한국의 경사지 붕괴 예·경보 시스템에 관한 연구

Study of Korea Early Warning System for Slope Failure

최선규* · 정향선** · 송효성*** · 권태혁**** · 김영철***** · 이정민*****

Choi, Sun-Gyu*, Jeong, Hyangseon**, Song, Hyo-Sung***, Kwon, Tae-Hyuk****, Kim, Youngchul*****, and Lee, Jung-Min*****

Abstract

This paper studied the current and future of an early warning system (EWS) for slope failure. Details of the developed Korea EWS were reviewed and compared; its future was then predicted by the studied results and global trends. Slope failure mechanisms for the Korea EWS were developed based on rainfall, rainfall with ground/geology characteristics, and measurement results using measuring equipment. Among the early warning systems, 5 types of models (Half-period, Soil Water Index, Continuous rainfall, Rainfall Triggering Index, and measuring equipment) were analyzed. Afterwards, 4 models (excluding measuring equipment) were compared. Finally, the future of the Korea EWS was predicted within the Korea Smart City System.

Key words : Landslide, Slope, Rainfall, Early Warning System, Smart City

요 지

본 논문은 국내외에서 개발된 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 연구하였다. 특히, 국내의 경우 개발된 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 비교·분석하였으며, 향후 시스템의 발전 방향에 대하여 전망하였다. 국내의 경우, 경사지 붕괴 예·경보를 위한 붕괴 메커니즘은 강우, 강우와 지반/지질 특성 그리고 변위로 대표되는 계측기기를 이용한 3가지 방법에 의해 개발된 특징이 있다. 이에 따라 다양한 예·경보 모델이 개발되었으며 본 논문에서는 5 종류의 모델(반감계수, 토양함수지수, 연속강우, 강우경보지수 및 계측기기 기반)을 소개하였으며, 비교 가능한 4 종류(계측기기 기반 제외)를 비교·분석하였다. 마지막으로 현재 국가 단위에서 진행 중인 예·경보 모델 개발 방향과 향후 발전에 대해 기술하였다.

핵심용어 : 산사태, 급경사지, 강우, 예·경보 시스템, 스마트시티

1. 서 론

오랜 기간에 걸쳐 기후는 자연적이거나 인공적인 발생 요인에 의해 변화가 이루어지고 있다. 자연적 발생 요인으로 는 태양과 지구의 관계 변화와 태양 활동도, 화산활동, 해양변

동 및 지구의 자전축 기울기의 변화와 공전 궤도의 변화, 근일점과 원일점의 변화 등이 있다. 인공적인 원인으로는 산업화 시대 이전으로부터 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 이산화질소(NO₂) 등의 인위적 온실가스(Green House Gas, GHG) 배출이 주원인이며 그 밖에 산림파괴 및 환경변화

*교신저자, 정회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원(Tel: +82-52-928-8462, Fax: +82-52-928-8199, E-mail: sungyuchoi@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

**국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원(E-mail: jhs99@korea.kr)

Senior Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

***국립재난안전연구원 방재연구실 연구원(E-mail: song32@korea.kr)

Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

****정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수(E-mail: t.kwon@kaist.ac.kr)

Member, Associate Professor, Civil & Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

*****한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수(E-mail: youngchulkim@kaist.ac.kr)

Assistant Professor, Civil & Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

*****정회원, 토지주택연구원 건설기술 연구실 수석연구원(E-mail: andrew4502@lh.or.kr)

Member, Head Researcher, Construction Technology Research Department, Land & Housing Institute

등이 있다. 최근 위의 요인들로 인해 기후가 급격히 변하고 있으며 다양한 변화가 관측되고 있다. 이러한 변화들 중 일부는 인간과 관련된 것으로 극한의 현상(극한 저온 현상, 극한 고온 현상), 극한 해수면 변화, 태풍 및 강우 빈도 증가 등이 있다(IPCC, 2014). 이상 기온으로 인한 태풍, 강우는 산사태 및 경사지 붕괴와 밀접하게 연관되어 있으며 이를 예방하기 위한 관련 연구들이 수행되고 있다(Derbyshire, 1976; Brand et al., 1984). 한국의 경우 기후변화 및 온난화로 인하여 연평균기온은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며 기후적 영향으로 6-9월은 장마전선의 영향을 받아 여름철 강우가 집중 되어 있다(Choi et al., 2010; Lee et al., 2011). 뿐만 아니라 지형적으로는 국토의 약 64%가 급경사지역이며 지질적으로 마사토의 비중이 높아 기후적, 지형적으로 산사태 및 경사지 붕괴(이하 경사지 붕괴)가 빈번히 발생하는 특징이 있다. Fig. 1은 최근 10년간(2003-2012) 자연재해 중 유형별 인명피해를 나타내고 있으며 산사태의 경우 약 27.5%로 높은 비중을 차지하고 있다. 특히 산사태로 인한 토석류는 약 98%가 집중호우, 태풍 및 장마로 인해 발생하여 호우와 직접적인 연관이 있는 것으로 확인되었다(Ryu et al., 2013).

Fig. 1. Casualties Versus Various Natural Disasters (Ryu et al., 2013)

(a) Annual trend of landslide damage area and recovery costs

(b) Recovery cost/damage area ratio

Fig. 2. Relationship Between the Damage Area/Recovery Cost and Year

경사지로 인한 피해도 막대하다. Fig. 2(a)는 산사태로 인한 피해지역의 면적, 이로 인한 복구비용 및 대형 경사지 피해와 태풍의 영향을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 피해면적이 증가할수록 그에 대한 복구비용 또한 증가한 것으로 확인되었다. 또한, 2002, 2003, 2006년 등과 같이 피해 지역과 복구비용이 크게 증가한 해는 태풍에 의한 피해연도와 일치한다. 이 또한 경사지에 의한 피해 면적과 복구비용이 태풍에 직접적으로 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 2(b)는 산사태로 인한 복구비용과 피해지역의 면적 비를 나타낸 것이다. 복구비용/피해지역 비는 시간에 따라 기하급수적으로 증가하는 경향을 보였다. 현대 사회는 도시에 인적, 물적 자원이 집중됨에 따라 복구비용/피해지역 비가 증가하는 경향을 보이고 있으며 이러한 경향은 더욱 증가할 것으로 전망된다.

이와 같이 경사지에 대한 관심이 높아지고 있으며 이를 대응하기 위하여 국내외에서 강우와 경사지의 상관관계에 관한 연구, 지질특성에 따른 경사지 붕괴에 관한 연구(Kim et al., 2007; Kim et al., 2015), 고해상 영상레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 및 차분간섭기술을 이용한 고해상 영상레이더(Differential Interferometric SAR, DInSAR) 기술을 이용한 연구(Luzi et al., 2007; Yoo et al., 2009) 등 다양한 연구들이 활발히 진행 중이다.

뿐만 아니라 경사지 붕괴에 대해 선제적으로 대응하기 위하여 사방댐 건설 등의 피해 대책에 관한 연구가 수행 중에 있으며(Choi et al., 2017; Choi et al., 2018), 특히, 최근에는 경사지 붕괴 메커니즘 분석을 통한 산사태 붕괴 예·경보 시스템 개발에 관한 연구가 활발히 진행 중이다(Baum and Godt, 2010; Capparelli and Tiranti, 2010; Lee et al., 2015; Jun and Kim, 2017).

경사지 붕괴 예·경보 시스템은 사회 현상과 피해 등을 고려하면 연구의 중요성 및 개발의 당위성은 날로 증가할 것으로 전망된다. 따라서, 본 논문에서는 국내에 개발된 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 분석 및 비교 하였으며, 추후 연구 및 개발될 예·경보 시스템을 전망하였다.

2. 국내외 경사지 붕괴 예·경보 시스템 개발 현황

2.1 국외 경사지 붕괴 예·경보 시스템

시민의 인명 및 재산을 보호하고 삶의 질을 개선하기 위한 경사지 붕괴 예·경보 시스템은 국내외적으로 활발히 개발 및 운영 중이다.

국외의 경우, 일본에서는 고속도로조사회(JHO, 1988)는 지표면위 속도를 기준으로 예·경보 시스템을 일(day) 변위 기준으로 제안하였으며, 산사태학회에서는 사면붕괴에 대한 대피 기준을 시간(hour)당 변위속도를 기준으로 대피 기준을 제안하였다. 또한, 일본 국토교통성(MLIT, 2007)은 지방자치단체에서 사용 가능한 토사재해 경보 및 대피 지침을 제안하였다. 대만의 경우 국가 과학기술 프로젝트(the National Science & Technology Center for Disaster Reduction, NCDR)를 통해 전국 단위의 DB 구축 및 평가 기술 개발을 통한 실시간 모니터링을 시스템을 개발하였다. 이를 통하여 토석류 발생 시 주민을 기준에 따라 대피시키는 재난 대비 체계를 구축 및 운영 중에 있다. 홍콩의 경우 강우의 집중으로 매년 약 300회 이상의 산사태가 발생하며, 이를 대응하기 위해 강우데이터와 재해이력을 기준으로 산사태 경보 시스템을 적용하였다(Yu et al., 2004). 이탈리아의 경우 카사글리 교수가 제안한 급경사지의 거동을 연간 변위량을 기준으로 제안하였으며 연간 변위량의 기준은 1년, 3년 및 10년으로 설정하였다. 미국의 경우 지질조사국(United States Geological Survey)에서는 사우스캘리포니아를 대상으로 자료를 분석하였으며, 강우에 따라 피해 및 관련 기준을 설정하였다(USGS, 2004). 또한 미연방도로국(Federal Highway Administration, FHA)은 자동계측시스템을 구축하여 측정된 변위 속도를 기준으로 사면에 대한 예·경보를 개발하였다(Brawner, 1994). 이외에도 중국 및 뉴질랜드 등의 국가에서 급경사지 모니터링 시스템을 연구 및 구축하였다(Lee, 2015). 뿐만 아니라, 여러 연구자들에 의해 산사태 및 경사지 붕괴 예·경보 시스템에 관한 연구가 수행되었다(Sakaki et al., 2010; Anderson et al., 2011; Maskrey, 2011)

2.2 국내 경사지 붕괴 예·경보 시스템

국내에도 산사태 및 경사지 붕괴에 관한 많은 연구가 수행되었으며 최근 경사지 붕괴 메커니즘 분석 및 이를 통한 관리 기준 설정과 함께 예·경보 시스템을 제안 및 운영 중이다. 경사지 대피 기준은 크게 강우량, 강우와 지질 및 지반 그리고 계측기의 결과를 기준으로 개발되었다.

강우는 경사지 붕괴에 가장 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 많은 연구자들에 의해 강우와 경사지 붕괴의 상관관계를 연구하였으며, 이를 통한 급경사지 붕괴 주민 대피 기준 혹은 예·경보 시스템이 제안되었다. 산림청에서는 1988년부터 2013년까지 산사태 주의보 및 경보 기준을

연속강우량, 시간 강우량 및 일 강우량 자료를 활용하여 사용한 바 있으며, 이 외에도 많은 연구자들이 시간 강우량, 일 강우량, 누적강우량의 조합을 통해 산사태 유발 강우기준을 제시하였다(Lee, 1991; Kim & Jung, 2000; Kim, 2008; Kim et al., 2011; Jun et al., 2013). 또한 Hong et al. (1990)은 1977년부터 10년간 발생한 경사지 자료와 강우자료 분석을 통해 경사지 발생은 일강우량, 강우강도 및 누적강우량에 영향을 받으며 규모에 따라 강우특성이 달라지는 기준을 제시한 바 있다.

경사지 붕괴는 강우뿐만 아니라 지반인자(지반의 특성, 경사, 식생 등)에 영향을 받고 있다(Park et al., 2018). 따라서 연구자들은 강우, 지질 그리고 지반 특성을 고려한 경사지 붕괴 기준 및 예·경보 시스템을 개발하였다. 행정안전부(전 국민안전처)에서는 강우량 및 지역특성을 고려한 전국 단위의 주민대피 권고기준을 급경사지 관리 실무편람을 통해 발간 및 제시하였으며, 지역 및 지질의 특성을 고려한 강우기준을 15분, 1시간(최대강우량 기준) 및 1일, 2일(누적강우량 기준)로 설정하여 관리하고 있다. 또한 Park et al. (2018)은 부산 지역의 정보를 바탕으로 강우(강우강도, 투수계수, 선행강우 등)와 지질의 특성(경사각, 공학적 특성, 고도 등)을 고려하여 대피 기준을 개발하였다. 산림청 또한 2013년부터 강우자료와 지질특성을 고려하여 권역별 경사지 예·경보 시스템을 개발 및 운영 중에 있다.

마지막으로 강우와 지질의 특성뿐만 아니라 경사지 거동을 계측하여 예·경보 시스템을 개발하였다. Cheon et al. (2013)은 u-IT (Ubiquitous-Information Technology) 기술을 기반으로 상시계측 모니터링 시스템을 구축하였으며 계측 기법(지표변위, 함수비 및 간극수압) 계측결과에 따른 경사지 붕괴 관리기준을 설정하였다. 행정안전부는 사면 붕괴가 발생한 10개소의 현장 계측 데이터와 국내외 선행 연구에서 제시한 기준을 참고하여 계측기 종류(변위계, 경사계, 간극수압계, 함수비계, 하중계, 지하수위계)별 경사지 붕괴에 대한 주민대피 권고기준을 설정하였다. 특히 변위계에 따른 주민대피 권고 기준의 경우 누적변위와 변위속도 별 권고기준을 설정 및 제시되어 있다. 이와 같이 급경사지 붕괴와 관련하여 다양한 기준(강우, 강우+지질특성 및 계측기기)에 의해 연구되고 있다. Table 1은 경사지 붕괴 예·경보 기준때 개변수에 따른 참고문헌을 정리한 표이다.

3. 경사지 붕괴 예·경보 시스템의 분석 및 비교

본 장에서는 한국에서 개발된 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 비교·분석하였다. 많은 연구자들에 의해 경사지 붕괴 예·경보 시스템이 개발되었지만 본 논문에서는 반감계수, 토양함수지수, 연속강우, 강우경보지수 및 계측기기 기반의 예·경보 시스템을 정리하였다.

Table 1. Literature Reviews for Standard Parameters of Slope Failure/EWS

Type	Rainfall	Rainfall with geomechanical properties	Measuring instrument
References	Korea Forest Service Hong et al., 1990 Lee. 1991 Kim and Jung. 2000 Kim. 2008 Kim et al., 2011 Jun et al., 2013	Korea Forest Service Ministry of the Interior and Safety 2015 Park et al., 2018	Cheon et al., 2013 Ministry of the Interior and Safety 2015

3.1 반감계수 기반 예·경보 모델

국립재난안전연구원은 국내 유일의 재난안전 종합 연구 기관으로 경사지 재난과 관련하여 다양한 연구를 수행 중에 있으며 현재 세계 최대 규모의 급경사지 붕괴 시뮬레이터를 구축 및 운영 중에 있다. 또한 2007년부터 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 운영 중에 있으며 예·경보를 위한 알고리즘은 꾸준히 업데이트 되고 있다. 초기 예·경보 시스템은 반감계수를 이용한 붕괴 알고리즘으로 운영되었으며 예·경보 시스템 대피선 설정 기준은 1.5시간 및 72시간의 반감기로 산정하였다.

반감기란 특정 물질의 양이 반으로 줄어드는데 걸리는 시간으로, X 축으로는 72시간의 반감기와 Y 축으로는 1.5시간의 반감기를 나타내는 작용강우량을 예·경보의 기준으로 설정하였다.

기준선(표준선) 설정을 위한 작용강우의 계산식은 Eq. (1)과 같다.

$$R_W = \sum \alpha_{li} \times R_{li} \quad (1)$$

여기에서 R_W 는 작용 강우, R_{li} 는 i 시간 전의 1시간 강우강도, α_{li} 는 1시간 전의 감소계수, T 는 반감기(시간)를 뜻한다.

예·경보 시스템 구축을 위한 기준선의 설정 방법은 다음과 같다. 작용강우량의 결과와 실제 급경사지 붕괴시 발생한 유발강우(파괴시 작용강우) 관계를 통해 한계선(Critical Line, CL)을 설정한다. 즉, 작용강우가 유발강우에 도달하면 붕괴의 위험이 있으므로 파괴 발생 1시간 전의 작용강우와 파괴시의 작용강우를 이용하여 한계선을 설정한다. 또한 강우가 한계선에 도달 전 주민들의 안전한 대피를 위한 시간을 제시한 대피선(Evacuation Line, EL) 그리고 대피를 준비하는 시간과 대피장소로 이동하기 위한 시간을 고려한 경보선(Warning Line, WL)을 설정하였다. 뿐만 아니라, 최근 강우강도-강우기간, 총강우량-강우기간 등 다양한 기준에 의한 예·경보 시스템을 개발 및 검토 중에 있다.

3.2 토양함수지수 기반 예·경보 모델

앞에서 언급한 바와 같이 산림청에서는 1983년부터 과거 산사태 발생이력을 바탕으로 강우량에 의한 산사태 예·경

보를 발령해왔다. Table 2는 산림청에서 제시한 산사태 예·경보 기준이다.

Table 2. Landslide Criteria on Korea Forest Service (1983~2013)

Type	Caution	Alert
Rainfall hr (mm)	20	30
Rainfall/day (mm)	80	150
Accumulation rainfall (mm)	100	200

하지만 단일 기준에 의한 산사태 기준은 지질 및 공간의 특성을 반영하지 못하는 점과 선행 강우를 고려하지 못하는 점 등의 한계점으로 2013년도부터 토양함수지수(Soil Water Index)를 이용한 국가 산사태 예·경보체계를 구축 및 운영 중이다. 토양함수지수는 토양 내 물의 양 즉, 토양저류량(Soil water storage)에 의해 정의된다. 이는 강우에 의해 토양저류량이 변화하여 임계치를 넘으면 산사태가 발생하는 개념이다. 따라서 산사태시 토양저류량을 임계토양저류량으로 정의하고 이를 기준으로 토양함수지수를 결정한다(Lee et al., 2015). Eq. (2)은 토양함수지수를 나타낸다.

$$SWI(\%) = \frac{S_{current}}{S_{threshold}} \times 100 \quad (2)$$

여기에서 SWI는 토양함수지수, $S_{current}$ 는 현재 토양저류량, $S_{threshold}$ 는 임계토양저류량을 뜻한다.

산림청에서는 토양저류량을 산정하는 방법으로 탱크모델(Tank model)을 사용하였다. 이는 수문모델에서의 물의 유입과 유출을 계산하는 응답모델의 일종으로 Lee et al. (2009)에서 제안한 방법을 기반으로 개발하였다.

Lee et al. (2009)에서 제안한 산사태 예측 정보의 제공 과정은 다음과 같다. 714개의 관측소에서 강우를 4종류로 구분하였으며, 강우의 구분은 1987년부터 2007년까지의 7-9월의 평균 강우량 분포로 산정하였다. 또한 국내의 지질을 화성암, 변성암, 퇴적암의 3권역으로 분류하였다. 4종류의 강우와 3종류의 지질을 이용하여 12권역으로 구분하였으며 지질 특성이 유사한 2개 권역은 하나로 통합하여 최종적으

로 11개 권역으로 구분하였다. 마지막으로 11개 권역별로 과거 산사태 발생 이력분석 결과를 토대로 임계 토양저류량과 현재 토양저류량을 산정하였으며 Eq. (2)를 통해 최종적으로 토양함수지수를 산정하였다. 식에 의해 토양함수지수가 80%에 도달시 산사태 주의보를, 100%에 도달시 산사태 경보를 기준으로 경사지 예·경보 시스템을 운영 중에 있다.

하지만 산림청에서 운영 중인 예·경보 시스템은 국소적으로 발생하는 산사태 예측에는 한계가 있으므로, 산사태 발생 우려지역 주민에게 예·경보 발령 및 피해예방의 기초 자료로 활용되기도 한다.

3.3 연속강우 기반 예·경보 모델

한국과학기술원은 2018년 연속강우 기반의 광역도시 산사태 예·경보 모델을 개발하였다(Park et al., 2018). 먼저 ‘인공 및 항공영상 기술들을 활용한 간접적인 현장 조사’ 방법을 통해 1999년부터 2014년까지 부산지역에서 발생한 303개의 경사지 발생이력에 대한 DB를 구축하였다. DB 구축 후 실시간 경사지 예·경보 모델을 개발하였다. 예·경보모델은 극한강우 산사태 지수(Extreme Rainfall-Induced landslide Index, IERL), 강우강도-지속시간(Intensity-Duration), 강우한계선(ID), 산사태 민감도 지수(Landslide Susceptibility Index, ILS), 사면불안정 연속강우량 규준(Continuous Rainfall; CRFOS=1.3)과 토석류 전이규준(CRITDF)의 5가지 규준을 통하여 설정하였다.

극한강우 산사태 지수 산사태를 유발하는 강우 뿐 아니라 지반의 침투 및 불포화 특성을 고려하기 위해 극한강우 산사태 지수가 개발되었으며(Vasu and Lee, 2016), 이는 통계적 기반으로 정의된 지수로 투수계수, 토심, 함수특성곡선, 연속강우량, 20일 선행강우량, 투수계수, 토양함수능, 산사태 발생유무로 산정하였다. 강우강도-지속시간 강우한계선은 1999년부터 2014년까지 전국의 토사재해(산사태 포함) 자료를 이용하여 위험수준별 강우규준을 나타낸 방법이다(Kang and Kim, 2016). ID 규준은 예·경보의 ‘관심(Attention)’ 단계를 결정하는 방법으로 평균 강우강도와 강우 지속시간으로 산정하였다. 산사태 민감도지수는 산사태를 유발하는 14개의 고정인자들(지형학, 수문학, 토양, 산림학 및 지질학적 요소)을 영향 비중을 고려하여 분석하였다. 산사태 민감도 지수는 예·경보에서 ID 규준과 함께 적용된다. 사면불안정 연속강우량 규준은 경사지의 전단 파괴 위험성을 평가하는 방법으로 예·경보에서 ‘주의(Watch)’와 ‘경계(Alert)’를 결정한다. 강우에 따른 불포화 지반을 역학적 사면 안정성 계산을 통해 해당 사면의 역학적 불안정 상태(Factor of Safety ≤ 1.3)에 대응하는 강우특성(CR)을 도출하여 예·경보 시스템에 활용된다. 마지막으로 토석류 전이규준은 경험론적인 방법으로 토석류로 전이되는 지역을 판별하는 규준이다(Kang et al., 2017). 이는 서울, 경기도 및 강원도에서의 10가지 지형학적인 데이터를 통하여 사면

파괴와 토석류 발생 지역의 지형학적인 특성을 비교 분석하여 토석류 전이규준이 산정되었다. Fig. 3은 5가지 규준들을 통한 산사태 예·경보 등급 결정의 순서도이다.

Fig. 3. Decision Tree for Landslide Early Warning Levels (Park et al., 2018)

3.4 강우경보지수 기반 예·경보 모델

강원대학교에서는 2012년과 2013년도의 강원도에서 발생했던 산사태/토석류 42개소의 강우자료와 피해지역을 분석하여 강우경보지수(Rainfall Triggering Index, RTI)를 산정하였다(Nam et al., 2018). Lee (2006)에 의해 개발된 강우경보지수는 강우강도(I)와 누적강우량(Rt)를 이용하여 산정하였으며 계산식은 Eq. (3)과 같다.

$$RTI = I \times R_t \quad (3)$$

여기에서 I는 1시간 강우강도(mm/h), R_t 는 토석류 발생 직전까지의 누적강우량(mm)을 말한다.

토석류 발생 예·경보의 경보 기준은 강우경보지수로 결정되며 RTI 값이 10~30%일 경우 ‘관심(Attention)’, 30~50%일 경우 ‘주의(Caution)’, 50~70%일 경우 ‘경보(Alert)’ 그리고 90%이상일 경우 ‘대피(Evacuation)’로 설정하였다.

3.5 계측기기 기반 예·경보 모델

행정안전부에서는 ‘자연피해예측 및 저감연구개발사업-급경사지 주민대피 계측관리시스템 구축 및 계측시방서 개발연구’ 연구 보고서를 통해 계측기 종류(변위계, 경사계, 간극수압계, 함수비계, 지하수위계, 하중계)에 따른 주민대피 관리기준을 제안하였다. 급경사지에 대한 관리 기준은 누적변

위 또는 변위속도를 기준으로 제시된다. 해당 연구에서는 10곳의 현장 실측 데이터의 평균 값 및 문헌을 통하여 산정하였다. 구체적으로 변위의 경우 10곳의 현장 실측 데이터의 평균 값을 이용하였으며, 기타 계측기기의 경우 문헌을 통해 제시하였다. 이를 통하여 계측기기에 의한 대피 기준은 누적 변위와 변위속도에 대해 제시하였으며, 총 5단계(정상-관심-주의-경계-심각)로 설정하였다.

특히 변위의 경우 산사태 붕괴를 실시간 확인이 가능한 요소로 국외(미국, 홍콩, 대만, 일본 등)에서는 예·경보 기준이 제안되어 있지만 한국의 경우 관련 기준이 제시된 적이 없다. 해당 보고서는 실측 데이터를 기반으로 누적변위 및 변위속도에 대한 급경사지 주민대피 관리 기준을 제안하였으며 Table 3과 같다.

3.6 경사지 붕괴 예·경보 시스템의 비교

앞에서 소개한 바와 같이, 경사지 붕괴는 강우에 직접적인 영향을 받으며 경사지의 특성 및 지질과도 연관이 있는 것으로 확인 되었다. 이에 따라 다양한 방법에 따라 경사지 붕괴 예·경보 시스템이 개발되어 있다. 예·경보 시스템은 비교 가능한 4종류(계측기기 기반 예·경보 시스템은 제외)의 모델을 정리하였으며 Table 4에 나타내고 있다. 먼저,

예·경보 시스템은 다양한 모델을 기반으로 제시되어 있지만(Half life, soil reservoir index, critical continuous rainfall, rainfall triggering index) 기본적으로 강우 데이터와 실제 붕괴 데이터 통해 모델을 개발하였다. 또한, 지역 별 지질 데이터와 실제 경사지의 정보를 이용하여 산정하여 제안되기도 하였다. 강우의 경우 종류에 상관없이 24시간 강우를 기준으로 설정하였으며, 24시간 동안 강우가 내리지 않았을 경우 정보들은 초기화 된다. 시스템에 의한 알림의 단계는 평시-주의-위험 혹은 평시-관심-주의-경고-대피의 2케이스로 이루어져있는 특징이 있다.

마지막으로 각각의 시스템은 지역(강원, 부산) 혹은 전국 단위로 개발되어 활용 범위가 다를 뿐 아니라 주요 인자 또한 달라 각각의 시스템은 장단점이 존재하며 이는 Table 4에 표시하였다. 추후 급경사지 예·경보 시스템의 비교 혹은 분석 등을 수행 시 이 점을 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.7 예·경보 시스템의 알림단계 비교

3.6에서 비교한 예·경보 시스템에서 연속강우 기반과 강우경보지수 기반 시스템은 지역 데이터(부산과 강원도)를 기반으로 개발되었으며, 반감계수기반과 토양함수지수 기반 시스템은 전국 데이터를 기반으로 연구되었을 뿐만 아니

Table 3. Early Warning Criteria by Measuring Equipment (Displacement)

Type	Null	Attention	Watch	Alert	Emergency
Accumulation displacement (mm)	Below 14	14	36	90	209
Displacement rate (mm/day)	Below 1	1	6	26	63

Table 4. Comparisons of Slope Failure EWSs

Type	Half life	Soil reservoir index	Critical continuous rainfall	Rainfall Triggering Index
Institute	National Disaster Management Research Institute	Korea Forest Service	Korea Advanced Institute of Science Technology	Kangwon National University
Collected data	247 data from Gangwon	714 locations in the country	303 data from Busan	42 locations from Gangwon
Rainfall Standard (hrs)	24	24	24	24
Parameters	Landslide records, Accumulation rainfall	Annual rainfall, geological feature	Critical continuous rainfall, debris flow mobilization index	Rainfall intensity, accumulation rainfall, Duration of rainfall
Warning level	Null-Caution-Alert	Null-Caution-Alert	Null-Attention-Watch-Alert-Emergency	Null-Attention-Caution-Alert-Evacuation
Strength	Simple method National system	Simple method National system	Various factors	Simple method
Weakness	Rainfall base	Rainfall base	Complicated method Local system	Rainfall base Local system

라 시·군·구 단위에서의 예·경보가 가능하도록 개발되었다. 따라서, 본 장에서는 전국적인 시스템으로 개발된 반감계수기반과 토양함수지수 기반의 예·경보 시스템을 2014년을 기준으로 비교하였다.

반감계수기반 예·경보의 경우 2014년에 주의 단계 2회 경보 단계 15회로 확인되었으며 모두 4월에서 9월 사이, 특히 8, 9월에 집중적으로 발령됨을 확인하였다. 또한 총 17회의 알람 중 경보는 약 88% (15회)로 주의 단계보다 높은 수치를 보였다.

토양함수지수기반 예·경보의 경우 2014년에 총 845회의 예·경보가 발령되었으며 5월부터 10월까지 발령됨을 확인하였다. 토양함수기반 예·경보 또한 여름철에 집중됨을 확인하였지만 반감계수기반과 다르게 경보의 발령 횟수는 360회로 약 42%의 비율로 확인되었다.

토양함수지수기반의 경우 반감계수기반의 경우보다 약 50배의 높은 발령 배율이지만 경보단계는 약 24배로 전체보다 낮은 비율로 발령되었음을 확인하였다. 이는 토양함수지수기반의 경우 반감계수기반의 경우보다 기본적으로 보수적으로 개발된 것으로 확인하였다.

이 기간 중 2014년 8월 25일은 4지역에서 두 시스템 모두 예·경보가 발령되어 동일한 지역에 대한 비교를 수행하였다. Table 5는 고성, 창원, 울산 동구, 울산 울주군의 4지역에 대한 일 최대 강우량 및 알람 단계를 나타낸 표이다. 반감계수기반의 경우 고성을 제외한 전 지역에서 경보단계가 발령되었지만 토양함수지수기반의 경우 반대로 울주를 제외한 전 지역에서 주의 단계임을 확인하였다. 토양함수지수기반의 경우 주의 단계의 알람 기준은 낮지만 경보 단계의 알람 기준은 높음을 알 수 있다. 이는 간접적인 비교를 통해서도 확인 할 수 있다. 근거리 지역을 포함한 예·경보를 비교할 경우 설정 할 경우 8지역에서 비교가 가능하며 반감계수기반의 경우 한곳을 제외한 모든 지역에서 경보 단계를, 토양함수지수의 경우 한곳을 제외한 모든 지역에서 주의 단계로 확인되었으며 이는 위의 결과와 유사하게 나타났다.

단순 횡수 비교에서는 토양함수지수기반의 경우 보수적으로 설정되어 있으나 동일한 지역비교에서는 반감계수기반이 보수적인 값으로 확인되었다. 이는 모델에 적용된 인자와 가중치의 영향 및 데이터 개수의 영향으로 판단되며 구체적인 인자들의 상관관계와 수년간의 예·경보 시스템 알람 단계 비교 및 실제 급경사지 붕괴 이력과의 비교·분석을 통해 보다 신뢰성 있는 모델 개발을 제안 할 예정이다.

3.8 예·경보 시스템의 전망

현재 국토해양부에서는 국가전략프로젝트 연구개발 사업의 일환으로 한국형 스마트 경사지 예·경보 시스템 개발을 수행 중이다. 한국형 시스템은 강우 정보를 비롯하여 물리기반뿐 아니라 계측 기반으로 연구 중에 있으며 이는 기존의 시스템보다 높은 신뢰성 및 정확성을 목표로 하고 있다.

뿐만 아니라 단순 지역별 예·경보 시스템이 아니라 급경사지 붕괴시 영향 범위를 영향범위 분석 및 민감도 분석을 통해 파악한 후 개인별 위험 정도에 따라 차등적인 알람서비스를 연구 중에 있다.

이처럼 국가 단위에서 개발 중인 스마트시티 시스템에서의 예·경보는 종합적인 관리를 통해 시민의 삶의 질이 개선 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 논문은 한국에서 개발된 경사지 붕괴 예·경보 시스템을 비교(반감계수, 토양함수지수, 연속강우, 강우경보지수, 계측기기 기반) 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 한국의 예·경보 시스템은 강우기반(강우강도, 총 강우량 등), 강우 및 지질 및 지형기반(지질 및 경사지 정보 등) 그리고 계측기반(변위, 간극수압, 체적함수 등)으로 개발되었다.
- (2) 예·경보 시스템 비교 결과 인자의 조건에 따라 지역 단위 혹은 전국 단위의 시스템이 개발되었으며 알람 단계는 3단계 혹은 5단계로 개발되었다.
- (3) 전국단위로 개발된 시스템(반감계수와 토양함수지수)을 2014년도를 기준으로 비교 한 결과 기본적으로 토양함수지수기반의 경우 보수적으로 설정되었지만 특정지역의 경우 반대의 결과도 일부 확인 되었으며 추가적인 연구를 통해 분석 및 개선되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음(과제 번호 19NSPS-B149840-02).

Table 5. Comparison of Warning Levels (2014.08.25.)

Region	Goseong	Changwon	Donggu (Ulsan)	Ulju (Ulsan)
Max. daily rainfall (mm)	86	241	66	66
Half life	Caution	Alert	Alert	Alert
Soil reservoir index	Caution	Caution	Caution	Alert

References

- Anderson, M.G., Holcombe, E., Blake, J.R., Ghesquire, F., Holm-Nielsen, N., and Fisseha, T. (2011). Reducing landslide risk in communities: Evidence from the Eastern Caribbean. *Appl. Geogr.*, Vol. 31, No. 2, pp. 590-599.
- Baum, R.L., and Godt, J.W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, Vol. 7, No. 3, pp. 259-272.
- Brand, E.W., Premchitt, J., and Phillipson, H.B. (1984). Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Vol. 1, pp. 377-384.
- Brawner, C.O. (1994). *Rockfall hazard mitigation methods participant workbook*. NHI Course No. 13219, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA SA-93-085.
- Capparelli, G., and Tiranti, D. (2010). Application of the MoniFLaR early warning system for rainfall-induced landslides in Piedmont region (Italy). *Landslides*, Vol. 7, No. 4, pp. 401-410.
- Cheon, D.J., Park, Y.J., Lee, S.H., Kim, J.S., and Jung, D.Y. (2013). The development of landslide predictive system using measurement information based on u-IT. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 10, pp. 5115-5122.
- Choi, K.S., Moon, J.Y., Kim, D.W., Byun, H.R., and Kripalani, R.H. (2010). The significant increase of summer rainfall occurring in Korea from 1998. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 102, No. 3-4, pp. 275-286.
- Choi, S.K., Lee, J.M., Kim, Y.T., and Kwon, T.H. (2017). Characteristics of trapped debris by silt-type barriers: Field-scale test results. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 261-269.
- Choi, S.K., Lee, J.M., and Kwon, T.H. (2018). Effect of slit-type barrier on characteristics of water-dominant debris flows: Small-scale physical modeling. *Landslides*, Vol. 15, No. 1, pp. 111-122.
- Derbyshire, E.D. (1976). *Geomorphology and climate*. John Wiley & Sons.
- Hong, W.P., Kim, Y.W., Kim, S.K., Han, J.G., and Kim, M. (1990). Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea. *Geotechnical Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 55-63.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: The physical science basis*. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lee, M.H. (2006). *A rainfall-based debris flow warning analysis and its application*. Ph.D. dissertation, National Cheng Kung University (in Chinese).
- Japan Highways Organization (JHO). (1998). *Design guideline*. pp. 1-37.
- Jun, H., and Kim, S. (2017). A study on application of very short-range-forecast rainfall for the early warning of mud-debris flows. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 366-374.
- Jun, K.J., Kim, G.H., and Yune, C.Y. (2013). Analysis of debris flow type in Gangwon Province by database construction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 171-179.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2016). A study on warning level-based-landslide triggering rainfall criteria considering weathered soil type and landslide type. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 341-350.
- Kang, S., Lee, S.R., Vasu, N.N., Park, J.Y., and Lee, D.H. (2017). Development of an Initiation criterion for debris flows based on local topographic properties and applicability assessment at a regional scale. *Engineering Geology*, Vol. 230, pp. 64-76.
- Kim, K.H., Jung, H.R., Park, J.H., and Ma, H.S. (2011). Analysis on rainfall and geographical characteristics of landslides in Gyeongnam Province. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 14, No. 2, pp. 33-45.
- Kim, K.S. (2008). Characteristics of basin topography and rainfall triggering debris flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28 No. 5C, pp. 263-271.
- Kim, K.S., Song, Y.S., Chae, B.G., Cho, Y.C., and Lee, C.O. (2007). Geometric characteristics of landslides on Natural terrain according to the geological condition. *The Journal of Engineering Geology*, Vol.

- 17, No. 1, pp. 75-87.
- Kim, Y., Ryu, J.H., and Seo, S.H. (2015). A study on the criteria for civil evacuation considering rainfall and geological characteristics in steep slope areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 229-236.
- Kim, Y.M., and Jung, S.W. (2000). A study on the rainfall-triggered landslides in Taijon-Chungnam Area. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 4C, pp. 341-355.
- Lee, C., Kim, D., Woo, C., Kim Y.S., Seo, J., and Kwon, H. (2015). Construction and operation of the national landslide forecast system using soil water index in Republic of Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 6, pp. 213-221.
- Lee, C., Youn, H.J., and Woo, C.S. (2009). Development and verifying of calculation method of standard rainfall on warning and evacuation for forest soil sediment disaster in mountainous area by using tank model. *Jour. Korean For. Soc.*, Korean Forest Society, Vol. 98, No. 3, pp. 272-278.
- Lee, J.D. (2015). *The R&D research on construction of monitoring management system for evacuating inhabitant in steep slope site and development of monitoring specification*. Ministry of Public Safety and Security.
- Lee, K., Baek, H.J., Cho, C.H., and Kwon, W.T. (2011). The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. *The Geographical Journal of Korea*, Vol. 45, No. 2, pp. 237-248.
- Lee, Y.N. (1991). Geotechnical engineering and natural disaster (II): Landslide. *Geotechnical Engineering*, Vol. 7, No. 1, pp. 105-113.
- Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Macaluso, G., Tamburini, A., et al. (2007). Monitoring of an alpine glacier by means of ground-based SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 495-499.
- Maskrey, A. (2011). Revisiting community-based disaster risk management. *Environ. Hazards*, Vol. 10, No. 1, pp. 42-52.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (2007). *Information of slope failures by Chuetsu-offshore earthquake, Niigata prefecture*. Tokyo, Japan.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2015). *The R&D research on construction of monitoring management system for evacuating inhabitant in steep slope site and development of monitoring specification*.
- Nam, D.H., Lee, S.H., Kim, M.I., and Kim, B.S. (2018). Calculation of rainfall triggering index (RTI) to predict the occurrence of debris flow. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 1, pp. 47-59.
- Park, J.Y., Lee S.R., Lee, D.H., Kim, Y.T., Oh, S., and Park, H.J. (2018). Development of continuous rainfall-based citywide landslide early warning model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 1, pp. 99-111.
- Ryu, J.H., Park, J.Y., and Lim, I.H. (2013). A study on landslide warning guidelines based on regional rainfall. *Journal of Korean Society of Societal Security*, Vol. 6, No. 1, pp. 55-63.
- Sakaki, T., Okazaki, M., and Matsuo, Y. (2010). Earthquake shakes Twitter users: Real-time event detection by social sensors. *WWW 2010 Proceedings of the 19th international conference on World Wide Web*, ACM, New York, NY, USA, pp. 851-860.
- United States Geological Survey (USGS). (2004). *Landslide types and process*.
- Vasu, N.N., and Lee, S.R. (2016). A hybrid feature selection algorithm integrating an extreme learning machine for landslide susceptibility modeling of Mt. Woomyeon, South Korea. *Geomorphology*, Vol. 263, pp. 50-70.
- Yoo, S.H., Sohn, H.G., Jung, J.H., and Choi, S.K. (2009). Monitoring of landslide in Kangwondo area using 2-Pass DInSAR technique. *Journal of Korean Society of Societal Security*, Vol. 2, No. 2, pp. 85-90.
- Yu, Y.F., Lam, J.S., Siu, C.K., and Pun, W.K. (2004). Recent advance in landslip warning system. *Proceedings of the HKIE Geotechnical Division 24th Annual Seminar*, Hong Kong, pp. 139-147.

Received	July 3, 2019
Revised	July 11, 2019
Accepted	July 30, 2019