지질학회지 제 58권 제 4호, p. 509-525, (2022년 12월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 58, no. 4, p. 509-525, (December 2022)
DOI https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.509

Check for updates

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

기후변화 대응 산사태 조기경보시스템 개발 및 운영 현황

송영석‡ · 박준영
한국지질자원연구원 지질재해연구본부

State-of-the-art on development and operation of landslide early warning system for climate change response

Young-Suk Song‡ · Joon-Young Park
Geologic Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 기후변화로 인한 산사태 재해 증가 및 산사태 조기경보시스템의 필요성이 확대됨에 따라 국내외에서 운영 중에 있는 산사태 조기경보시스템을 조사 및 분석하였다. 국내에서는 현재 산림청이 전국적으로 조기경보시스템을 운영하고 있으며, 한국지질자원연구원의 경우 지리산 국립공원일대를 대상으로 웹기반의 조기경보시스템을 개발하여 운영하고 있다. 한편, 국외 산사태 분야 방재선진국인 일본, 미국, 홍콩, 대만, 이탈리아에서는 기상청, 재난관리기관 등의 주관하에 전국을 대상으로 웹기반의 산사태 조기경보시스템을 개발하였으며, 현재 운영 중에 있다. 산사태 조기경보시스템의 경우 사전 강우정보를 활용하여 산사태 발생시간, 발생위치, 피해범위를 사전에 예측하여 산사태 조기경보를 발령함으로서 산사태 피해저감을 위한 골든타임을 확보하여야 한다. 이러한 산사태 조기경보기술에 대한 연구개발 동향을 조사 및 분석하여 현재 산사태 조기경보시스템에 대한 개선방향을 모색하고, 미래의 산사태 조기경보시스템에 대한 고도화 방향을 선정하는데 기초자료로 활용될 수 있다.

주요어: 기후변화, 산사태, 조기경보시스템, 강우예측정보, 예측모델

ABSTRACT: As the risk of landslides due to climate change increases and the need for a landslide early warning system expands, the landslide early warning system in domestic and foreign regions was investigated and analyzed. In Korea, the Korea Forest Service is currently operating an early warning system in the whole country, and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources is developing and managing a web-based early warning system for the National Park area of Mt. Jiri. Meanwhile, Japan, USA, Hong Kong, Taiwan and Italy, which are advanced countries for disaster prevention in the field of landslide, have developed and operated a web-based early warning system for landslide in the whole country under the supervision of meteorological administration and disaster management agencies. The landslide early warning system should secure the golden time to reduce the damage of landslide by predicting occurrence time, location and damage range and issuing early warning alert in advance based on the rainfall forecast information. This state-of-the-art can be used as basic information for studying and analyzing R&D trends for landslide early warning system to find the improvement and upgrade directions of the current system in the future.

Key words: climate change, landslide, early warning system, rainfall forecast information, prediction model

‡Corresponding author: +82-42-868-3035, E-mail: yssong@kigam.re.kr

1. 서 론

우리나라 총면적의 약 70%는 산지 지형으로 이루어졌으며, 자연사면은 모암의 풍화로 인하여 2 m 이하의 얕은 토층이 암반의 상부에 형성되어 있다(Kim and Song, 2015). 우리나라는 오랜 과거부터 매년 우기철 마다 다양한 규모와 형태의 산사태가 지속적으로 발생되고 있다. 최근에는 많은 연구자들이 전 지구적인 기후변화로 인하여 나타나는 국내의 여름철 국지성 집중호우 또는 폭우의 강도와 빈도수 증가현상을 분석하여 보고하고 있다(Choi, 2004; Choi, G. *et al*., 2008; Choi, Y. *et al*., 2011; Jung *et al*., 2011; NIMR, 2012)

최근 지구의 기온상승에 따른 기후변화로 인하여 생태계 및 환경변화가 일어나고 있으며, 해외 뿐만 아니라 국내에서도 자연재해에 대한 위험성이 증가되고 있다(CRED and UNDRR, 2020; IPCC, 2021). 이러한 기후변화 추세는 기존 국내에서 일반적으로 나타나는 산사태 발생패턴을 변화시키고, 산사태 발생빈도 및 규모를 증가시키고 있다. 그리고 인구증가로 인한 도시의 발달과 거주지의 확장으로 인하여 산지 개발이 증가하게 되므로 산사태로 인한 인적 및 물적 피해가 급증하고 있다. 그림 1은 1976년부터 2019년까지 산림청의 자료를 분석하여 국내 산사태 피해면적 및 복구비용에 대한 연도별 변화양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기후변화로 인한 영향으로 인하여 1998년부터 연간 산사태 피해면적 및 복구비용이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 2010년부터 2019년까지 최근 10년 동안의 산사태 피해면적은 2,264 ha, 인명피해(사망자수)는 53명, 피해복구비는 4,389억원으로 나타났다.

2010년 이후 국내에서 발생된 대표적인 산사태 사례로는 2011년에 서울 서초구 우면산 산사태를 들 수 있다. 그림 2는 래미안아파트와 신동아아파트에 피해를 입힌 우면산 산사태 발생 모습을 촬영한 것이다. 우면산 산사태의 발생 면적은 약 356,000 m^2으로 13개 구간에서 동시다발적으로 발생되었으며, 많은 인명 및 재산피해를 초래하였다.

우면산 산사태 발생 이후에도 전국 도시와 산지에서 대형 산사태가 동시다발적으로 거의 매년 발생하여 국민 안전과 재산의 막대한 피해가 반복적으로 발생하고 있다. 2019년 10월 태풍 '미탁'의 영향으로 부산, 경북, 강원지역에서 많은 산사태가 발생되었으며, 약 천억원의 재산피해가 발생하였다. 그리고 2020년 6월 말부터 9월 초까지 강한 비를 동반한 긴 장마로 인하여 충북, 전북, 경기지역에서 많은 산사태가 발생되었고, 약 3천억의 재산피해가 발생하였다.

산사태 재해 규모가 매년 급증하는 추세 속에서 재해 관리자 또는 대응 결정권자에게 신뢰성 있고 정확한 예측정보를 제공하고, 산지에 인접하여 살고 있는 주민들에게 신속하게 조기경보를 발령할 수 있

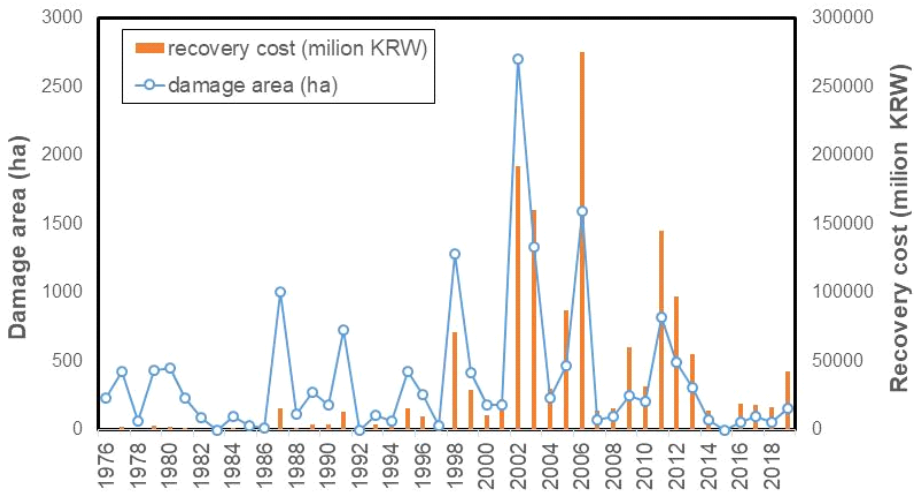


Fig. 1. Trends of damage area and recovery cost from landslides in Korea by year (1976-2019).

Fig. 2. A panoramic view of the landslide at Mt. Umyeon (Courtesy of Chosun Ilbo).

는 기술이 시급하게 요구되는 상황이다. 특히, 서울 우면산 산사태와 부산 사하구 산사태와 같이 도심지역에서 발생되는 산사태의 경우 도시생활권에서의 밀집적인 토지이용으로 인하여 사방댐을 포함한 구조물 대책을 적용한 피해저감공법을 적용하기 어려운 상황이므로 산사태 고위험지역에 대한 산사태 조기경보기술을 개발 및 활용하여 인명 및 재산피해를 최소할 필요가 있다.

산사태 방재분야의 선진국인 미국, 일본, 대만, 이탈리아 등에서는 과거의 산사태 이력 및 강우자료를 기반으로 경험적 또는 확률론적 기준을 제시하고, 이를 산사태 조기경보에 활용하고 있다. 또한 강우와 연동한 물리기반의 산사태 예측모형을 이용하여 보다 정확한 산사태 조기경보를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

따라서 본 논문에서는 현재까지 국내외에서 활용되고 있는 산사태 조기경보기술을 조사하고, 이를 토대로 산사태 조기경보기술에 대한 연구개발 동향을 분석하고자 한다. 그리고 국내외 산사태 조기경보기술 개발동향 조사 및 분석을 통하여 현재 산사태 조기경보시스템에 대한 개선방향을 모색하고, 미래의 산사태 조기경보시스템에 대한 활용방안을 제고하고자 한다.

2. 산사태 예측기술의 연구 동향

산사태 예측기술은 산사태가 언제 어디서 발생할 것인지에 대한 정보를 제공하는 것으로 시간적 예측 및 공간적 예측이 필요하다. 산사태 예측을 위해서는 기존 산사태 발생자료(Inventory data), 기상자료(특히, 강우자료), 지형자료, 지질 및 지반공학적 자료 등을 활용하여 산사태 발생가능성을 해석(Modelling)하는 것이다. 산사태 예측모델은 크게 물리기반 모델과 통계모델로 구분할 수 있다. 물리기반 모델은 산사태가 발생되는 현상에 대하여 물리학에 기반한 수학공식을 적용하는 방법이며, 수리학 및 지반공학적인 접근이 중요하다. 통계모델은 산사태 발생 구간과 미발생 구간에서의 다양한 지형, 지질 및 지반공학적 자료를 조사하여 자료 간의 상관관계를 통계적 방법으로 분석하는 것으로, 통계학적인 접근이 중요하다.

미국, 일본, 대만, 이탈리아 등 오랜 역사와 함께 세계적으로 산사태 연구의 최첨단을 선도하고 있는 국가들에서는 과거의 산사태 이력 및 강우 자료의 통계분석을 통하여 경험적 또는 확률론적 규준을 정립하고 이를 산사태 조기경보에 활용하였다(Piciullo *et al*., 2018; Guzzetti *et al*., 2020). 가장 대표적인 경우로 Caine (1980)과 Guzzetti *et al*. (2008)이 제시한 I-D (Intensity-Duration) 곡선이 있다. I-D 곡선이란 과거의 산사태 유발 강우자료들을 분석하여 강우강도(Intensity)와 지속시간(Duration) 간의 경험적 관계에 기반한 강우 한계선을 의미한다. 일반적으로 강우 한계선은 종축에 강우강도 혹은 누적강우량을 나타내고 횡축에는 강우 지속기간을 나타낸다. 그림 3은 각 국가별로 제시된 I-D 곡선을 함께 도시한 것이다(Guzzetti *et al*., 2008). I-D 곡선에서 강우 한계선은 강우와 산사태의 상관관계를 나타낸 것으로 강우 지속시간에 따라 산사태가 발생되는 강우량 혹은 강우강도를 제시할 수 있으므로 산사태 예측 및 조기경보에 활용되고 있다. 국내에서도 지금까지 이와 유사하게 과거의 강우자료들의 분석을 통한 경험적인 강우규준들이 다양하게 제시되어 왔다(Yune *et al*., 2010; Oh and Park, 2013; Lee and Kim, 2017).

한편, 산림청에서는 1988년부터 2013년까지는 최대시우량, 1일강수량, 연속강우량에 대한 기준값을 경험적으로 설정하여 산사태 조기경보를 시행한 바 있다. 그리고 2013년 이후부터는 강우 및 지질특성을 반영하여 토양함수지수 및 탱크모델을 통한 통계적인 규준을 설정하여 국가산사태 조기경보체계를 구축 및 운영 중이다(Ham and Hwang, 2014). 그러나, 이러한 과거 이력자료들에 기반한 경험적 강우규준을 통한 조기경보기술은, 1) 지질/지반/지

형 등의 국부적 지역특성에 따른 공간 분별 예측 성능이 부족한 점과, 2) 산사태 거동의 물리적 메커니즘의 측면에서 근거를 제시하지 못하며, 3) 이력자료에 대한 의존성으로 인해 이력자료가 없거나 부족한 지역을 대상으로는 예측 신뢰성을 보장하지 못하는 한계점이 있을 수 있다.

한편, 21세기 정보화시대에 접어들면서 컴퓨터 기술이 급격하게 발전함에 따라 산사태 관련 연구자들은 다음과 같은 환경변화를 겪고 있다. 첫째는 입력인자들에 대한 현장데이터 획득기술의 발달이고, 둘째는 복잡한 산사태 발생 물리이론 지배방정식의 해를 구하기 위한 연산시간의 획기적 감소이다. 셋째는 다양한 수치해석 모델링 기법의 등장이고, 넷째는 GIS 기술 및 인터넷이 발달함에 따라 공간데이터의 처리와 웹을 통한 공유/표출 방식의 획기적 진화이다. 이와 같은 환경변화로 인하여 다양한 입력자료의 불확실성, 연산시간으로 인한 한계성 등으로 실무적인 활용이 어려웠던 물리기반 산사태 평가모형의 실용성이 획기적으로 개선되고 확장성이 커지고 있다.

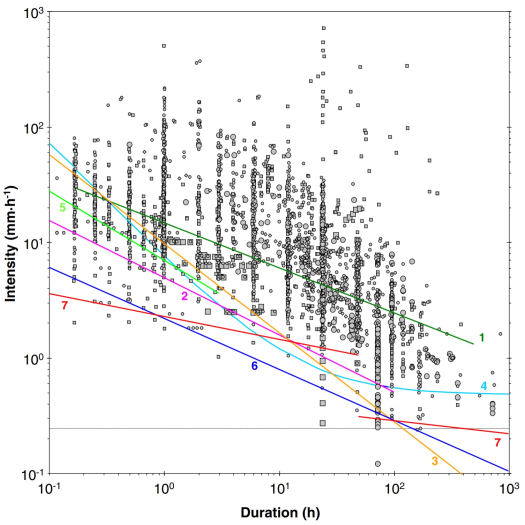


Fig. 3. Comparison between the global I-D curve (Guzzetti *et al*., 2008). 1. Caine (1980); 2. Innes (1983); 3. Clarizia *et al*. (1996); 4. Crosta and Frattini (2001); 5. Cannon and Gartner (2005); 6 and 7. Guzzetti *et al*. (2008).

3. 물리기반의 산사태 예측기술

물리기반 산사태 예측기술은 산사태 발생 메커니즘에 대한 물리적인 현상을 수학적 해석방법을 통해 해를 도출하는 방법이다. 물리기반의 산사태 예측기술은 일반적으로 강우의 지반토층 침투 및 지중 침투수 흐름에서부터, 이에 따른 습윤전선(wetting front)의 생성 및 하강, 지하수 조건의 변화 및 지하수위 상승, 포화도 증가에 따른 흡입응력(suction stress)의 약화로 인해 지반의 전단강도 감소, 그리고 지반의 역학적 평형(equilibrium) 상태의 소실로 인한 전단 파괴면의 발생까지 포함할 수 있다(Ng and Shi, 1998; Kim *et al*., 2004; Lu and Godt, 2008; Song and Hong, 2011; Song, 2013).

그림 4는 우리나라의 자연사면에서 강우시 발생되는 얕은 깊이의 산사태 발생 메커니즘을 나타낸 것이다(Song *et al*., 2012, 2016). 그림에서 보는 바와 같이 강우시 자연사면 토층내 우수의 침투로 인하여 습윤전선이 아래로 확대되어 습윤영역이 증가

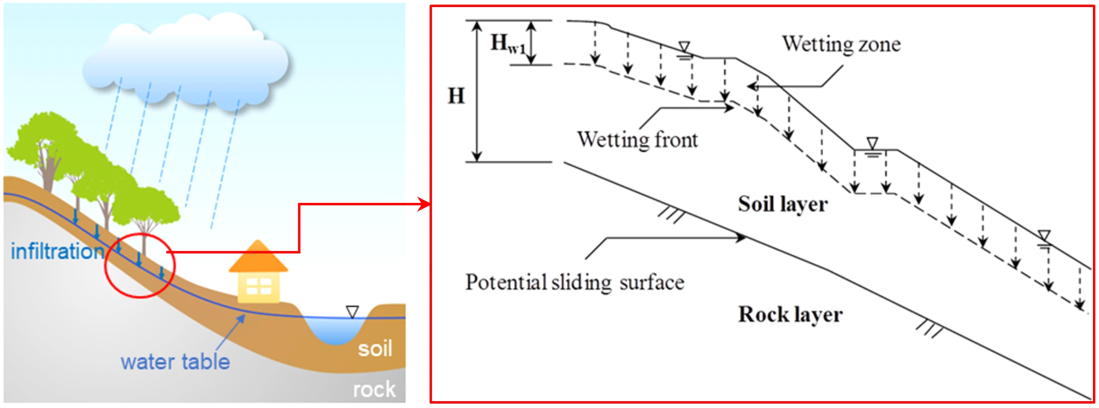


Fig. 4. Shallow landslide occurrence mechanism in a natural slope (Song *et al*., 2012).

Table 1. Physically-based landslide prediction model.

Country	Model	Description	Researcher	Date
UK	CHASM	Combined Hydrology And Stability Model	Anderson and Lloyd	1991
USA	LISA	Level I Stability Analysis	Hammond *et al*.	1992
USA	SHALSTAB	Shallow Landsliding Stability Model	Montgomery and Dietrich	1994
USA	SMORPH	Slope Morphology	Shaw and Johnson	1995
USA	dSLAM/ IDSSM	Distributed Shallow Landslide Model / Integrated Dynamic Slope Stability Shallow Landslide Model	Wu and Sidle	1995
Canada	SINMAP	Stability Index Mapping	Pack *et al*.	1998
USA	TRIGRS	Transient Rainfall Infiltration and Grid based Regional Slope-stability	Baum *et al*.	2008
Netherlands	PROBSTAB	PROBability of STABility PCRasterGIS package	van Beek	2002
USA	PISA	Probabilistic Infinite Slope Analysis.	Haneberg	2004
Italy	GEOtop-FS	hydrological model GEOtop combined with an infinite slope stability model	Simoni *et al*.	2008
Korea	YS-SLOPE	Infinite slope stability model combined with YSGWF model using Green and Ampt equation	Kim *et al*.	2014
Korea	$CR_{Critical}$	Critical Continuous Rainfall model based on infinite slope stability analysis	Park *et al*.	2019
Korea	KIGAM	Infinite slope stability analysis considering suction stress combined with surface water flow and fluid flow in subsurface	KIGAM	2019

되고 토층의 하중으로 인한 활동력 증가와 토층내 흡입자 간의 결합력 감소로 인하여 산사태가 발생되는 것이다. 물리기반의 산사태 예측은 강우시 산사태 발생 메커니즘을 고려하여 강우시 지표수의 침투 발생, 지중내 침투된 우수의 흐름으로 인한 습윤영역 확대, 포화로 인한 토층의 활동력 증가 및 토층내 흙입자간 결합력 감소를 수학적인 모델을 적용하여 해석하는 것이다. 일반적으로 물리기반 산사태 예측모델의 경우 산사태 발생가능성을 사면안전율로 제시할 수 있으며, 사면안전율을 토대로 산사태 예측 및 조기경보가 가능하다.

1990년대에 들어서면서 컴퓨터 기술의 발달과 함께 산사태 발생 메커니즘을 모사하는 수학적 해석방법들이 제안되기 시작하였다. 과거 산사태 이력에 기반한 확률론적 산사태 평가 기준은 자료의 질과 양에 의존성이 크고 개인의 경험과 주관에 의해 달라질 수 있다. 특히 산사태 발생지역에 대한 지형, 지질 및 지반의 특성이 고려되지 못하는 한계점이 있다. 그러나 물리기반의 산사태 예측기술은 산사태 발생 메커니즘에 대한 물리적 요인들을 고려하여 객관적이고 정량적으로 계산할 수 있으며, 정확한 해석 결과를 나타내므로 많은 연구가 진행되고 있다.

표 1은 현재까지 국내외에서 개발된 대표적인 물리기반의 산사태 예측모델을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 미국과 유럽에서 예측모델의 연구개발이 활발하게 진행되어 왔으며, 예측모델은 각 국가에서 발생되는 산사태 특성에 따라 영향인자, 해석방법 등의 차이를 나타내고 있다. 그리고 이들 모델들은 사면내 지반의 수문인자들에 대한 해석방법에 따라 아래와 같이 두 가지 그룹으로 나눌 수 있다.

첫 번째는 정상상태(Steady state) 기반의 간편 혹은 정적 사면안정해석모델이다. 이에 해당하는 해석모델은 LISA (Anderson and Lloyd, 1991), PISA (Haneberg, 2004), SINMAP (Pack *et al*., 1998), SHALSTAB (Montgomery and Dietrich, 1994) 등이 있다. 이들은 강우에 따른 사면의 수문인자(침투수 흐름, 포화깊이비 등)를 정상상태 거동으로 제한하여 고려하거나 하나의 확률변수로서 고려한다. 결과적으로 시간에 따른 변화를 고려하지 않고 공간에 따른 상대적인 산사태 발생가능성을 평가하며 간편

화된 정적인 해석모형에 속한다.

두 번째는 비정상상태(Transient state) 기반의 동적 사면안정 해석모델이다. 실제 강우관측 또는 지반계측 자료 등을 이용하여 지중의 부정류 침투흐름을 모사함으로써 지반 내 수문인자(습윤조건)의 시간에 따른 변화를 알 수 있으며, 이를 기반으로 시계열적인 사면안정 해석이 가능하다. CHASM (Anderson and Lloyd, 1991)의 경우 이차원 유한차분법에 기반한 사면안정 해석모델을 적용하여 시간에 따른 간극수압의 산정이 가능하였으나 특정한 단일 사면에만 적용이 가능하였고, 원호파괴 사면안정해석을 위한 Bishop법을 적용하였다. 그러므로 특정 현장 혹은 해석단면을 대상으로 세밀한 분석을 필요한 경우에만 그 적용성이 제한되었다. GIS 기술이 발달하기 시작하면서, 물리기반 산사태 예측모델의 적용범위가 확장되었고, 광역지역의 자연사면을 대상으로 하면서 무한사면 안정해석법을 적용하기 시작하였다. 이때부터 물리기반 산사태 예측모델은 시간에 따라 변화하는 강우의 지반침투 및 지중흐름에 대한 거동을 고려하여 개발되었다. SLIP (Montrasio, 2000)의 경우 시계열에 따른 강우 침투깊이와 지반 포화깊이비 사이의 상관관계를 이용하여 단순화된 수문모델을 적용하였다. 반면, dSLAM (Wu and Sidle, 1995), TRIGRS (Baum *et al*., 2008), PROBSTAB (van Beek, 2002), GEOtop-FS (Simoni *et al*., 2008) 등은 지반내 수문거동을 모사하는 지배방정식을 보정하여 계산하거나 수치해석으로 해를 제시하는 다양한 모델들을 개발하였다.

최근 들어 국내에서도 물리기반의 산사태 예측모델을 개발하여 활용하고 있으며, 비정상상태의 동적 사면안정 해석모델에 해당한다. 본 논문에서는 연세대학교 연구팀에서 개발한 YS-SLOPE 예측모델, 한국과학기술원 연구팀에서 개발한 $CR_{Critical}$ 예측모델, 한국지질자원연구원에서 개발한 KIGAM 예측모델에 대하여 간단하게 설명하고자 한다. 본 원고에서는 각각의 모델에 대한 기본개념과 적용사례를 간단하게 제시하였으며, 자세한 내용은 참고문헌을 활용하기 바란다.

3.1 YS-SLOPE 모델 (Kim *et al*., 2014)

연세대학교 연구팀에서 개발한 YS-SLOPE 모델은 GIS기반의 지반 및 수문학적인 강우침투-지하수흐름모델(YSGWF)과 무한사면 파괴모델을 결합한 것이다. 이 모델은 흙의 불포화 특성을 반영하기 위하여 개선된 Green-Ampt 모델(Green and Ampt, 1911)을 적용하였으며, 지하수 흐름을 계산하기 위해 Darcy 법칙과 GIS 기반의 경사와 흐름방향 정보를 사용한다. 지하수의 분포는 지표면으로부터 강우침투에 의해 일시적으로 형성되는 습윤대, 포화되기 전까지의 불포화대, 기반암 상부의 지하수대로 구분하였으며, 지하수대 상부의 연직방향 침투와 지하수대에서의 수평방향 흐름을 고려하여 3차원적인 지하수 흐름을 계산하도록 하였다. 그림 5는 지하수 분포를 습윤대, 불포화대에서의 연직방향 침투와 지하수대에

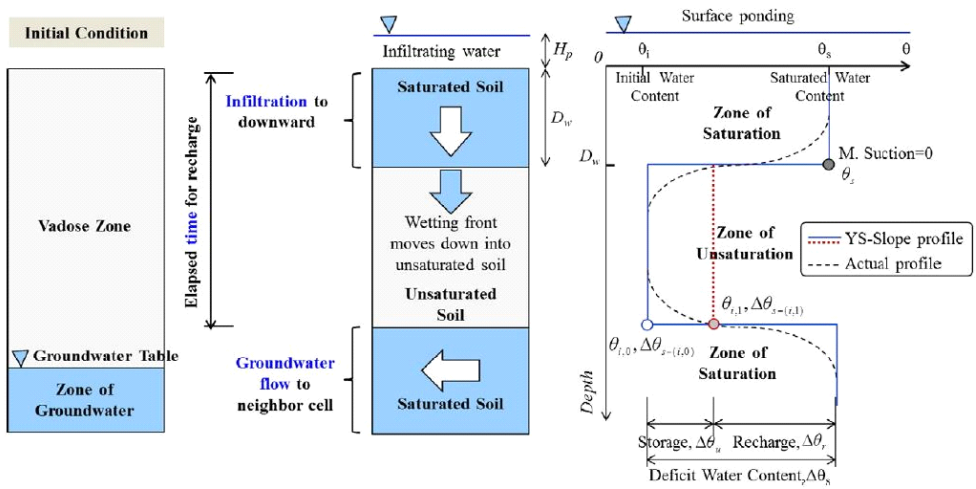


Fig. 5. Geo-hydrologic rainfall infiltration-groundwater flow model (YSGWF).

서의 수평방향 흐름으로 나타낸 것이다. 그림 6은 우면산 산사태 사례를 YS-SLOPE 모델을 이용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. 기존 TRIGRS 모델을 이용한 해석결과와 비교한 결과 지하수의 흐름과 습윤대를 동시에 고려하므로 보다 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다. 그러나 본 예측모델은 강우침투에 추가로 지하수 흐름을 계산하는 과정을 추가하여 계산시간이 오래 걸리므로 국부지역에 대한 산사태 해석에 적용되었다. 그리고 본 예측모델의 무한사면 안정해석의 경우 불포화 전단강도의 개념인 흡입응력을 고려하지 않고, 지하수위에 따른 간극수압의 변화만을 고려하고 있다.

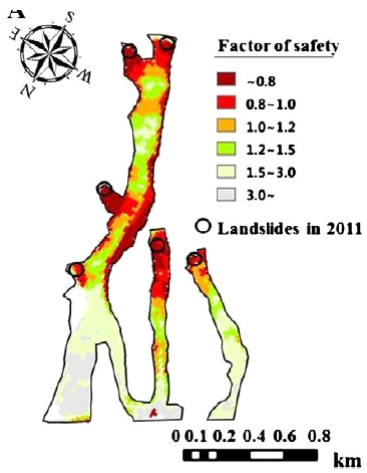
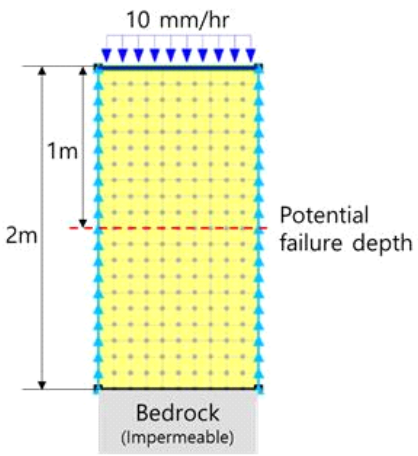


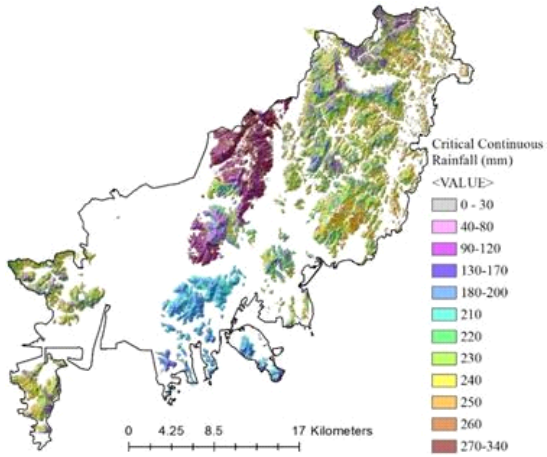
Fig. 6. Landslide prediction result using YS-SLOPE model (Mt. Umyeon).

3.2 $CR_{Critical}$ 모델 (Park *et al.*, 2019)

한국과학기술원 연구팀에서 개발한 임계연속강우량($CR_{Critical}$) 모델은 단시간 동안 집중되는 국내의 극한강우 특성에 따라 발생되는 천층 산사태를 고려하여 개발된 물리기반 산사태 발생 평가규준이다. 얕은 토심을 가진 자연사면에서 강우로 인한 지중 침투수의 흐름이 단기적인 1차원 수직방향 흐름을 가정하고 배수효과를 무시할 수 있다. 이를 토대로 무한사면 형태의 자연사면이 불안정($Fs \leqq 1.3$)해지는 최소 연속강우량을 도출하였다. 침투흐름에 대한 편미분방정식을 유한요소해석을 통해 시간에 따른 간극수압 변화를 계산할 수 있다(그림 7a). 이를 이용하여 시간에 따른 흡입응력(suction stress) 변화를 계산하여 불포화 무한사면 안정해석에 적용함으로써 사면안전율이 1.3 이하로 되는 최소연속강우량을 도출할 수 있다. 그림 7b는 부산 전지역을 대상으로 임계연속강우량 분포지도를 작성한 것이다. 도출된 임계연속강우량은 지역별로 고정된 고유의 값이므로 기존의 물리기반 모델들과 달리 실시간 강우에 따른 해석이 필요하지 않으며 광역지역에 적용이 가능하다. 그러나 무한사면 파괴해석에서 전단파괴 깊이를 1 m로 고정해서 가정하고 있고, 3차원 산지지형에 따른 지중 침투의 측면 흐름을 고려하지 못한다는 한계점을 가지고 있다.



(a) Dmain of numerical analysis



(b) Critical continuous rainfall map in Busan area

Fig. 7. Landslide prediction result using critical continuous rainfall model.

3.3 KIGAM 모델 (KIGAM, 2019)

한국지질자원연구원 연구팀에서 개발한 KIGAM 모델은 우리나라의 자연사면에서 강우시 발생되는 얕은파괴의 산사태를 해석하기 위하여 불포화 무한사면을 대상으로 강우 침투, 지표수 유출 및 침투수의 지중 흐름을 고려하였다. 즉 지표흐름해석(surface water flow), 지중침투해석(Fluid flow in subsurface) 및 흡입응력을 고려한 무한사면안정해석(Infinite slope stability analysis considering suction stress)을 융합하여 산사태 예측모델을 개발하였다. 그림 8은 강우시 지표수의 유출과 강우의 침투, 이를 고려한 무한사면의 안정성을 평가하기 위한 모식도이다. 그림에서 보는 바와 같이 강우시 우수는 지중 침투 및 지표 유출이 동시에 발생하게 되므로 지표수와 지하수에 대한 일체적인 유동해석을 적용하였고, 지중침투해석시 불포화 토층 내에서의 지하수 유동에 대한 물-공기의 2 Phase Flow 해석을 적용하였다. 그리고 지표수와 지하수의 상호작용을 고려하기 위하여 침투 및 용출해석을 적용하고, 자연사면에서의 얕은 파괴를 고려하여 흡입응력을 고려한 무한사면의 안정해석을 활용하였다. 본 예측모델은 사면안전율로 표현할 수 있으며, 국부지역 뿐만아니라 광역지역에도 적용이 가능하다. 그림 9는 본 예측모델을 이용하여 2014년 지리산 국립공원일대에서 발생된 산사태를 해석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태 발생구역에서 사면안전율이 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 다만 광역규모로 적용하는 경우 해석시간이 많이 소요될 수 있으므로 병렬화 기법과 같은 해석시간 단축방안을 고려해야 한다.

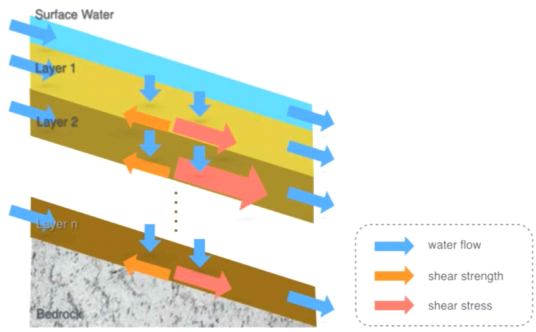
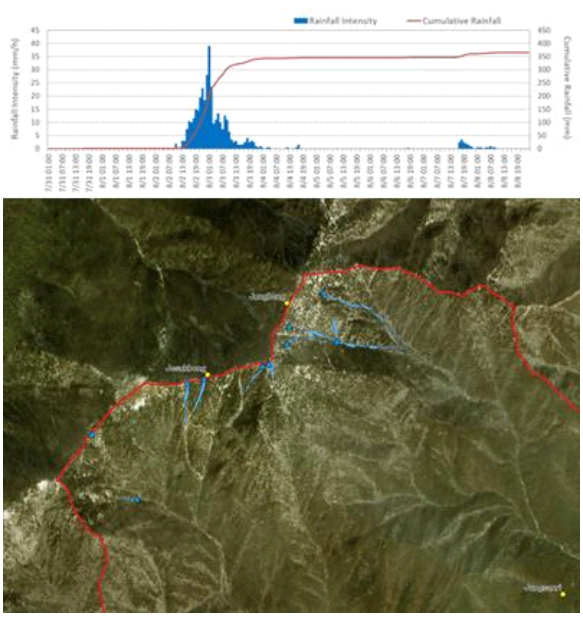


Fig. 8. Conceptual diagram of shallow landslide to develop prediction model.

3.4 물리기반 산사태 예측모델의 비교

표 2는 국내외에서 개발된 다양한 물리기반 산사



(a) rainfall data and landslides location

(b) Landslide prediction result

Fig. 9. Landslide prediction result using KIGAM model.

Table 2. Analysis and comparison of physically-based landslide prediction models.

Model name	Consideration of rainfall factor			Determina-tion of landslide hazard considering real time rainfall	Application of 3D ground-water flow in subsurface	Consider-ation of runoff flow on ground surface	Determination criteria of landslide		Slope stability analysis by soil depth
	Estimation of saturation depth ratio	Approxima-ted simulation of rainfall infiltration	Numerical simulation of rainfall infiltration				Rainfall amount	Safety factor of slope	
SINMAP	◯	-	-	×	×	×	-	◯	×
SHALSTAB	◯	-	-	×	×	×	-	◯	×
LISA	◯	-	-	×	×	×	-	◯	×
SLIP	◯	-	-	◯	×	×	-	◯	×
TRIGRS	-	◯	-	◯	×	◯	-	◯	◯
YS-SLOPE	-	◯	-	◯	◯	×	-	◯	×
$CR_{Critical}$	-	-	◯	◯	×	×	◯	-	×
KIGAM	-	-	◯	◯	◯	◯	-	◯	◯

태 예측모델을 서로 비교 검토한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 강우인자 고려형태, 실시간 강우를 고려한 산사태 위험성 판정, 지하수흐름 적용, 지표면 유출수 흐름 적용, 사면안전율 계산, 토심깊이별 위험도 분석 등을 고려하였다.

SINMAP, SHALSTAB, LISA 및 PISA 모델은 강우시 사면의 포화깊이비를 산정하여 해석을 수행하고 있으므로 정상상태의 사면안정해석모델에 해당한다. 따라서 해석이 간편하지만 정확도 측면에서는 다소 부족하다고 할 수 있다. TRIGRS와 YS-SLOPE 모델은 강우시 사면지반의 침투해석을 기존 수문학적 모델을 적용하고 있다. 유한요소법 혹은 유한차분법에 의한 수치해석결과에 비해 비교적 간편한 방법을 활용하고 있으며, TRIGRIS모델은 지표수 흐름을 고려하고 토심깊이별 위험분석이 가능한 장점이 있다. $CR_{Critical}$ 및 KIGAM모델의 경우 강우침투해석을 수치해석을 통해 산정하고 이를 사면안정해석에 적용하므로 비교적 정확한 결과를 제시한다. KIGAM모델의 경우 3차원 지하수 흐름과 지표수 흐름을 고려할 수 있으며, 실시간 강우에 따른 토심깊이별 사면안전율을 제시할 수 있다.

4. 산사태 조기경보시스템의 개발 현황

산사태 조기경보기술은 통계모델 혹은 물리기반 모델을 이용하여 산사태 발생가능성을 예측한 결과와 기상자료 특히, 강우 예보자료를 종합적으로 분석하여 산사태 위험지역에 대한 조기경보를 사전에 발령하는 것이다. 산사태 예측은 공간적 예측과 시간적 예측을 모두 포함한 것이며, 산사태 조기경보를 위해서는 사전 강우 예보자료를 이용하여 산사태 예측을 수행하고 이를 조기경보에 활용하는 것이다. 산사태 예측시 앞서 설명한 통계모델 혹은 물리기반 모델을 적용하여 산사태 발생가능성을 평가하고, 평가결과를 토대로 산사태 위험지역을 선정하게 된다. 산사태 위험지역을 대상으로 조기경보를 발령함으로서 위험지역에 대한 인적 및 물적피해를 최소화하는 것이 산사태 조기경보시스템의 개발 목적이다. 효과적인 산사태 조기경보시스템을 운영하기 위해서는 산사태 경보발령시 적절한 대비전략이 필요하며, 일반 국민들은 산사태 경보단계별 의미와 그에 따른 대비방법을 숙지하고 있어야 한다.

일본, 미국, 홍콩, 대만, 이탈리아 등 산사태 연구 선진 국가들에서는 전반적으로 기상청이나 시 단위, 또는 재난관리 기관들의 주관 하에 전국범위를 대상으로 웹 서비스 기반의 산사태 조기경보시스템을 개발이 완료된 상황이다. 표 3은 국내외 산사태 조기경보시스템의 개발 현황을 요역 및 정리한 것이다. 이들 국가에서 산사태 조기경보를 위한 주요 분석자료로는 예측 또는 관측된 강우자료를 활용한 통계모델을 적용하고 있다. 국내에서는 산림청이 전국적으로 조기경보시스템을 운영하고 있으며, 한국지질자

Table 3. Development of landslide early warning system in Korea and aboard.

Country	Operating institution	Prediction area	Analysis data	Method to issue
Korea	KFS	Nationwide	Rainfall data (forecast)	Web service and text message from local government (https://sansatai.forest.go.kr/)
	KIGAM	Mt. Jiri area	Rainfall data (forecast) and soil properties	Web service (closed)
Japan	JMA	Nationwide	Rainfall data (forecast)	Web service (https://www.jma.go.jp/bosai/en_risk/)
	Kobe	Mt. Rokko area	Rainfall data (forecast) and soil properties	Web service (closed)
USA	USGS	6 states (CA, WA, CO etc)	Rainfall data (forecast/ measurement)	Web service (https://www.usgs.gov/programs/ landslide-hazards)
Hong Kong	GEO	Nationwide	Rainfall data (measurement)	TV, Radio etc.
Taiwan	NCDR	Nationwide	Rainfall data (forecast/ measurement)	Web service (https://246.swcb.gov.tw/)
Italy	IRPI	Nationwide	Rainfall data (forecast/ measurement)	Web service (http://sanf.irpi.cnr.it/)

KFS: Korea Forest Service
KIGAM: Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
JMA: Japan Meteorological Agency
USGS: The United States Geological Survey
GEO: Geotechnical Engineering Office
NCDR: National Science and Technology Center for Disaster Reduction
IRPI: Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (Research institute for geo-hydrological protection)

원연구원에서는 지리산 일대를 테스트베드로 선정하여 웹 기반의 조기경보시스템을 개발하여 시범운영하고 있다. 한편, 일본의 료코산 일대와 한국의 지리산 일대에 대하여 물리기반 모델을 적용한 산사태 조기경보시스템이 시범적으로 운영되고 있다. 이탈리아의 경우 물리기반 모델을 개발하여 현장 적용성을 검토한 바 있다.

4.1 국내 산사태 조기경보시스템 개발 현황

4.1.1 산림청

산림청에서는 기상청 강우자료(동네예보)를 분석하여 탱크모형을 통해 권역별 산사태 토양함수지수를 분석하고, 예측기준에 따라 읍·면·동 별 단위 예측정보를 제공하고 있다. 기상청 동네예보로는 수치예측 모형을 통해 5 km × 5 km 격자단위 강우정보 형태로 활용하고 있다. 권역을 구분하는 방법으로는, 전국을 강우분포와 지질특성을 고려하여 구분하고 있다. 먼저, 1987년부터 2007년까지 7~9월 평균 강우량의 분포를 이용하여 4개 권역으로 구분하였다(1권역: 600-1,100 mm, 2권역: 550-900 mm, 3권역: 650-850 mm, 4권역: 500-800 mm). 지질특성으로는 전국을 크게 화성암류(1권역), 변성암류(2권역), 퇴적암류(3권역)로 분류하여 이들 결과를 강우분포에 따른 4개 권역들과 중첩시켜 최종적으로 전국을 총 11개 권역으로 구분한다. 산사태 조기경보 기준으로는, 권역별로 과거 산사태 발생 이력분석 결과를 토대로 토양내 빗물의 양을 토양함수지수로 산정하였는데, 주의보 발령 기준은 권역별 토양함수

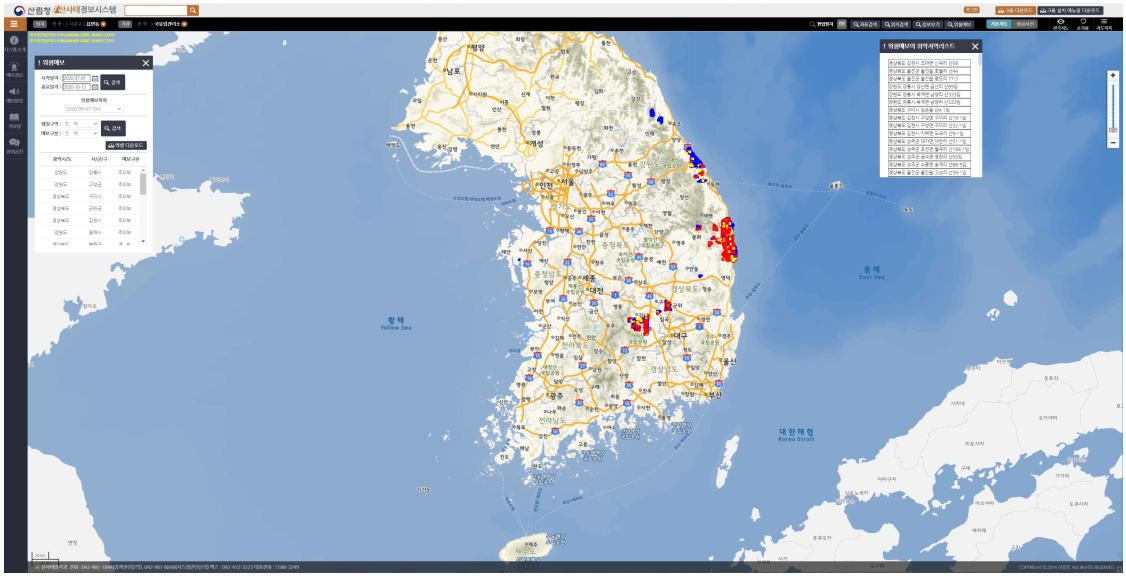


Fig. 10. Landslide information system of the Korea Forest Service.

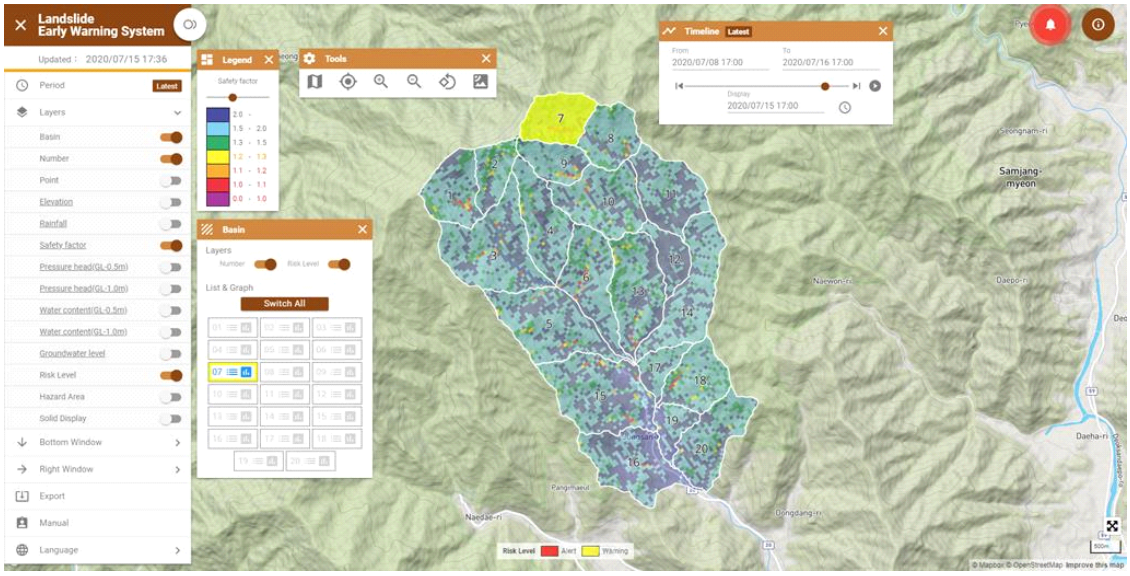


Fig. 11. Landslide early warning system of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.

지수 80% 도달시, 경보 발령 기준은 권역별 토양함수지수 100% 도달시 이다.

4.1.2 한국지질자원연구원

한국지질자원연구원에서는 자체 개발한 강우에 따른 물리기반 불포화 사면 산사태 발생 예측기술에 기상레이더 자료를 이용한 사전 기상정보 분석/예측 시스템을 연동하여, 산사태 조기경보시스템을 구축하였다. 물리기반의 산사태 발생 예측기술은 강우로 인한 지표의 유출수 흐름해석, 지중내 3차원 침투수 흐름해석(전수두 개념) 및 흡입응력을 고려한 불포화 무한사면 안정해석으로 구성되어 있다. 사전 기상정보 분석/예측 시스템은 국내 기상청에서 제공하는 강우 예보자료(LDAPS : Local Data Assimilation

and Prediction System)와 일본 기상레이더 자료(MSM : Meso-Scale Mode, LFM : Local Forecast Model)를 이용한 예측강우량 산정을 통하여 1일전 사전 강우정보를 실시간으로 취득하고 있다. 현재 지리산 일대 테스트베드에서 시범운영되고 있는 프로토타입 조기경보시스템에서는 1일전 실시간 사전예측 강우량을 산정하고 이를 토대로 산사태 위험도를 산정하여 1일 전 산사태 조기경보 발령이 가능하며, 현재 운영중에 있다. 특히, 물리기반 산사태 발생 예측 시 입력인자인 지반정수에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 자료에 대한 불확실성을 해소하였으며, 소유역별 사면안전율을 토대로 산사태 예경보 기준을 제시하여 산사태 조기경보를 발령하고 있다.

4.2 국외 산사태 조기경보시스템 개발 현황

4.2.1 일본

일본 기상청에서는 기상레이더 자료(MSM, LFM 등)를 이용하여 강우를 예측하고 있으며, Tank 모형을 이용하여 다섯 단계의 경보를 발령할 수 있도록 산사태 조기경보시스템을 구축하고 있으며, 실시간 산사태 위험지도를 제공하고 있다. 일본 기상청의 경우 현재 산사태, 홍수, 침수 등의 실시간 예측자료를 웹 기반으로 국민들에게 공공서비스로 제공하고 있다. 한편, 일본 고베시에서는 료코산 일대에 X-band 레이더 자료를 이용하여 강우를 예측한 자료를 물리기반 모형을 이용한 산사태 발생가능성 예측 연구에 접목하여 조기경보를 발령하는 프로젝트를 수행하였으며, 현재 운영 중에 있다.

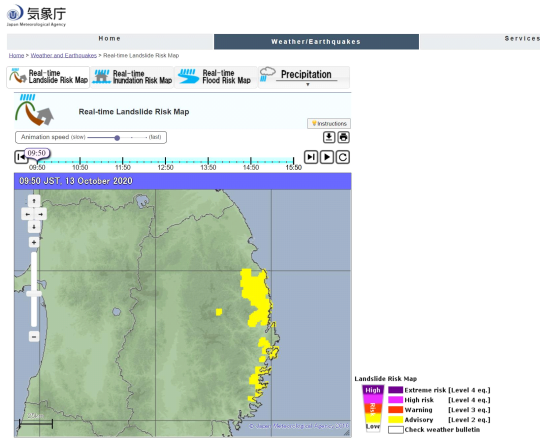


Fig. 12. Real-time landslide risk map of Japan.

4.2.2 미국

미국의 토석류 산사태 조기경보시스템은 미국의 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)-USGS에서 운영하고 있다. 토석류 산사태 조기경보시스템에서는 기상위성에서 제공하는 기상레이더 자료를 이용하여 강우를 예측하고, 강우 예측자료를 이용한 통계적인 방법을 이용하여 토석류를 예측하고 있다. 현재 캘리포니아주, 워싱턴주, 콜로라도주 등의 6개 주에 대한 산사태 조기경보시스템이 웹 기

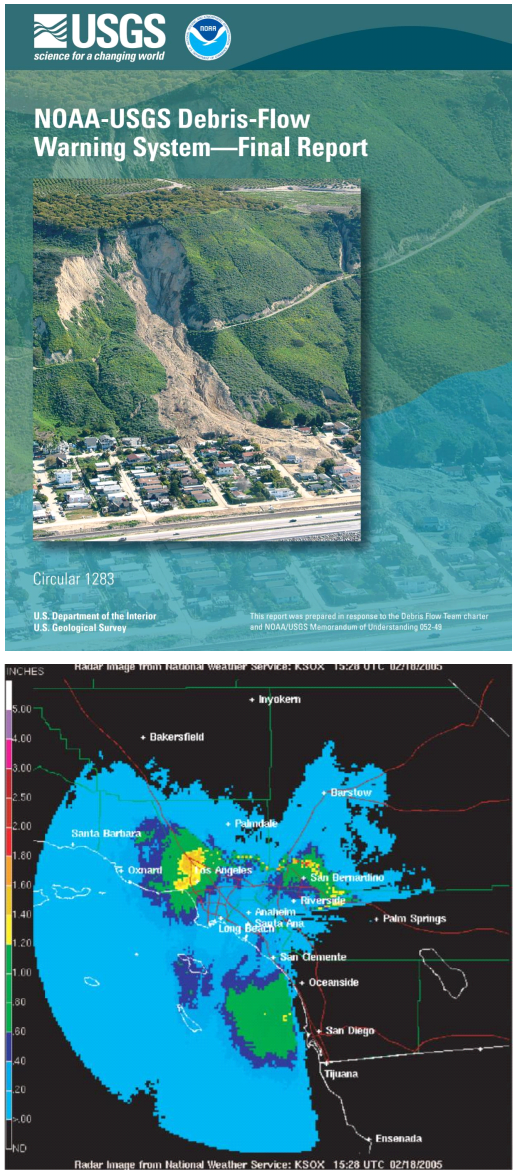


Fig. 13. Debris flow warning system of USA.

반으로 운영중에 있으며, 현장에 모니터링 스테이션을 구축하여 예측결과를 검증하였다. 그리고 본 시스템에서는 실시간 폭우 발생 시 직접적인 대피요령에 대한 내용이 제공되고 있으며, 토석류 및 산불, 홍수 등에 대한 종합적인 정보가 제공되고 있다.

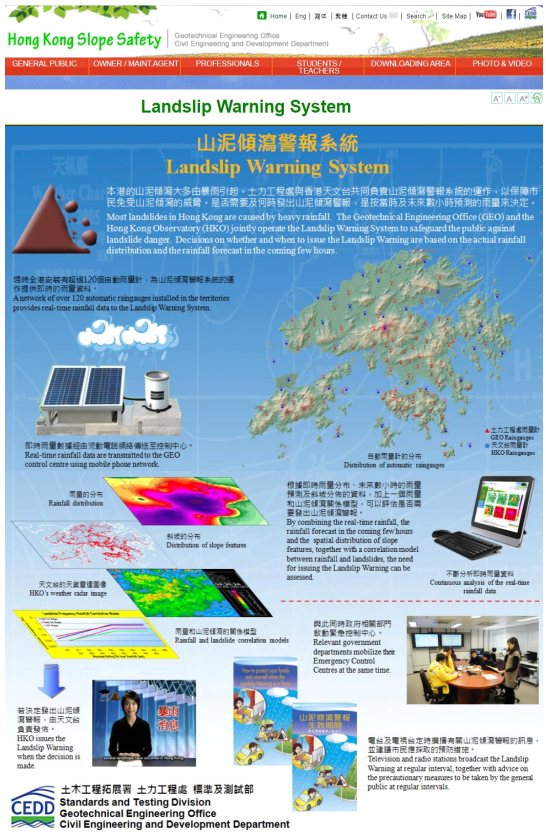


Fig. 14. Landslip warning system of Hong Kong.

4.2.3 홍콩

홍콩은 국가적으로 정부에서 사면 전수조사를 실시하고 강우에 의한 산사태 예경보시스템을 구축하여 운영하고 있다. 특히 산사태 관리를 위한 정부조직을 구성하고 있으며, 산사태 조기경보시스템은 홍콩 Geotechnical Engineering Office (GEO) 및 Observatory에서 관리 및 운영되고 있다. 홍콩의 산사태 조기경보시스템은 홍콩 전역에 분포한 120개 지역의 실시간 강우자료가 수집 및 분석되고 있으며, 실시간 강우자료를 바탕으로 GEO에서 분석을 실시한 후 Observatory에서 산사태 경보 발령 여부에 대해 결정한다. 이들 경보에 대한 정보는 TV 및 라디오와 같은 대중매체 경로를 통하여 전파되고 있다.

4.2.4 대만

대만의 경우 재난관리 본부인 NCDR에 있는 Central Emergency Operation Center (CEOC)에 산사태 조기경보 정보를 제공하고 있다. 대만에서는 경험적 강우규준인 ID (강우강도-지속시간) 곡선을 지역별로 작성하여 활용하고 있으며, 산사태와 토석류를 물리적으로 통합 해석하여 토석류 재해로 관리하고 있다. 재해 발생지역(산사태, 홍수, 지진 등)에 대해

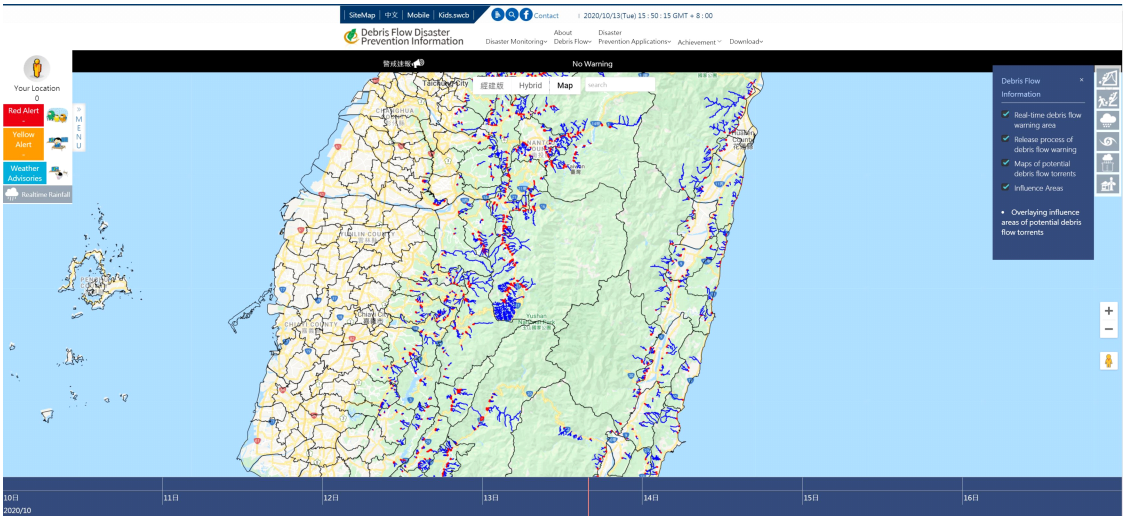


Fig. 15. Debris flow disaster prevention information of Taiwan.

Table 4. Comparison of domestic and foreign technologies on landslide early warning system.

Country	Operating institution	Landslide prediction model	Classificat-ion	Features
Korea	KMA	- Tank model using rainfall forecast information	Statistical model	- Classification into 11 districts considering geological conditions
	KIGAM	- Rainfall prediction using rainfall radar data - Physically-based model for unsaturated infinite slope stability analysis	Physically-based model	- Assessment of landslide hazard linked with predicted rainfall information - Considering rainfall infiltration and runoff, unsaturated characteristics in soil layer
Japan	JMA	- Tank model using rainfall forecast information - Statistical analysis on landslide occurrence area	Statistical model	- Integrated analysis of tank model result and landslide occurrence data
	Kobe	- Rainfall prediction using rainfall radar data - Physically-based model for unsaturated infinite slope stability analysis	Physically-based model	- Rainfall prediction using X-band radar data - Calculation of safety factor of slope using physically-based model
USA	USGS	- Rainfall prediction using rainfall radar data - Statistical model of debris flow prediction using previous inventory data	Statistical model	- Rainfall prediction using rainfall radar data from NOAA - Comparative verification of prediction results through field monitoring
Hong Kong	GEO	- Statistical model of landslide prediction using rainfall data - Estimation of threshold using rainfall information (IDF) in case of landslide	Statistical model	- Utilization of data from more than 400 rainfall observatory stations - Utilization of measured rainfall and weather radar data
Taiwan	NCDR	- Rainfall prediction using rainfall radar data - Estimation of threshold using rainfall information (ID) in case of landslide	Statistical model	- Suggestion and utilization of ID curve for the whole area of Taiwan - Operation of mobile debris flow monitoring center
Italy	IRPI	- Optimal rainfall prediction using mesured and predicted rainfall - Estimation of threshold using rainfall information (ED) in case of landslide	Statistical model	- Landslide prediction using ED curve for the whole ared of Italy - Development of physically-based model through rainfall prediction

서는 웹 기반으로 통합적 관리가 수행되고 있으며, TV, 라디오, 인터넷 등 다양한 경로를 통해 경보가 발령되고 있다.

4.2.5 이탈리아

이탈리아의 경우 이탈리아 전역에 대하여 경험적 강우규준인 ED (누적강우-지속시간) 곡선을 이용하여 산사태 예측을 실시하고 있다. 과거 96시간까지의 강우자료와 24시간 이후 강우자료를 활용하여 산사태 발생가능성을 예측하고 조기경보를 발령하는 시스템(SANF)을 구축하고 있으며, 모든 정보는 웹 기반으로 제공를 제공하고 있다. 강우 레이더자료를 활용하여 물리기반 모형(HIRESSS)을 개발하여 적용성 검토를 수행하고 있으며(Rossi *et al*., 2013), 최근에는 전국 주요도로 인근에서의 산사태 예측을 통한 조기경보를 진행하고 있다.

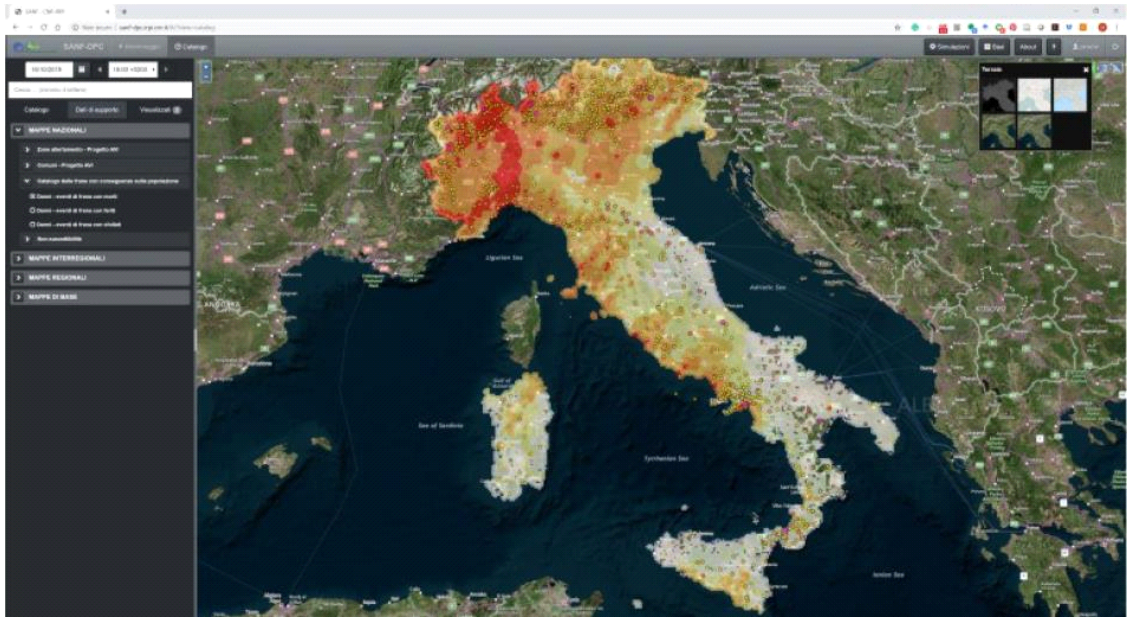


Fig. 16. Landslide early warning system of Italy.

4.3 국내외 산사태 조기경보시스템의 비교

국내외 산사태 조기경보시스템을 분석한 결과 대부분의 국가에서 강우 레이더자료를 이용하여 정확도가 향상된 강우 예보자료를 실무에 적용하기 시작하고 있음을 알 수 있다. 미국과 홍콩, 대만은 아직까지 전국적인 산사태 관리에 통계적인 모형에 의존하고 있으며, 물리기반 모형의 적용 연구는 실용화 단계에는 도달하지 않은 것으로 확인되었다. 이탈리아와 일본에서는 최신의 고도화된 해석기술을 탑재한 물리기반 모형들을 개발하였으며, 실제 조기경보 체계에 시범적으로 적용하기 시작하였다. 국내에서도 한국지질자원연구원의 경우 고도화된 물리기반의 산사태 예측기술과 사전 예측된 강우정보를 활용하여 테스트베드를 대상으로 시험운영하고 있는 것으로 조사되었다.

5. 결 론

최근 기후변화로 인하여 다양한 재난 위험성이 증대되고 있으며, 환경변화로 인한 지질재해의 위험에 대한 지역사회의 취약성이 증가되고 있다. 이러한 기후변화 추세는 산사태 발생패턴을 변화시키고, 발생 빈도와 규모 또한 증가시키고 있다. 이와 동시에 국내 도심지 확장 및 거주지 개발이 지속적으로 산지지역까지 확장됨에 따라, 산사태로 인한 인적, 물적 피해는 급증하고 있다. 산사태 피해저감을 위하여 재해 관리자 또는 대응 결정권자에게 신뢰성 있고 정확한 예측정보를 제공하고, 산지에 인접하여 살고 있는 주민들에게 신속하게 조기경보를 발령할 수 있는 기술이 시급하게 요구되는 상황이다.

이와 같이 기후변화로 인한 산사태 재해 증가 및 산사태 조기경보시스템의 필요성이 확대됨에 따라 국내외 산사태 조기경보시스템을 조사 및 분석하고 비교하여 보았다. 국내에서는 현재 산림청이 전국적으로 조기경보시스템을 운영하고 있으며, 한국지질자원연구원에서는 지리산 일대를 테스트베드로 선정하여 웹 기반의 조기경보시스템을 개발하여 시범운영하고 있다. 한편, 국외 산사태 분야의 방재선진국인 일본, 미국, 홍콩, 대만, 이탈리아 등에서는 기상청, 재난관리기관 등의 주관 하에 전국을 대상으로 웹 서비스 기반의 산사태 조기경보시스템을 개발하였으며, 현재 운영중에 있음을 알 수 있다.

산사태 조기경보시스템의 경우 사전 강우정보를 활용하여 산사태 발생시간, 발생위치, 피해범위를 사전에 예측하여 산사태 조기경보를 발령함으로서 산사태 피해저감을 위한 골든타임을 확보하여야 한

다. 이러한 국내외 산사태 조기경보기술에 대한 연구개발 동향을 조사 및 분석하여 현재 산사태 조기경보시스템에 대한 개선방향을 모색하고, 미래의 산사태 조기경보시스템에 대한 고도화 방향을 선정하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “실시간 도시지역 산사태 조기경보기술 및 지질환경 오염물질 위험관리기술 개발”과제(Grant No. 22-3412-1)와 “자연사면 산사태유발 고유연속강우량 원심모형실험 검증 및 산출모델 개발”과제(Grant No. 22-3812)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Anderson, M.G. and Lloyd, D.M., 1991, Using a combined slope hydrology-stability model to develop cut slope design charts. In proceedings of the institution of civil engineers, part 2 (91).

Baum, R.L., Savage, W.Z. and Godt, J.W., 2008, TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. version 2.0 (No. 2008-1159). US Geological Survey.

Caine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 62, 23-27.

Cannon, S.H. and Gartner, J.E., 2005, Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. In: Debris flow hazards and related phenomena, edited by: Jakob, M., and Hungr, O., 363-385.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and The United Nations office for Disaster Risk Reduction (CRED and UNDRR), 2020, Human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019).

Choi, G.Y., Kwon, W.T., Boo, K.O. and Cha, Y.M., 2008, Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 43, 681-700 (in Korean with English abstract).

Choi, Y., 2004, Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea. Journal of the Korean Geographical Society, 39, 711-721 (in Korean with English abstract).

Choi, Y., Kim, M.G., Kim, Y.J. and Park, C., 2011, Characteristics and changes of extreme precipitation events in the Republic of Korea, 1954-2010: their magnitude, frequency, and percent to total precipitation. Journal of Climate Research, 6, 45-58 (in Korean with English abstract).

Clarizia, M., Gulla, G. and Sorbino, G., 1996, Sui meccanismi di innesco dei soil Slip. In: International conference Prevention of hydrogeological hazards: the role of scientific research, 1, 585-597 (in Italian).

Green, W.H. and Ampt, G.A., 1911, Studies on soil physics, Part I : The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, 4, 1-24.

Crosta, G.B. and Frattini, P., 2001, Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms, edited by Mugnai, A., Guzzetti, F., and Roth, G., Siena, Italy, 463-487.

Guzzetti, F., Gariano, S.L., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Marchesini, I., Rossi, M. and Melillo, M., 2020, Geographical landslide early warning systems. Earth-Science Review, 200, 102973.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. and Stark, C.P., 2008, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides, 5, 3-17.

Ham, D.H. and Hwang, S.H., 2014, Review of landslide forecast standard suitability by analysing landslide-inducing rainfall. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 14, 299-310 (in Korean with English abstract).

Hammond, C.J., Prellwitz, R.W. and Miller, S.M., 1992, Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation. In Proceedings of 6th international symposium on landslides, Christchurch, New Zealand, 2, 251-294.

Haneberg, W.C., 2004, A rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment. Environmental and Engineering Geoscience, 10, 27-43.

Innes, J.L., 1983, Debris-flows. Progress in Physical Geography, 7, 469-501.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021, 6th Assessment Report-AR6, Working group 1.

Jung, I.W., Bae, D.H. and Kim, G., 2011, Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea. International Journal of climatology, 31, pp. 359-370.

Kim, J., Lee, K., Jeong, S. and Kim, G., 2014, GIS-based prediction method of landslide susceptibility using a rainfall infiltration-groundwater flow model. Engineering Geology, 182, 63-78.

Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W. and Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. Engineering Geology, 75, 251-262.

Kim, K.S. and Song, Y.S., 2015, Geometrical and geotechnical characteristics of landslides in Korea for various geological conditions. Journal of Mountain Science, 12, 1267-1280.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

(KIGAM), 2019, Landslide early warning and risk control technology of geo-environmental hazards for climate change adaptation (GP2017-017-2019). Ministry of Science and ICT, 455 p (in Korean with English Summary).

Lee, J.S. and Kim, Y.T., 2017, Development of optimum rainfall threshold to predict of rainfall-induced landslides occurrence. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 17, 333-340 (in Korean with English abstract).

Lu, N. and Godt., J., 2008, Infinite-slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resources Research, 44, W11404.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1994, A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water resources research, 30, 1153-1171.

Montrasio, L., 2000, Stability analysis of soil-slip. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 45, 11 p.

National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012, Global Climate Change Report 2012, 100 p.

Ng, C.W.W. and Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. Computers and Geotechnics, 22, 1-28.

Oh, J. and Park, H.J., 2013, Establishment of landslide rainfall threshold for risk assessment in Gangwon area. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 13, 43-51 (in Korean with English abstract).

Pack, R.T., Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N., 1998, The SINMAP approach to terrain stability mapping. Proc. on the International Association for Engineering Geology and the Environment, 1157-1165.

Park, J.Y., Lee, S.R., Lee, D.H., Kim, Y.T. and Lee, J.S., 2019, A regional-scale landslide early warning methodology applying statistical and physically based approaches in sequence. Engineering Geology, 260, 105-193.

Piciullo, L., Calvello, M. and Cepeda, J.M., 2018, Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. Earth-Science Review, 179, 228-247.

Rossi, G., Catani, F., Leoni, L., Segoni, S. and Tofani, V., 2013, HIRESSS: a physically based slope stability simulator for HPC applications. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 151-166.

Shaw, S.C. and Johnson, D.H., 1995, Slope morphology model derived from digital elevation data. Northwest Arc/Info Users Conference, 12.

Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G. and Rigon, R., 2008, Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. Hydrological Processes: An International Journal, 22, 532-545.

Song, Y.S., 2013, Stability analysis of the unsaturated infinite slope considering suction stress under steady infiltration condition, Journal of the Korean Geotechnical Society, 29, 5-15 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., Chae, B.G. and Lee, J.T., 2016, A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall. Engineering Geology, 210, 84-92.

Song, Y.S. and Hong, W.P., 2011, Analysis of slope stability with consideration of the wetting front and groundwater level during rainfall. The Journal of Engineering Geology, 21, 25-34 (in Korean with English abstract).

Song, Y.S., Hong, W.P. and Woo, K.S., 2012, Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall. Engineering Geology, 129-130, 56-67.

van Beek, L.P.H., 2002, Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment. Ph.D. thesis, Utrecht University, Netherlands, 360 p.

Wu, W. and Sidle, R.C., 1995, A distributed slope stability model for steep forested basins. Water resources research, 31, 2097-2110.

Yune, C.Y., Jun, K.J., Kim, K.S., Kim, G.H. and Lee, S.W., 2010, Analysis of slope hazard-triggering rainfall characteristics in Gangwon province by database construction. Journal of the Korean Geotechnical Society, 26, 27-38 (in Korean with English abstract).

Received : August 24, 2022
Revised : September 28, 2022
Accepted : October 9, 2022