전국단위 산사태 발생 예측을 위한 위험수준별 강우 한계선 개발

Development of Hazard Level-based Rainfall Threshold for Prediction of Rainfall-induced Landslide Occurrence in Korea

이지성* · 강효섭** · 석재욱*** · 김윤태****

Lee, Ji Sung*, Kang, Hyo Sub**, Suk, Jae Wook***, and Kim, Yun Tae****

Abstract

Landslides are one of the major natural disasters in Korea, and they frequently cause infrastructure damage, property loss, and human casualties. The main cause of landslides is localized rainfall. Therefore, the analysis of landslide-triggering-rainfall is essential. This study developed rainfall threshold based on the collected the DB associated with landslide incidences that occurred for 20 years from 1999 to 2018 in Korea. The DB of 247 landslides was collected. The landslide DB from 1999 to 2017 was used for the calibration of the rainfall threshold, and the landslide DB for 2018 was used for validation. Time-series rainfall data were collected from the Korea Meteorological Administration, and the triggering rainfalls of rainfall-induced landslides were calculated using the concept of triggering rainfall. We proposed the hazard level-based rainfall threshold by using quantile-regression analysis, which is a statistical technique to predict the occurrence of landslides by using the hazard level. From these results, we calibrated and validated the hazard level-based rainfall thresholds into four levels (None, Watch, Warning, Alarm). The hazard level-based rainfall threshold developed in this study can be used as the criteria for early-warning system that predicts the occurrence of landslides in Korea.

Key words : Landslide, Rainfall, Hazard Level, Rainfall Threshold, Early Warning System

요 지

산사태는 주요 자연재해 중 하나이며, 이로 인해 사회기반시설물의 손상, 국민의 재산 및 인명 피해가 빈번히 발생하고 있다. 산사태의 주요원인은 집중강우이므로 이와 같은 유발강우량에 대한 분석은 필수적이다. 본 연구에서는 1999년부터 2018년까지 20년간 국내에서 발생한 총 247건의 산사태 DB를 구축하여, 1999년부터 2017년까지의 산사태 DB는 강우 한계선 개발에, 그리고 2018년 산사태 DB는 강우 한계선 검증에 활용하였다. 기상청 강우자료를 활용하여 산사태 발생시점까지 강우량을 수집하였고, 유발강우 산정기법을 활용하여 산사태 발생에 유효하다고 판단되는 유발강우량을 산정하였다. 산사태 발생을 위험수준별로 예측할 수 있도록 통계 기법인 분위수 회귀분석을 이용하여 위험수준별 강우 한계선을 제안하였다. 본 연구에서 최종적으로 4 단계(None, Watch, Warning, Alarm)의 위험수준별 강우 한계선을 개발 및 검증하고, 활용성을 평가하였다. 개발된 강우 한계선은 전국단위 산사태 발생을 예측하는 예·경보시스템의 기준으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 산사태, 강우량, 위험수준, 강우 한계선, 예경보시스템

*정회원, 국립부경대학교 스마트인프라기술연구소 전임연구원(E-mail: js3497@naver.com)

Member, Associate Researcher, Smart Infra-Structure Technology Institute, Pukyong National University

**국립재난안전연구원 방재연구실 시설연구사

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

***국립재난안전연구원 방재연구실 시설연구사

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

****교신저자, 정회원, 국립부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

국내 우기 시(6-9월) 발생하는 태풍을 동반한 강우 및 국지성 집중강우는 많은 사면재해를 유발한다. 1990년대 이후로 주요도시의 급격한 발전과 기상이변 현상으로 인해 사면재해가 증가하고 있는 추세이다. 또한 국내 산지분포는 70% 이상으로 구성되어 있으므로 사면재해에 크게 노출되어 있는 지형적 여건을 갖추고 있다. 이와 같이 강우에 기인한 사면재해는 사회기반시설물의 피해와 더불어 국민의 재산 및 인명피해를 동반한다. 그러므로 산사태를 발생시키는 직접 원인인 유발강우에 대한 분석과 산사태 발생을 예측하고 평가할 수 있는 기법이 필요하다.

국내의 경우 2011년 서울 우면산 사면재해 이후 정부 부처의 유관기관에 의해 산사태 예측 및 예방에 대한 원천기술 개발과 더불어 실용화 연구가 수행되었다. 국외의 경우 유럽, 미국, 일본, 대만 등 산사태가 빈번히 발생하고 피해가 많은 국가에서는 산사태 예측과 예방뿐만 아니라 피해평가를 수행하기 위해 선도적으로 연구 개발을 진행하고 있다. 특히 유럽연합(EU)의 Safeland 프로젝트와 노르웨이 Norwegian Geotechnical Institute (NGI)의 KLIMA 2050 그리고 미국 United States Geological Survey (USGS)에서 산사태 발생 예측, 민감도 및 취약성 평가 그리고 리스크 평가까지 요소기술들에 대한 연구가 진행되었고, 현재까지도 활발하게 진행되고 있는 상황이다. 이와 같은 연구들에서는 산사태 발생을 예측하기 위해 유발강우량 기반의 강우 한계선을 이용하고 있다. 현재까지도 전 세계적으로 강우 한계선에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 유럽에서 연구가 활발히 진행될 뿐만 아니라 실제로 산사태 예·경보시스템에 활용하고 있는 사례가 많다.

국내에서는 강우강도(rainfall intensity, I) 누적강우량(cumulative rainfall, C), 강우기간(duration, D) 및 일 강우량(daily rainfall)을 이용한 산사태 유발강우기준이 개발되었다(Choi, 1989; Hong et al., 1990). 산림청은 1993년에 강우기준을 제정하여 산사태 주의보·경보를 발령하고 있고, 현재까지도 활용되고 있다. 그러나 산림청 강우기준은 많은 연구를 통해 다소 부정확하다고 알려져 있다(Oh and Park, 2013; Lee et al., 2014; Lee and Kim, 2017). 최근 2011년 이후 Oh and Park (2013)은 강원지역을 대상으로 유발강우량을 이용하여 단기영역권, 중간영역권, 장기영역권에 대한 강우강도(I)-기간(D)의 강우 한계선을 제안하였다. Song et al. (2013)은 불포화 무한사면 안정이론을 도입하고 I-D 기준을 이용하여 급경사지 붕괴 예측을 안전율의 범위에 따라 Failure ($FS < 1.0$), Alarm ($1.0 < FS < 1.3$), Safe ($FS > 1.3$)로 구분하였다. 그리고 Lee et al. (2014)은 1999년부터 2012년까지 국내에서 발생한 산사태 자료를 바탕으로 유발강우량을 분석하고, 사면파괴 유형(토석류, 얇은 사면파괴)에 따른 강우 한계선을 각각 제안하였다. Lee and Kim (2017)은 전국을 대상으로

분위수별 강우 한계선과 Receiver Operating Characteristics (ROC) 기법을 이용하여 최소의 False 또는 Missed alarm을 제공하는 최적 강우 한계선을 제안하였다. Lee and Sung (2018)은 강원도 춘천 지역을 대상으로 강우 이벤트의 정의에 따라 ROC 기법을 이용하여 제안된 강우 한계선을 평가하였다.

국외의 경우 다양한 연구자들에 의해 산사태와 강우의 관계를 강우강도와 지속시간(intensity vs duration), 누적강우와 지속시간(cumulative rainfall vs duration), 선행강우량과 일강우량(antecedent rainfall vs daily rainfall ratio), 산사태 발생강우와 연평균강우량(event rainfall vs yearly average rainfall ratio), 일강우량과 초과 선행강우량(daily rainfall vs antecedent excess rainfall ratio) 등과 같이 강우로부터 산사태를 예측할 수 있는 강우 한계선에 대한 연구가 진행되어 왔다(Caine, 1980; Larsen and Simon, 1993; Glade et al., 2000; Aleotti, 2004; Guzzetti et al., 2007, 2008; Dahal and Hasegawa, 2008; Saito et al., 2010). 강우량을 이용한 산사태 예측은 Endo (1969)에 의해 최초로 제안되었다. 이후, Campbell (1975)에 의해 선행강우와 강우강도를 이용한 강우 한계선이 제안되었다. 그리고 Caine (1980)에 의해 최초로 전 세계를 대상으로 73개의 산사태 발생자료를 이용하여 산사태 발생 예측을 위한 I-D 강우 한계선이 제안되었다. 이를 통해 현재까지도 I-D 강우 한계선이 가장 많이 개발되어 활용되고 있으며, Segoni et al. (2018)에 의하면 최근 9년 동안 조사된 총 115개 연구논문에서 I-D 강우 한계선이 약 50%를 차지하고 있다. 또한 최근에는 많은 연구자들이 강우로 인한 산사태를 확률적으로 예측하기 위해 위험(hazard or warning) 수준별(level or stage) 강우 한계선을 제안하고 있다(Baum and Godt, 2010; Brunetti et al., 2010; Rosi et al., 2012; Huang et al., 2015; Piciullo et al., 2017).

일반적으로 산사태 외적 유발요인인 강우량만을 이용한 산사태 예측은 한계점이 존재하므로 산사태 내적 유발요인(지형·수문·지반·임상·지질 등)으로 평가된 민감도 혹은 위험지도와 연계하여 활용하게 된다. 뿐만 아니라 이와 같은 연계를 통해 추후 발생될 사면재해로 인한 취약성과 리스크 평가까지 위험수준별로 가능하다. 그러므로 강우 한계선은 산사태 발생을 예측하기 위한 기초자료일 뿐만 아니라 산사태 예·경보를 위해 매우 중요한 요소기술 중 하나이다.

따라서 본 연구에서는 산사태 예·경보 시스템의 기초자료를 제공할 뿐만 아니라 추후 취약성 및 리스크 평가 시 의사결정이 가능한 위험수준별 강우 한계선을 개발하였다. 이를 위해 전국단위를 대상으로 1999년부터 2018년까지 20년간 발생한 산사태 DB를 수집 및 분석하였다. 그리고 기상청의 강우 관측 장비를 통해 각 산사태 강우량 자료를 수집하였고, 유발강우 산정기준을 통해 객관적이고 일관된 방법으로 산사태 유발강우량을 분석하였다. 그리고 통계

기법인 분위수 회귀분석을 활용하여 강우 한계선을 정의하였다. 또한 국외 연구의 위험수준 기준들을 참고하여 위험수준을 정의하였고, 국내 실정에 맞는 산사태 예·경보에 활용할 수 있도록 위험수준별 강우 한계선을 개발 및 검증하였다.

2. 방법론

본 연구의 목적인 위험수준별 강우 한계선 개발을 위한 연구흐름은 Fig. 1과 같다. 우선 기존에 국내에서 발생한 산사태를 조사하고 이에 따른 강우량 자료를 수집하여 산사태 발생 자료를 DB로 구축한다. 다음으로 강우 한계선 개발을 위해 유발강우량을 분석하고, 통계 기법을 이용하여 강우 한계선을 산정한다. 그리고 본 연구에서 개발하고자 하는 위험수준별 강우 한계선을 위해 위험수준을 문헌연구를 바탕으로 정의한다. 마지막으로 위험수준 정의에 따른 강우 한계선을 개발하고, 최근 발생된 산사태 DB를 이용하여 강우 한계선을 검증하는 방법으로 연구를 진행하였다.

Fig. 1. Flow Chart to Develop Hazard Level-based Rainfall Threshold

2.1 산사태 유발강우량 분석

일반적으로 산사태 유발강우량은 산사태 발생에 영향을 미치는 일정시간에 내린 강우강도 및 누적강우량, 선행강우량 등을 의미한다. Aleotti (2004)의 경우 산사태 발생까지 누적 강우량이 크게 증가하기 시작하는 시점, 즉 강우강도가 뚜렷하게 증가하는 시점을 산사태 유발강우로 제안하였다. 그러나 이와 같은 방법은 주관적인 판단에 의존하므로 합리적이고 객관적인 분석이 결여된다. 따라서 강우 한계선을 개발할 때 객관적이고 정확한 산사태 유발강우량 분석이 선행되어야 한다. Fig. 2는 산사태 유발강우량을 산정하기 위한 유발강우 산정 기법의 개념도를 나타내고 있다. 산사태 유발강우량은 강우시작 시점에서 산사태가 발생한 시점까지 내린 강우량으로 정의한다. 단, 강우가 내리다가 24시간 이상 강우가 발생하지 않으면 유발강우량에서 제외되며, 제외된 강우량은 선행강우량이 된다. 이와 같은 방법은 Saito et al. (2010), Oh and Park (2013), Lee et al. (2014), Lee and Kim (2017), Lee and Sung (2018)과 같이 산사태 유발강

우량 분석을 위해 활용하고 있는 방법이다. 강우 한계선 개발에 사용되는 강우강도(rainfall intensity, I)와 강우기간(duration, D) 그리고 누적강우량(cumulative rainfall, C)은 Fig. 2로부터 계산된다.

Fig. 2. Conceptual Figure for Calculating the Triggering Rainfall of Rainfall-induced Landslide

2.2 통계 기법을 이용한 강우 한계선

본 연구에서는 위험수준별 강우한계선을 설정하기 위해 통계 기법인 분위수 회귀분석(quantile-regression)을 적용하였다. 분위수 회귀분석은 Koenker and Bassett (1978)에 소개되었으며 특이값(outliers)에 강건한(robustness) 성질을 가지며 오차항의 분포에 대한 가정이 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 특히 분위수 회귀분석은 조건부 평균함수를 추정하는 최소제곱법과 다르게 특정 분포에 대응하는 결과를 산출할 때 평균함수가 아닌 원하는 분위수에 대한 조건부 분위수(percentile quantile)를 산정할 수 있다. 분위수 회귀분석을 위해 R 프로그램의 quantreg 패키지를 활용하였다. 분위수 회귀분석은 Eq. (1)과 같고 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ 를 찾는 것이다. 여기서 함수 $\rho_\tau(u)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \beta & \underset{\beta}{\text{Min}} \sum_{i=1}^n \rho_\tau(y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \dots - \beta_k x_{ki}), \\ \rho_\tau(u) & = \begin{cases} \tau u, & u \geq 0 \\ (\tau - 1)u, & u < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

분위수 회귀분석의 예로 $\tau = 0.25$ 인 경우, 25% 분위수 회귀선을 찾게 되는 방법으로 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta & \underset{\beta}{\text{Min}} \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n |y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \dots - \beta_k x_{ki}|, \\ \rho_{0.25}(u) & = \begin{cases} 0.25u, & u \geq 0 \\ -0.25u, & u < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로 평균회귀선은 단 하나의 선을 제공함으로써 충분한 정보를 제공하지 못하지만, 분위수 회귀의 경우 각 분위에 따른 회귀선을 획득하므로 더 많은 정보를 줄 수 있다. 또한 y의 분포가 평균을 중심으로 비대칭인 경우나 이분산성이 존재하는 경우 분위수 회귀분석은 유용하게 활용된다.

2.3 위험수준별 강우 한계선

강우 한계선은 산사태 발생 예측 및 조기경보를 위한 중요한 자료로 인식되어져 있다. 그리고 제한된 데이터의 범위에 따라 광역 혹은 국지지역을 대상으로 적용되고 있다. 일반적으로 강우 한계선은 강우강도 혹은 누적강우량을 y축, 강우기간을 x축으로 통해서 나타내고 있고 x와 y축을 log축으로 표현하여 나타낸다(Guzzetti et al., 2007). 국외의 경우 Caine (1980)에 의해 처음으로 I-D 강우 한계선이 개발되었고, 그 이후로도 다양한 연구자들을 통해 산사태 발생 예측을 위한 강우 한계선 개발에 많은 연구들이 수행되었다(Caine, 1980; Larsen and Simon, 1993; Glade et al., 2000; Aleotti, 2004; Guzzetti et al., 2007; Dahal and Hasegawa, 2008; Baum and Godt, 2010; Brunetti et al., 2010; Saito et al., 2010; Peruccacci et al., 2012; Rosi et al., 2012; Gariano et al., 2015).

Fig. 3은 강우 한계선을 이용한 산사태 예측의 모식도를 나타내고 있다. 일반적으로 예측 혹은 실측 강우량이 강우 한계선의 초과 여부에 따라 예·경보 발령 여부가 판단된다. 기존에는 Fig. 3(a)와 같이 최소 강우 한계선을 기준으로 산사태 발생을 예측하였다(Cain, 1980; Larsen and Simon, 1993; Aleotti, 2004; Dahal and Hasegawa, 2008). 그러나 최소값으로 설정된 강우 기준은 매우 안전측으로 설정되므로 잦은 예·경보가 발령될 가능성이 높다. 그러므로 최근에는 Fig. 3(b)와 같이 산사태 발생을 확률적으로 예측할 뿐만 아니라 산사태 민감도 혹은 위험지도와 연계하기 위하여

위험수준에 따른 강우 한계선을 개발하고 있다.

Baum and Godt (2010)는 3일 누적강우량-15일 누적강우량, 강우강도-기간 그리고 선행습윤지수의 기준을 Null, Outlook, Watch, Warning과 같이 4단계로 구분하여 산사태 예·경보시스템으로 활용하고 있다. 또한 Rosi et al. (2012)은 통계 기법을 활용하여 강우강도-기간 한계선에서 강우로 인해 산사태가 발생할 확률을 Warning level 0부터 4까지로 5단계로 구분하는 연구를 수행하였다. Brunetti et al. (2010)는 강우강도-기간 한계선에서 강우로 인해 산사태가 발생할 확률을 0.005%-5%까지 5단계(well below the threshold, below the threshold, on threshold, above the threshold, well above the threshold)로 구분하였다. 그리고 SafeLand (2012)의 보고서에서는 강우기준을 활용한 산사태 발생 확률을 None (<5%), Alert (5-20%), Warning (20-50%) 그리고 Eacuation (>50%)과 같이 4단계로 구분하였다. 최근 Huang et al. (2015)은 강우강도와 누적강우량을 이용하여 강우 한계선을 4단계(Zero, Outlook, Attention, Warning)로 제안하였다. 선행 연구의 경우 4단계로 위험수준을 분류하고 있는 경우가 많고, 각각의 초과 확률에 따른 위험수준을 분류하였다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 강우 한계선의 초과 확률에 따른 위험수준별 강우 한계선을 정의하였다. Hazard level 0의 경우 None (혹은 Null)과 같이 이 기준에서는 산사태가 발생하지 않는 것을 의미한다. Hazard level 1의 경우 예보(Watch, Attention, Outlook), Hazard 2의 경우 주의보(Warning, Alert), Hazard level 3의 경우 경보(Alarm, Evacuation, Emergency)를 나타낸다(Baum and Godt, 2010; Safeland, 2012; Huang et al., 2015).

강우 한계선의 위험수준은 Baum and Godt (2010), Safeland (2012) 그리고 Lee (2018)와 같은 선행연구를 바탕으로 Table 1과 같이 위험수준 및 대응방안을 정의하였다. 통계 기법인 분위수 회귀분석을 이용하여 강우 한계선을 None, 예보(Watch), 주의보(Warning), 경보(Alarm)로 4단계

Fig. 3. Comparison Between Previous and Present Study of Rainfall Threshold

Table 1. Criteria and Response of Hazard Level-based Rainfall Threshold

Hazard level	Criteria	Response	Tool
None	Below 5% rainfall threshold (0-5%)	No response will be given to the local authorities or the population	Hazard level-based rainfall threshold with real-time rainfall and forecast rainfall
Watch	Between 5% rainfall threshold & 20% rainfall threshold (5-20%)	Leading to requirement to inform the local authorities and population to pay attention to the forecasted rainfall	
Warning	Between 20% rainfall threshold & 50% rainfall threshold (20-50%)	Serious possibility of landslide occurrence in the short term future	
Alarm	Above 50% rainfall threshold (>50%)	Very great chance of landslide occurrence in the next hours. Therefore local people must be alarm to evacuate the susceptible area or avoid to go to there, and keep a safe distance	

로 분류하였다. None의 경우 5% 이하, 예보(Watch)의 경우 5% 이상 ~ 20% 이하, 주의보(Warning)는 20% 이상 ~ 50% 이하, 경보(Alarm)는 50% 이상의 산사태 발생 확률에 따라 위험수준별 강우 한계선을 제안하였다.

3. 산사태 DB 구축 및 분석

산사태 발생에 대한 연구를 위해서는 기존 산사태 발생 자료를 구축하고 분석하는 것이 필요하다. 일반적으로 강우 한계선 개발을 위한 자료로 활용하기 위해서는 정확한 위치 및 시간이 필수적으로 구축되어야 한다. 그러므로 산사태 발생에 대한 정확한 위치와 시간을 식별할 수 없는 자료의 경우 강우 한계선 개발을 위한 자료로는 한계점이 존재한다. 일반적으로 산사태 발생자료를 구축하기 위해 사면재해와 관련된 유관기관에서 발행된 보고서, 뉴스보도자료 등을 가장 많은 활용하고 이 밖에 현장조사, 위성영상 등을 활용하고 있다.

본 연구에서는 강우 한계선을 개발하기 위해 Fig. 4와 같이 1999년부터 2018년까지 발생한 산사태 자료를 구축하였다. 산사태 발생 자료는 국립재난안전연구원, 지자체, 뉴스 자료 그리고 현장조사를 통해 총 247건의 DB를 구축하였다. 1999년부터 2013년까지의 산사태 DB는 총 218개 수집되었고, 최근 2014년에 7건, 2016년에 7건, 2017년에 3건, 2018년에 12건이 수집 및 분석되었다. 또한 국내 도 단위의 권역별(특별시, 광역시 포함)로 분석하였을 때, 경상권(부산, 울산, 대구 포함)에서 84건으로 가장 많은 산사태 DB가 수집되었다. 다음으로 강원권(51건), 경기권(41건), 충청권(37건) 그리고 전라권(34건) 순으로 집계되었다. 국내 전국 단위의 강우 한계선 개발을 위해 1999년부터 2017년까지 235건의 DB를 이용하였고, 2018년의 12건의 자료는 검증에 위해 활용하였다. 산사태 유발강우량은 기상청 지역별 상세 관측자료(AWS)의 강우자료를 이용하여 강우량 분석을 위

한 시간당 강우량을 수집하였다. 또한 강우량 DB 구축 시 정확한 강우량 자료를 수집하기 위해 Fig. 4의 강우관측소 분포도와 같이 산사태 발생지점과 가장 인접한 위치의 기상 관측소 자료를 이용하였다.

Fig. 4. Distribution of Landslide Inventory and Rain Gauge Station

Fig. 5는 1999년부터 2017년까지 발생한 총 235건의 산사태에 대하여 유발강우 산정 기법을 사용하여 계산된 강우강도와 기간을 나타낸다. 산사태 유발강우를 이용한 강우강도의 경우 평균값으로 산정되므로, 일반적으로 시간이 증가함

에 따라 강우강도는 감소하는 경향을 보인다. 산사태를 유발한 강우강도는 약 3 mm/hr부터 약 40 mm/hr 범위에 있다. 그리고 강우기간의 경우 최소 3시간부터 최대 77시간으로 산정되었다.

Fig. 5. Rainfall Intensity and Duration of Triggering Rainfall Using Landslide DB

4. 위험수준별 강우 한계선 개발

본 연구에서는 1999년부터 2017년까지 발생한 총 235건의 산사태 DB를 활용한 위험수준별 강우 한계선을 개발하였다. Fig. 6(a)는 총 235건의 산사태 자료를 이용하여 개발된 강우강도-기간(I-D)의 위험수준별 강우 한계선이다. 강우강도-기간 위험수준별 강우 한계선은 실시간으로 일정시간에 누적되는 강우를 나누어서 평균 강우강도를 도식화하여 산사태를 예측할 수 있다. 일반적으로 강우강도-기간의 한계선은 실시간으로 내리는 실측 강우 혹은 기상예보상의 예측 강우를 이용하여 산사태 예·경보의 단계별 분류가 가능하다.

(a) Rainfall intensity-Duration(I-D)

다. 예로 강우가 24시간 지속되었을 때 4.29 mm/hr가 발생하면 예보(Watch), 5.88 mm/hr는 주의보(Warning) 그리고 7.79 mm/hr는 경보(Alarm)로 분류된다.

Fig. 6(b)는 누적강우량-기간(C-D)의 위험수준별 강우 한계선을 나타낸다. 누적강우량-기간의 한계선은 제안된 강우강도-기간의 강우 한계선에서 $I=C/D$ 를 통해 변환할 수 있다 (Lee, 2018). 또한 Rosi et al. (2012)는 누적강우량을 이용한 강우 한계선이 산사태 예·경보 시 유발강우량 변화의 식별이 쉬울 뿐만 아니라 강우량 시각화가 조금 더 수월하다고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 많은 연구자들이 활용하고 있는 강우강도-기간과 누적강우량-기간의 위험수준별 강우 한계선을 개발하였다. Table 2는 각 위험수준별에 대응하는 분류와 경험식 그리고 각 시간대별 누적강우량을 나타낸다. 6시간 동안 52 mm, 12시간 동안 74 mm 그리고 24시간 동안 103 mm 이상의 강우가 발생하면 예보(Watch)로 분류된다. 또한 24시간 동안 103 mm, 141 mm 및 187 mm의 누적 강우량이 예상되면 각각 예보, 주의보 및 경보로 분류된다.

5. 위험수준별 강우 한계선 검증 및 활용

5.1 위험수준별 강우 한계선 검증

위험수준별 강우 한계선을 검증하기 위해 실제 강우를 대상으로 산사태가 발생한 자료와 산사태가 미 발생한 자료를 이용하였다. 우선 Fig. 4에서 언급된 것과 같이 2018년 우기 시 발생한 12건의 산사태 자료를 이용하여 검증을 수행하였다. 2018년 산사태 발생자료는 뉴스보도 자료를 통해 구축되었고, 사회기반시설 피해, 재산 및 인명 피해를 유발한 자료이다. Table 3은 2018년 산사태 자료이며 발생위치와 강우관측소 그리고 산사태 유발강우의 시간 및 누적강우량을 나타낸다. Case 1부터 Case 6까지는 2018년 7월

(b) Cumulative rainfall-Duration(C-D)

Fig. 6. Calibration of Hazard Level-based Rainfall Thresholds Using 1999 to 2017

Table 2. Equation and Cumulative Rainfall of Hazard Level-based Rainfall Threshold

Hazard level	Criteria	Equation	Cumulative rainfall (mm)		
			6hr	12hr	24hr
None	Below 5% rainfall threshold (0-5%)	-	-	-	-
Watch	Between 5% rainfall threshold & 20% rainfall threshold (5-20%)	$I=21.61D^{-0.51}$ ($C=21.61D^{0.49}$)	52	74	103
Warning	Between 20% rainfall threshold & 50% rainfall threshold (20-50%)	$I=34.74D^{-0.56}$ ($C=34.74D^{0.44}$)	77	104	141
Alarm	Above 50% rainfall threshold (>50%)	$I=59.28D^{-0.64}$ ($C=59.28D^{0.36}$)	113	146	187

Table 3. Validation Dataset Using 2018 Landslide Events

Case	Date	Location	AWS No.	D (hr)	C (mm)	Hazard level
1	2018.07.02	Gyeongbuk Bonghwa	271	28	109	Watch
2	2018.07.01	Chungnam Secheon	614	26	155	Warning
3	2018.07.01	Jeonam Boseong	258	24	162	Warning
4	2018.07.02	Gyeonggi Osan	550	48	206	Warning
5	2018.07.02	Gwangju	459	47	231	Warning
6	2018.07.02	Gyeonggi Yangpyeong	202	65	232	Warning
7	2018.08.26	Jeonam Gokseong	768	18	125	Warning
8	2018.08.26	Jeonam Gokseong	768	17	123	Warning
9	2018.08.29	Gyeonggi Yangju	598	36	300	Alarm
10	2018.09.03	Chungbuk Cheongju	327	10	193	Alarm
11	2018.09.04	Chungbuk Goesan	603	12	147	Alarm
12	2018.09.04	Gyeongbuk Mungyeong	273	12	103	Warning

1일부터 7월 2일까지 태풍 뽀라삐룬에 의한 산사태 발생 DB이다. 태풍 뽀라삐룬에 의해 전국적으로 많은 비가 내렸고, 산사태는 경상권, 충청권, 전남권, 경기권에서 발생되었다. Case 7부터 Case 9까지는 2018년 8월 26일부터 8월 30일까지 집중강우로 인해 산사태가 발생된 DB이다. 그리고 Case 10부터 Case 12까지는 2018년 9월 3일부터 9월 4일까지 태풍 제비에 의해서 발생된 자료이다. 이와 같은 2018년 산사태 발생 DB를 통해 본 연구에서 제안된 위험수준별 강우 한계선 검증을 수행하고자 하였다.

Fig. 7과 Table 3에 제안된 I-D와 C-D의 위험수준별 강우 한계선을 검증하기 위해 2018년 산사태 발생 DB를 나타내었다. 2018년 7월초 태풍으로 인해 발생한 산사태 발생 DB 중, Case 1의 경우 5% 강우 한계선을 초과하여 예보(Watch) 단계로 분류되었다. Case 2, 3, 4, 5 그리고 6의 경우 20% 강우 한계선을 초과한 주의보(Warning) 단계로 분류되었다. 2018년 8월말 집중강우, 9월초 태풍으로 인해 발생한 산사태 DB의 경우(Case 7, 8, 12) 20% 강우 한계선을 초과하여 주의보(Warning) 단계로 분류되었다. 그리고 Case 9, 10, 11은 50% 강우 한계선을 초과하여 경보(Alarm) 단계로 분류되었다. 산사태 발생 DB는 제안된 위험수준별 강우 한계선

을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

다음으로 제안된 위험수준별 강우 한계선의 검증을 위해 산사태 미 발생 자료의 강우를 적용하였다. 2018년 우기 시 국내 5개의 권역(경기·강원·충청·전라·경상권)에서 유일하게 산사태 발생 이력이 없는 강원권을 대상으로 하였다. 그리고 강원권에서 산사태 발생 및 피해가 빈번하게 일어나는 춘천, 인제, 원주, 강릉을 선정하였다. 강원도 춘천의 경우 2011년 집중강우로 인한 사면재해로 많은 재산 및 인명피해가 발생한 이력이 있고, 강원도 인제의 경우 2006년, 2010년에 많은 사면재해가 발생하였다. 강원도 원주의 경우 2002년, 2008년 그리고 2010년에 태풍 및 집중강우로 인해 많은 사면재해가 발생하였고, 강원도 강릉의 경우 2002년 태풍으로 인해 많은 사회기반시설과 재산 및 인명피해가 발생하였다. Table 4는 산사태 미 발생자료의 기간, 위치, 강우관측소 위치, 그리고 연속강우시간 및 누적강우량을 나타낸다. 강원권의 산사태 미 발생자료를 이용한 검증에서 강우 시기를 결정하기 위해 산사태 발생 자료를 참고하여 동일한 기간으로 선정하였다(2018년 7월 1일부터 2일까지, 2018년 8월 26일부터 30일까지, 2018년 9월 3일부터 4일까지).

(a) Rainfall intensity-Duration (I-D)

(b) Cumulative rainfall-Duration (C-D)

Fig. 7. Validation of Hazard Level-based Rainfall Thresholds Using 2018 Landslide Events

Table 4. Validation Dataset Using 2018 no Landslide Events in Kangwon Province

Case	Period	Location	AWS No.	D (hr)	C (mm)	Hazard level
a	2018.07.01 - 2018.07.02	Chuncheon	101	39	146	Watch
b		Inje	211	41	117	None
c		Wonju	114	36	101	None
d		Gangneung	105	27	64	None
e	2018.08.26 - 2018.08.30	Chuncheon	101	99	288	Warning
f		Inje	211	63	217	Warning
g		Wonju	114	81	189	None
h		Gangneung	105	68	140	None
i	2018.09.03 - 2018.09.04	Chuncheon	101	17	34	None
j		Inje	211	12	28	None
k		Wonju	114	12	85	Watch
l		Gangneung	105	15	66	None

Fig. 8은 강원권 산사태 미 발생자료를 위험수준별 강우 한계선의 I-D, C-D에 나타난 것이다. 2018년 7월 초 태풍 시 강원권 네 지역(a, b, c, d)의 연속강우 평균 기간은 36시간이다. 춘천지역은 5% 강우 한계선을 초과하여 예보(Watch)로 분류되고, 인제, 원주, 강릉 지역은 None으로 분류되었다. 2018년 08월 말 집중강우 시(e, f, g, h) 연속강우 평균 기간은 78시간으로 가장 길었다. 춘천, 인제 지역은 20% 강우 한계선을 초과하여 주의보(Warning)로 분류되었고 원주, 강릉은 None으로 분류되었다. 2018년 9월 초 태풍 시에는 강원권 네 지역(i, j, k, l)의 연속강우 평균 기간은 14시간으로 가장 짧은 기간을 보였다. 원주의 경우 짧은 시간에 가장 높은 누적강우량을 보이며 5% 강우 한계선을 초과하여 예보(Watch)로 분류되었고 춘천, 인제, 강릉은 None으로 분류되었다.

Fig. 9는 Receiver Operating Characteristics (ROC) 기법을

이용한 총 24건의 산사태 발생 및 미 발생 자료의 검증 결과를 나타낸다. ROC 기법은 강우 한계선의 신뢰성을 정량적으로 평가하기 위해 활용되고 있는 방법 중 하나이다(Gianecchini et al., 2012; Segoni et al., 2014; Gariano et al., 2015; Lee and Kim, 2017; Lee and Sung, 2018). Confusion matrix를 통해 산사태 실제 발생 유무(observed event)와 강우 한계선을 이용한 예측 결과(predicted event)를 바탕으로 계산된다. Fig. 9(a)의 Confusion matrix를 통해 2018년 12건의 산사태 발생 자료에서는 최소 단계인 5% 강우 한계선 이상에서 모두 산사태가 발생되었고, 산사태가 발생하였지만 강우 한계선 아래에 위치하는 Missed alarm은 없었다. 그리고 12건의 산사태 미 발생자료 중에서 4건은 산사태가 발생하지 않았지만 강우 한계선을 초과하는 False alarm으로 분류되었다. 8건의 자료는 산사태가 발생하지 않고 강우 한계선을 초과하지 않았다. Fig. 9(b)와 같이 계산된 결과를 바탕으로 예측의

(a) Rainfall intensity-Duration (I-D)

(b) Cumulative rainfall-Duration (C-D)

Fig. 8. Validation of Hazard Level-based Rainfall Thresholds Using 2018 no Landslide Events in Kangwon Province

		Observed event		
		Yes	No	
Predicted event	Yes	True positive (12 data)	False positive (4 data) * False alarm	(TP+FP)
	No	False negative (0) * Missed alarm	True negative (8 data)	(FN+TN)
		(TP+FN)	(FP+TN)	

* Probability of detection = $(TP/(TP+FN))$
 * Probability of false detection = $(FP/(FP+TN))$
 * Accuracy = $((TP+TN)/(TP+TN+FP+FN))$

(a) Confusion matrix

(b) Analysis of ROC curve

Fig. 9. ROC analysis for Validation of Hazard Level-based Rainfall Thresholds Using Landslide and no Landslide Events

정확성을 나타내는 probability of detection (POD)는 1.0, 예측의 오류를 나타내는 probability of false detection (POFD)는 0.33, 정확도를 나타내는 Accuracy는 83.3%로 산정되었다. 총 24건의 산사태 발생 및 미 발생 자료를 이용한 검증에서 Area Under the Curve (AUC)는 83.5%로, 제안된 강우 한계선은 비교적 높은 신뢰성을 보였다.

그러나 본 연구를 통해 지역 특성에 따라 산사태를 유발시키는 강우특성(강우강도, 누적강우량, 시간)이 다른 것을 알 수 있었다. 이는 산사태 발생 지점의 내적요인(지형·지질·지반·수문·임상 등) 특성이 다르기 때문이다. 이를 통해 산림청이 운영하고 있는 강우기준 및 위험지도와 마찬가지로 예·경보시스템 운영 시 산사태 발생 시간 확률(temporal probability)과 공간 확률(spatial probability) 즉, 산사태 발생 시간뿐만 아니라 발생위치를 정확히 파악하는 것은 필수적

이라 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 강우 한계선과 더불어 산사태 민감도 혹은 위험지도와 연계한 산사태 예·경보시스템 구축이 필요하다.

5.2 위험수준별 강우 한계선 활용

산사태 예·경보시스템에서 강우 한계선은 필수적인 요소기술 중 하나이다. 본 연구에서 개발된 위험수준별 강우 한계선을 산사태 예·경보시스템에 활용하는 예시를 Fig. 10에 도식화 하였다. 실제 강우정보를 바탕으로 시간에 따른 강우 한계선에서 강우경로(rainfall path), 위험수준별 변화 및 강우량 변화를 나타내었다. 검증데이터로 활용된 데이터는 2018년 8월 29일 경기도 양주에서 발생한 산사태 강우자료이다. 강우 한계선 그림의 강우경로를 통해 강우 발생시점부터 강우량이 점차 증가하는 것을 볼 수 있고(Fig. 10(a)),

Fig. 10. Application of Hazard Level-based Rainfall Thresholds for Landslide Early-warning System

강우 시작 후 8시간부터 위험수준 단계로 진입하는 것을 볼 수 있다. 그리고 예보(Watch)와 주의보(Warning) 단계를 지나고 경보(Alarm) 단계에서 6시간정도 유지되었고, 주의보(Warning) 단계로 다시 내려왔다가 7시간 후 다시 경보(Alarm) 단계로 산사태 발생시점까지 유지되었다. 2018년 경기도 양주시 산사태의 유효 강우기간은 36시간으로 산사태 발생 약 28시간 전, 24시간 전에 각각 예보(Watch)와 주의보(Warning) 단계로 진입하며, 약 23시간 전 경보(Alarm) 단계로 진입하여 산사태 발생을 충분한 시간에 예측할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 위험수준별 강우 한계선은 Fig. 10과 같이 활용할 수 있고, 산사태 예·경보시스템 운영 시 필수요소기술로서 충분히 활용성이 크다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 산사태 예·경보시스템의 핵심 요소기술로 활용하기 위해 강우와 산사태 발생관계를 정의할 수 있는 위험수준별 강우 한계선을 제안하였다. 1999년부터 2018년까지 20년간 국내에서 발생한 산사태 DB 총 247건을 구축하여 위험수준별 강우 한계선을 개발 및 검증하고 활용성을 검토하였다.

- (1) 산사태 유발강우량을 객관적이고 정확하게 분석하기 위해 유발강우 산정 기법을 이용한 분석을 수행하였고, 통계 기법인 분위수 회귀분석을 이용하여 각 위험

수준에 대응하는 강우 한계선을 정의하였다.

- (2) 각종 문헌을 바탕으로 위험수준을 4 단계(None, Watch, Warning, Alarm)로 정의하였다.
- (3) 위험수준별 강우 한계선 검증을 위해 2018년 국내에서 산사태가 발생한 12건의 자료와 동일한 시기에 산사태가 발생되지 않는 12건의 자료를 이용하였다. Confusion matrix를 통해 분석한 산사태 예측의 정확성은 83.3%이다. 또한 ROC 기법을 활용하여 제안된 강우 한계선을 검증한 결과 AUC는 83.5%로 평가되었다. 지역 특성에 따라 유발강우량이 다른 것을 알 수 있으며, 이는 산사태 발생 지점의 내적요인이 가지는 특성이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

국내 산사태 DB를 바탕으로 개발된 위험수준별 강우 한계선은 산사태 예·경보 시스템에 적용하여 산사태 발생을 예측하는 중요한 요소기술로서 활용될 것으로 기대된다. 추후 산사태 예·경보시스템의 신뢰성을 향상시키고 산사태 발생 시간 및 위치를 정확히 파악하기 위해 강우 한계선과 산사태 민감도 혹은 위험지도와 연계된 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 기초연구실지원사업으로부터 지원받아 수행되었고(2018R1

A4A1025765), 또한 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 19TSRD-B151228-01)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, Vol. 73, No. 3-4, pp. 247-265.
- Baum, R.L., and Godt, J.W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, Vol. 7, pp. 259-272.
- Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., and Guzzetti, F. (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 10, 447-458.
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, Vol. 62A, pp. 23-27.
- Campbell, R.H. (1975). *Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California*. Professional Paper No. 851, US Geological Survey.
- Choi, K. (1989). *Landslide prediction methods and prevention*. KFRI Research Information Report, No. 27, Korea Forest Research Institute, pp. 1-3.
- Dahal, R.K., and Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslide in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, Vol. 100, No. 3-4, pp. 429-443.
- Endo, T. (1969). *Probable distribution of the amount of rainfall causing landslides*. Annual Report 1968, Hokkaido Branch, For. Exp. Stn., Sapporo, pp. 122-136.
- Gariano, S.L., Brunetti, M.T., Iovine, G., Melillo, M., Peruccacci, S., Terranova, O., et al. (2015). Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. *Geomorphology*, Vol. 228, pp. 653-665.
- Giannechini, R., Galanti, Y., and D'Amato Avanzi, G. (2012). Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 12, pp. 829-842.
- Glade, T., Crozier, M., and Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "antecedent daily rainfall model". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157, pp. 1059-1079.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, pp. 239-267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, Vol. 5, pp. 3-17.
- Hong, W.P., Kim, Y.W., Kim, S.K., Han, J.G., and Kim, M. (1990). Prediction of rainfall-triggering landslides in Korea. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 6, No. 2, pp. 55-63.
- Huang, J., Ju, N.P., Liao, Y.J., and Liu, D.D. (2015). Determination of rainfall thresholds for shallow landslides by a probabilistic and empirical method. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, Vol. 15, pp. 2715-2723.
- Koenker, R., and Bassett Jr, G. (1978). Regression quantiles. *Econometrica: Journal of the Economic Society*, Vol. 46, No. 1, pp. 33-50.
- Larsen, M., and Simon, A. (1993). A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Vol. 75, No. 1-2, pp. 13-23.
- Lee, J.S. (2018). *Development of landslide susceptibility and vulnerability assessment techniques considering hazard level-based rainfalls*. Pukyong National University.
- Lee, J.S., and Kim, Y.T. (2017). Development of optimum rainfall threshold to predict of rainfall-induced landslides occurrence. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 333-340.
- Lee, J.S., Kim, Y.T., Song, Y.K., and Jang, D.H. (2014). Landslide triggering rainfall threshold based on landslide type. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 12, pp. 5-14.
- Lee, W.Y., and Sung, H.H. (2018). Analysis of rainfall thresholds for landslide occurrence in Chuncheon, Gangwon Province, Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 53, No. 5, pp. 669-689.
- Oh, J.R., and Park, H.J. (2013). Establishment of landslide rainfall threshold for risk assessment in Gangwon area. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 3, pp. 43-51.
- Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Luciani, S., Vennari, C., and Guzzetti, F. (2012). Lithological and seasonal control

- of rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, Vol. 139-140, pp. 79-90.
- Piciullo, L., Gariano S.L., Melillo, M., Brunetti, M.T., Preruccacci, S., Guzzetti, F., et al. (2017). Definition and performance of a threshold-based regional early warning model for rainfall-induced landslides. *Landslides*, Vol. 14, No. 3, pp. 995-1008.
- Rosi, A., Segoni, S., Catani, F., and Casagli, N. (2012). Statistical and environmental analyses for the definition of a regional rainfall threshold system for landslide triggering in Tuscany (Italy). *J. Geogr. Sci.*, Vol. 22, No. 4, pp. 617-629.
- Safeland. (2012). *Statistical and empirical models for prediction of precipitation-induced landslides*. Deliverable D1.5, p. 9.
- Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H. (2010). Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, Vol. 118, No. 1-2, pp. 167-175.
- Segoni, S., Rossi, G., Rosi, A., and Catani, F. (2014). Landslides triggered by rainfall: A semiautomated procedure to define consistent intensity-duration thresholds. *Comput. Geosci.*, Vol. 63, pp. 123-131.
- Segoni, S., Piciullo, L., and Gariano, S.L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, Vol. 15, No. 8, pp. 1483-1501.
- Song, Y.K., Kim, Y.U., and Kim, D.W. (2013). Recommendation of I-D criterion for steep-slope failure estimation considering rainfall infiltration mechanism. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 5, pp. 65-74.

<i>Received</i>	■	August 20, 2019
<i>Revised</i>	■	August 21, 2019
<i>Accepted</i>	■	August 29, 2019