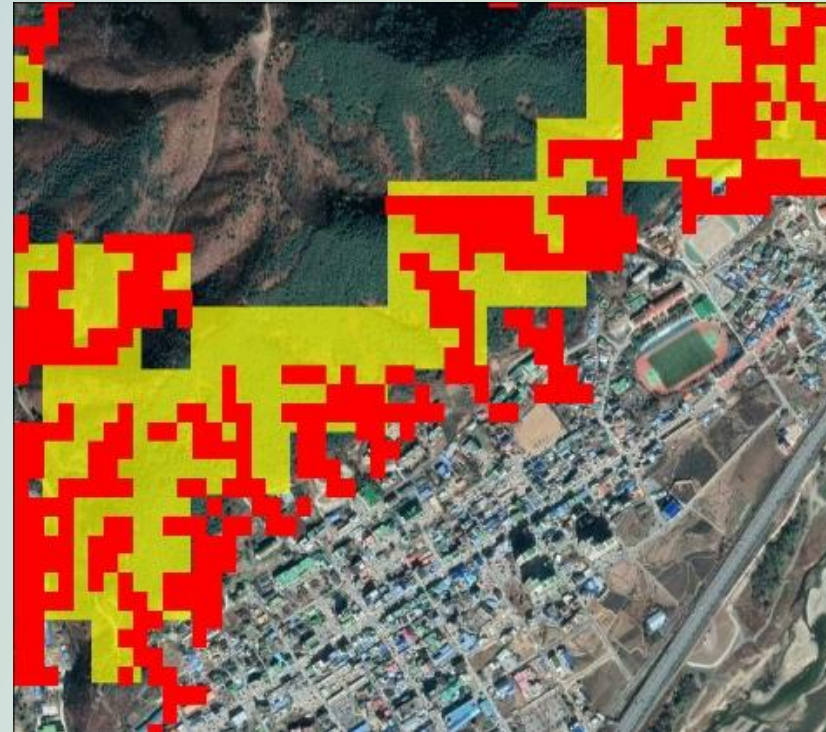
3) 공간분포모형과 물리모형을 연계한 산사태 피해범위 분석

❖ 통계 모형과 물리 모형의 분석 결과 비교 (2006년과 미래 시기)

- 통계 모형과 물리 모형의 예측 결과를 비교함으로써 서로의 장단점을 통해 상호 보완이 가능한 것을 확인함
- 통계 모형은 미래를 예측할 때 주변 지역의 피해 한도를 개선할 수 있으며, 물리 모형에 의해 요구되는 미래 산사태 지역에 대한 정보를 제공하고 상세한 산사태 피해를 예측하여 산사태 피해로 인한 피해 우선순위 결정에 도움이 될 것으로 판단됨



〈 통계모형과 물리모형 결과 2006년 〉



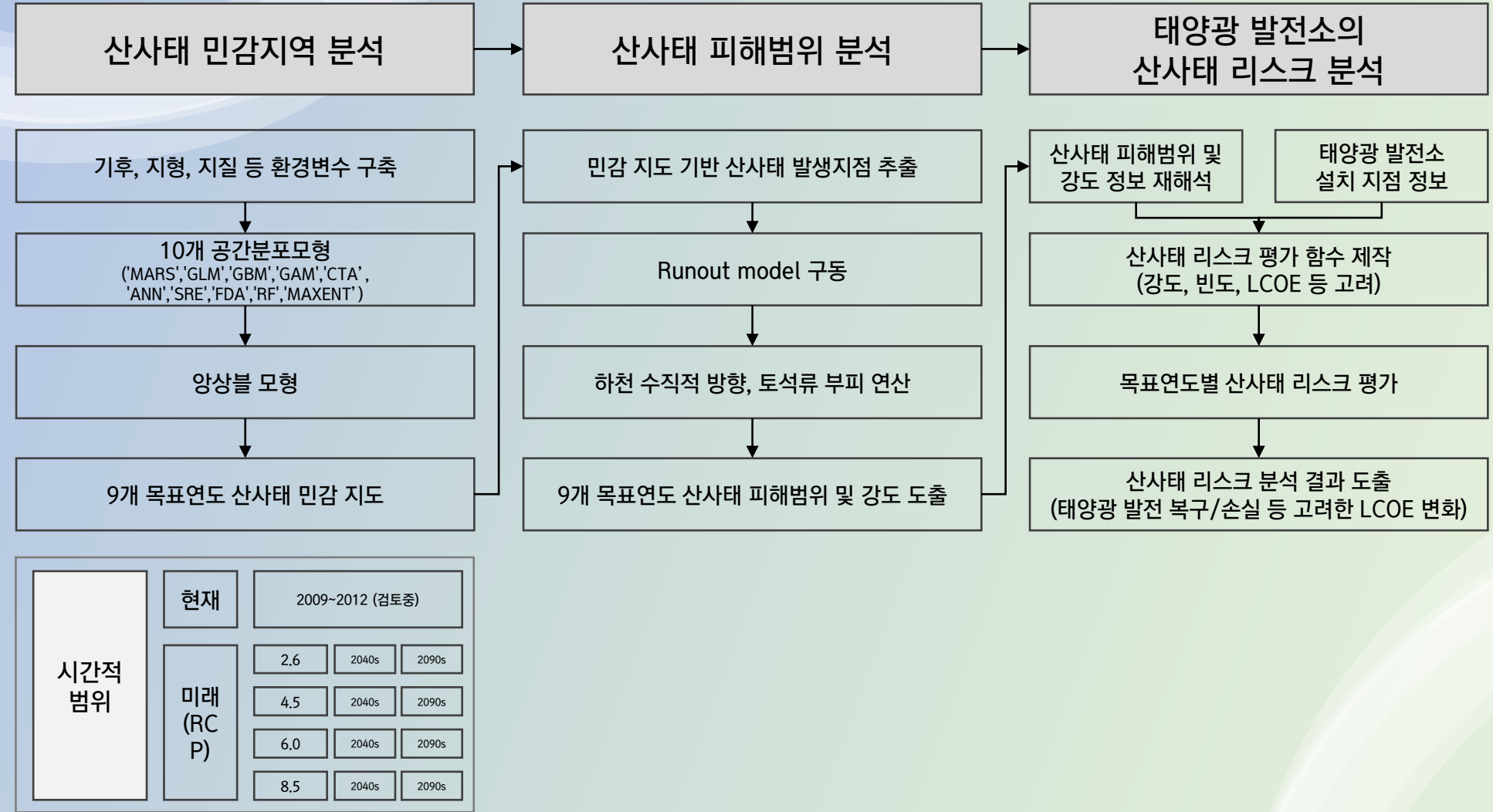
〈 RCP8.5(2011-2040) 〉



3. 향후 연구 계획

3. 향후 연구 계획

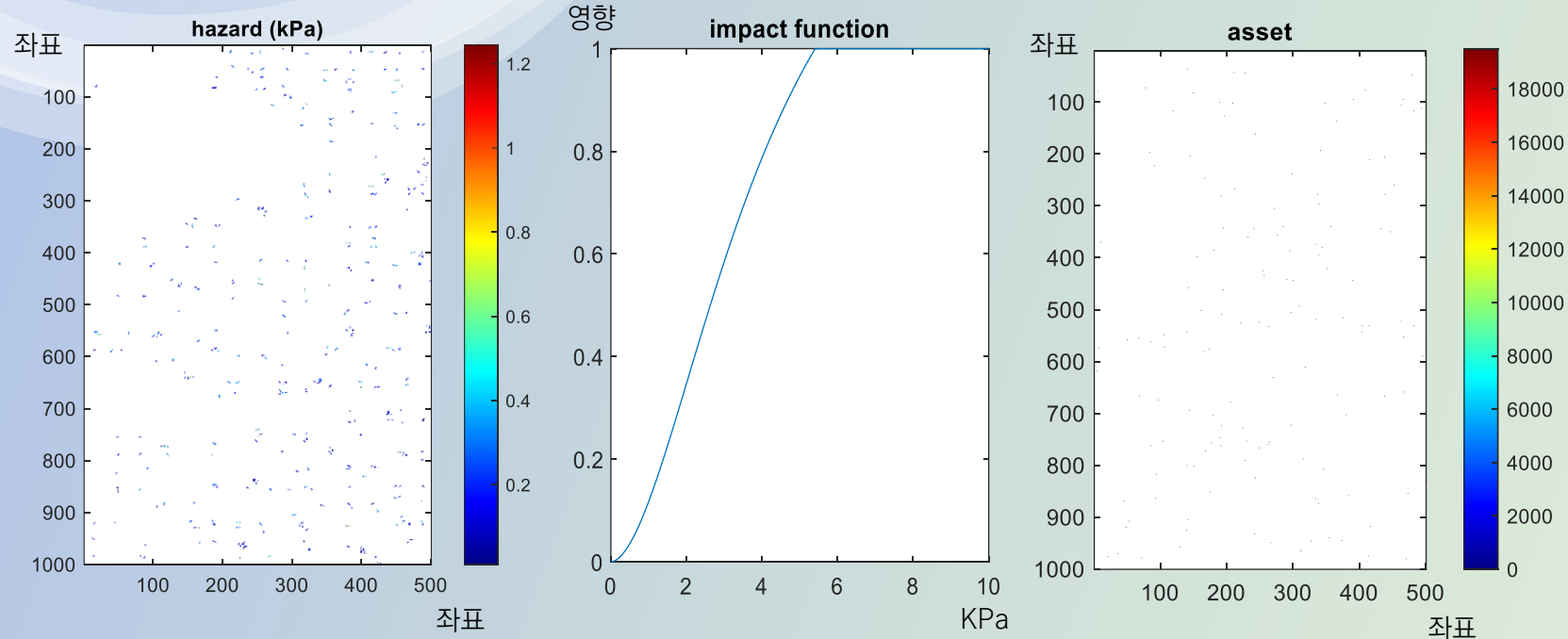
❖ 산사태 강도 기반의 태양광 발전소 리스크 분석



3. 향후 연구 계획

❖ 산사태 강도 기반의 태양광 발전소 리스크 분석

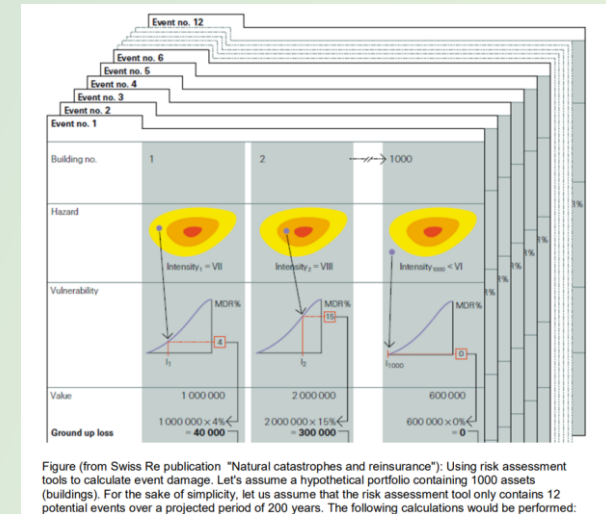
• Risk = 산사태 피해강도 X Impact function X assets



현재부터 미래(2090년대)까지 **계속(3회 누적) 민감할** 것으로 예상되는 지역의 hazard (침식 강도)

영향함수
(Y=1이면 완전 파괴, 5.4Kpa)

태양광설비*(수익+설치비용)



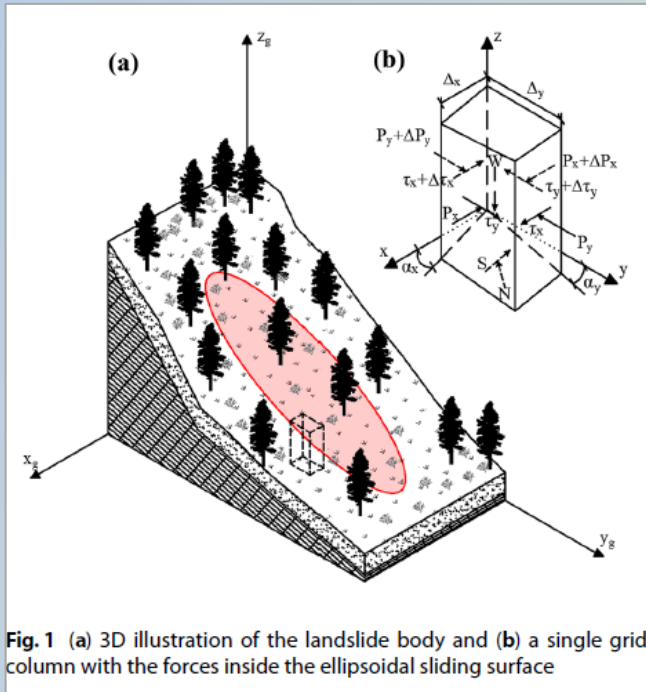
• 리스크 분석 활용(안)

- ✓ 만약 이 지역에 실제로 손실이 생긴 후에도 다음해에 다시 설치를 한다면 피해 금액이 반복될 것
- ✓ 이 지역에 설비를 설치하지 않으면 해당 리스크를 피할 수 있음
- ✓ 손실/yr이 미래 기후변화 시나리오에 따라 변화

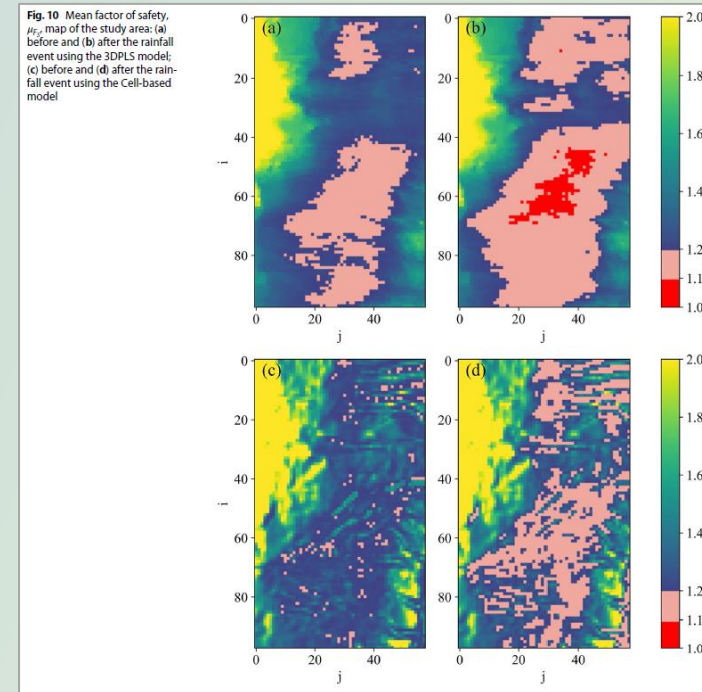
3. 향후 연구 계획

❖ 3차원 물리모형 기반의 세부지역 산사태 위험지역 분석

- 타원형의 슬라이딩 표면을 갖는 얇은 산사태를 추정하는 모형 (3DPLS)
 - ✓ 모형 내 토심 처리 과정 : 타원형 표면 확정 > 격자별 슬라이딩 표면까지 깊이 계산 > 격자의 토심보다 슬라이딩 표면 깊이가 깊으면 짧게 수정 > 토양 칼럼 무게 계산 > 안전율 계산
- 지질공학적 측면의 변수들(응집력, 수리 전도도 등)에 대한 공간적 변동성을 반영한다는 점에서 물리모형 중에서도 강점을 가짐
- 단일 경사에서 10km² 수준까지 적용이 가능한 모형으로 산사태에 매우 취약한 지역에 대한 상세 분석 용도로 적합



Bishop 3d(Hungr, 1987)을 활용하여 3차원 토양 칼럼 기반 제한 평형 기법 적용



3DPLS 분석 결과(a, b) vs 격자 기반 분석 결과(c, d)

4. 결론

4. 결론

❖ 산사태 연구 방법론에 따른 특성(장/단점)을 고려한 적용 필요

- 각 방법론의 특성을 고려하여 연구목적에 맞는 방법론의 적용이 필요
- 방법론의 조합이나 새로운 방법론의 개발 노력 필요

분류	장점	단점
평가지표	<ul style="list-style-type: none"> • 간편한 방법론 : 데이터가 충분하지 않으나, 정책적 시급성을 요구하는 경우에 적합 • 지역별 평가 기준 동일 : 행정구역별로 동일한 방식의 평가로 상대적인 우선순위 판단 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 구체적인 발생지역 탐색 한계 : 분석 범위가 지표 구축 단위(주로 행정구역)에 한정되어 구체적인 산사태 발생지역 탐색이 어려움 • 산사태 메커니즘 반영 한계 : 산사태 발생 원인과 과정을 모형에 명확하게 반영하는 것이 어려움
공간분포모형	<ul style="list-style-type: none"> • 구체적인 발생지역 탐색 가능 : 격자단위의 평가가 가능하여 구체적인 산사태 발생지역 탐색이 가능 • 다양한 분석 범위 : 세부지역에서 국가 단위에 이르기까지 넓은 폭의 분석 가능 범위를 가짐 • 데이터 구축 용이 : 다양한 국가기관에서 구축한 환경공간정보로 구동이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> • 산사태 메커니즘 반영 한계 : 산사태 발생 원인과 과정을 모형에 명확하게 반영하는 것이 어려움 • 통계/학습의 한계 : 과거의 산사태 발생 기록을 바탕으로 통계적으로 해석 혹은 학습하여 과소/과대 추정하는 경향이 나타날 수 있음
물리모형	<ul style="list-style-type: none"> • 구체적인 발생지역 탐색 가능 : 격자단위의 평가가 가능하여 구체적인 산사태 발생지역 탐색이 가능 • 산사태 발생 메커니즘의 반영 : 산사태 원인과 과정을 과학적으로 해석하고 모형에 반영하여 신뢰성이 높음 	<ul style="list-style-type: none"> • 좁은 분석 범위 : 분석 가능 범위가 읍면동 이하 단위로 좁으며, 범위를 넓힐 경우 다양한 가정이 필요 • 데이터 구축 한계 : 분석 시 직접 조사하거나 구축해야 할 세부적인 정보/항목이 많음

4. 결론

❖ 공간단위에 기반한 산사태 리스크 분석을 통한 효율적인 대책 마련 및 피해 저감

- 산사태로 인한 인명, 재산 피해의 최소화 필요
- 지속적으로 산사태 발생 가능성 예측 연구, 산사태로 인한 피해 추정 등 산사태의 리스크를 파악하기 위한 노력 필요
- 산사태 적응대책 수립이 우선적으로 필요한 공간 파악하여, 적재적소의 적응대책 마련 지원

❖ 디지털 트윈 기반의 고해상도 환경공간정보 구축

- 보다 정확한 예측/추정을 위해서는 환경공간정보의 개선이 필수
- 현재 산림청 예/경보 시스템도 실시간 분석은 가능하지만, 현장과는 정보의 차이가 많이 발생하여 한계점 존재
- 디지털 트윈 기반의 현실과 매우 유사하고 정밀한 데이터베이스 구축을 통해 연구의 신뢰성을 크게 향상 시키고 피해 최소화에 기여할 수 있음

경청해 주셔서 감사합니다.



청주대학교 김호걸
khgghk@cju.ac.kr