



강우에 의한 돌발 산사태 예·경보 시스템 구축 방안

Development Method of Early Warning Systems for Rainfall Induced Landslides

김성필* · 봉태호** · 배승종***,† · 박재성****

Kim, Seong-Pil · Bong, Tae-Ho · Bae, Seung-Jong · Park, Jae-Sung

Abstract

The objective of this study is to develop an early warning system for rainfall induced landslides. For this study, we suggested an analysis process using rainfall forecast data. 1) For a selected slope, safety factor with saturated depth was analyzed and safety factor threshold was established (warning FS threshold=1.3, alarm FS threshold=1.1). 2) If rainfall started, saturated depth and safety factor was calculated with rainfall forecast data, 3) And every hour after safety factor is compared with threshold, then warning or alarm can issued. In the future, we plan to make a early warning system combined with the in-situ inclinometer sensors.

Keywords: Landslides; Early Warning System, Slope stability; Rainfall Forecast Data

1. 서 론

짧은 시간에 집중된 호우에 의한 피해는 매년 큰 피해를 유발하고 있으며 산사태 또한 이러한 재해의 하나이고, 2011년에만 824 ha에 산사태가 발생하여 43 명의 인명피해가 발생하였고, 2013년에도 312 ha에 산사태가 발생하여 3 명의 인명피해가 발생하였다. 2011년과 2013년에 각각 1,580 억원과 604 억원의 산림분야 총 복구비용이 소요되었다(통계청). 짧은 시간에 집중된 호우에 의해 급속하게 발생하는 이러한 돌발재해의 경우 적절한 예·경보가 이루어 질 수 있다면 인명 및 재산피해를 줄일 수 있을 것으로 판단되고 현재 적절한 예·경보를 발령하기 위한 기준 및 장비에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Aleotti, 2004; Kim et al., 2008; Oh et al., 2014). 강우가 사면으로 침투되면 증가된 하중에 의해 전단응력이 증가하고, 지하수위가 상승하게 되면 전단강도가 감소

하게 되어 사면의 안전율이 감소한다. Kim et al. (2013)은 산사태 해석을 위하여 이러한 영향을 GIS기반으로 분석하고자 하였다. Kim et al. (2014)은 사전에 강우의 강도와 지속시간의 기준을 설정하고 향후 강우에 의한 산사태 예·경보를 수행하고자 하였다. 이상과 같이 강우에 의해 산사태가 발생하는 기작에 대해서는 많은 연구가 수행되었으며, 실제로 이를 이용한 많은 시스템이 구축되고 있다. 산림청에서 제공하는 산사태정보시스템은 기상청의 강우자료(동네예보)를 이용하여 사전에 주의보와 경보를 발령하는 시스템이지만, 산사태 예측정보는 읍·면·동 단위로 제공되어 피해예방의 기초자료 정도로 활용되는 실정이다. 또한 권역별 자료를 활용하여 구축된 시스템으로 특정 지점의 산사태 예측에 활용하기에는 한계가 있다.

기존 연구 및 사례에 의하면 강우 시 발생하는 사면의 파괴는 지하수위 상승으로 인한 사면 내 간극수압의 증가에 따른 파괴보다는 강우의 침투로 포화심도가 임계깊이에 도달하여 얇은 파괴가 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 강우가 시작되고 이후에 사용할 수 있는 강우예측자료가 있다면, 이를 이용하여 포화심도에 따른 사면의 안전율 변화를 예측할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 산사태 예·경보 시스템을 구축하기 위하여 국지예보모델(LDAPS) 자료를 활용하였다. 본 연구의 결과를 이용하면, 해당 사면에 대하여 예보된 강우에 따른 침투 및 안정해석을 통해 강우가 지속되는 몇 시간 후의 산사태 예·경보를 발령할 수 있을 것으로 판단된다.

* Researcher, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

** Research Professor, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

*** Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

**** Researcher, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: 82-33-339-5811 Fax: +82-33-339-5830

E-mail: bsj5120@snu.ac.kr

Received: July 16, 2015

Revised: July 17, 2015

Accepted: July 20, 2015

II. 시스템 구축 방법

1. 산사태 예측방법

가. 불포화토의 함수특성

강우 시 사면파괴는 강우의 지반 내 침투에 따른 습윤전선(wetting front)의 발달과 포화대의 형성으로 인하여 발생하며(Fredlund and Rahardjo, 1995) 불포화토의 흡수력(suction pressure) 변화가 사면의 안정성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 불포화토의 침투와 안정해석을 위해서는 불포화토의 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve, SWCC)을 구해야 한다. Van Genuchten (1980)은 세 개의 매개변수를 사용하여 유연한 형태의 함수특성곡선식을 제안하였으며 다음과 같다.

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (1)$$

여기서, θ 는 정규체적함수비 ($= \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$), θ 는 체적함수비(%)로 's'는 포화률 'r'은 잔류상태를 나타내며, ψ 는 모관흡수력(kPa), α 는 공기함입치와 관련된 곡선맞춤변수, m 은 높은 모관흡수력 범위에서 곡선 기울기와 관련된 곡선맞춤변수 ($= 1 - 1/n$), n 은 함수특성곡선의 변곡점에서 기울기와 관련된 곡선맞춤변수이다.

Morel-Seytoux et al. (1996)은 Van Genuchten의 함수특성곡선식을 이용하여 습윤전선에서 모관흡수력(ψ_{mf}) 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\psi_{mf} = \frac{0.046m + 2.07m^2 + 19.5m^3}{\alpha(1 + 4.7m + 16m^2)} \quad (2)$$

여기서, ψ_{mf} 는 습윤전선에서의 모관흡수력(kPa), α 와 m 은 Van Genuchten의 함수특성곡선식의 맞춤 변수이다.

나. 강우에 의한 침투

강우에 따른 사면 표층부의 포화심도를 산정하는 방법은 Green & Ampt Method (Green and Ampt, 1911), Wetting Band Method (Lumb, 1962), Mein & Larson Method (Mein and Larson, 1973) 등이 있다. 본 연구에서는 Chu et al. (2005)이 Green and Ampt 모델을 바탕으로 여러 개의 층으로 구성된 지반에 비정상 강우가 내릴 때의 강우 침투를 모사할 수 있도록 제시한 모델을 적용하였다.

Fig. 1은 제안된 침투 모델의 지반 조건을 나타낸 것으로 H_0

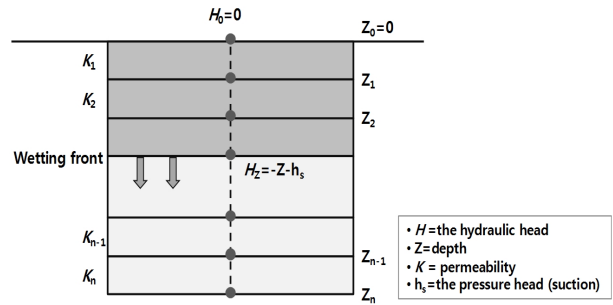


Fig. 1 Infiltration into a layered soil profile under an initially ponded condition (Chu et al., 2005)

는 수막(ponding) 깊이를 나타내지만 가파른 사면의 경우 유출이 용이하기 때문에 일반적으로 무시된다. 비정상 강우에 대한 침투해석은 수막현상이 발생할 경우와 발생하지 않을 경우로 나누어 해석된다. 여기서 강우강도를 I , 지반의 침투능을 f 라고 하면 강우 발생 후 n 층에서의 침투는 다음과 같다.

- $I \geq f$ 일 경우 (Surface ponding case)

습윤전선이 n 번 층을 통과할 경우 ($Z_{n-1} < z \leq Z_n$) 지반의 침투는 다음과 같다.

$$f_z = \frac{z + \psi_{mf_n}}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{Z_j - Z_{j-1}}{K_j} + \frac{z - Z_{n-1}}{K_n}} \quad (3)$$

그리고 누적 침투량은 다음과 같다.

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + (z - Z_{n-1}) \Delta\theta_n = \sum_{j=1}^{n-1} (Z_j - Z_{j-1}) \Delta\theta_j + (z - Z_{n-1}) \Delta\theta_n \quad (4)$$

깊이 Z 까지 침투하는데 걸리는 시간은 다음과 같다.

$$t_z = t_{n-1} + \frac{\Delta\theta_n}{K_n} (z - Z_{n-1}) + \Delta\theta_n \left[\sum_{j=1}^{n-1} Z_j \left(\frac{1}{K_j} - \frac{1}{K_{j+1}} \right) - \frac{\psi_{mf_n}}{K_n} \right] \ln \frac{z + \psi_{mf_n}}{Z_{n-1} + \psi_{mf_n}} \quad (5)$$

- $I < f$ 일 경우 (Non-ponding case)

지표 수막이 발생하지 않을 경우 지반의 침투능은 강우강도와 동일하며 강우는 모두 지반으로 침투하여 piston flow를 형성한다.

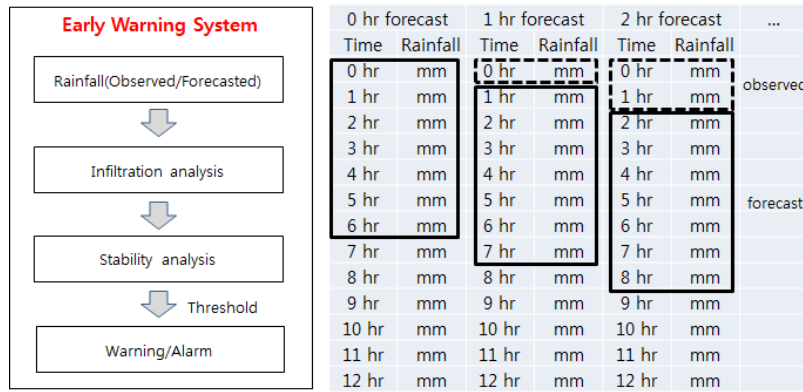


Fig. 2 Landslide early warning system operation

$$f_z = I \tag{6}$$

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + \int_{t_{n-1}}^t idt \tag{7}$$

$$z = \frac{F_z - F_{Z_{n-1}}}{\Delta\theta_n} + Z_{n-1} \tag{8}$$

다. 사면안정해석

본 연구에서 사면의 안정해석은 무한사면을 가정하고 수행하였다. 지반이 균질할 경우 무한사면의 안전율은 Fredlund 등이 제안한 불포화토의 전단강도식을 이용하여 식 (9)를 통하여 산정할 수 있다.

$$\tau_s = c' + \sigma' \tan\phi' + (u_a - u_w) \tan\phi_b \tag{9}$$

여기서, c' 는 포화지반의 점착력, ϕ' 는 포화지반의 유효강도 정수, σ' 는 파괴면에서의 유효연직응력, $(u_a - u_w) \tan\phi_b$ 는 모관흡수력에 의한 겉보기 점착력이다. 모관흡수력에 의한 겉보기 점착력은 함수특성곡선으로부터 산정할 수 있으며 다음과 같다 (Vanapalli et al., 1996).

$$(u_a - u_w) \tan\phi_b' = \theta [(u_a - u_w) \tan\phi'] \tag{10}$$

여기서, θ 는 모관흡수력이 $(u_a - u_w)$ 일 때의 정규체적함수 비이다. 따라서 불포화 지반에서의 무한사면 안정해석식은 모관흡수력으로 나타내면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{c' + \sigma' \tan\phi' + \psi \tan\phi' \left(\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right)^m}{\tau} \tag{11}$$

2. 예·경보 시스템

본 연구에서 산사태 예측을 위하여 사용한 강우예측자료는 국지예보모델 (LDAPS) 자료를 이용하였다. 국지예보모델의 수평해상도는 1.5 km이고 1시간 간격으로 향후 36시간의 예측자료를 제공하며, 본 연구에서는 이 중 12시간 강우예측자료를 시스템에 이용하였다.

강우예측자료를 이용한 예·경보 과정을 요약하면, 1) 대상 사면에 대하여 포화심도에 따른 안전율의 변화를 이용하여 사전에 주의보 및 경보 기준을 설정하고, 2) 강우가 발생하면 강우사상에 대하여 실시간으로 침투해석을 실시한다. 그리고 3) 사전에 설정된 기준과 비교하여 산사태 발생에 대한 주의보 및 경보를 발령할 수 있다. 매 시간단위로 예측자료는 최신의 자료로 업데이트되고 과거의 강우는 관측자료로 대체되면 실시간 예·경보 시스템이 완성된다. 이상의 과정을 요약하면 Fig. 2와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 대상지역

대상지는 Fig. 3과 같이 강원도 평창군 대화면 신리에 위치하며, 사면의 아래에 주택이 있어 사면이 파괴되는 경우 인명 및 재산피해가 예상되는 곳이다. 산림청에서 제공하는 산사태정보시스템의 산사태 위험지도에서는 사면의 상부에서 위험등급 1등급으로 나타나고 있다.

2. 강우 침투에 따른 사면의 안정성 예측

가. 침투깊이에 따른 안전율 변화를 이용한 예·경보 기준 설정
본 연구의 대상지 사면의 경사는 45°, 심도는 2.0 m이며 해

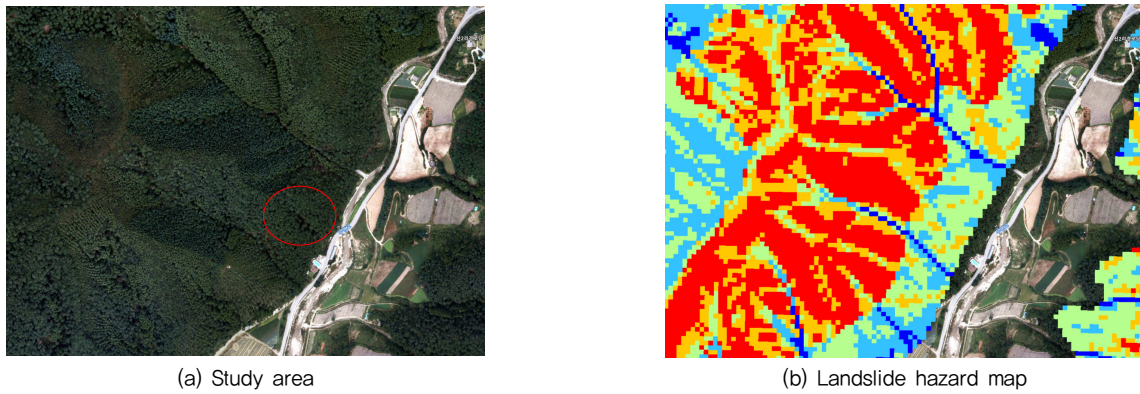


Fig. 3 Study area and Landslide hazard map (Korea Forest Service)

Table 1 Physical properties of soil

Cohesion C (kPa)	Friction Angle ϕ ($^{\circ}$)	Permeability K_s (cm/hr)	Dry Unit Weight γ_d (kN/m 3)	SWCC parameters and Initial conditions					
				a	m	n	ψ_{mf} (cm)	θ_o (%)	θ_s (%)
13.0	21.0	3.33×10^{-4}	14.94	0.041	0.428	1.750	80.8	28	42

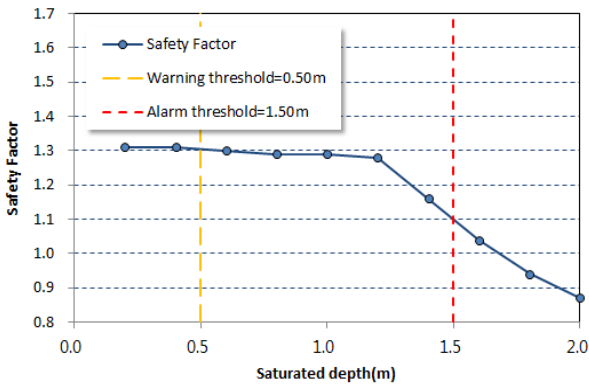


Fig. 4 Warning and alarm threshold for saturated depth

석에 사용된 물성값은 다음의 Table 1과 같다. 본 연구에서 1단계 예보인 ‘주의보’ 기준은 건설공사 비탈면 설계기준의 우기(강우침투를 고려한 안정해석)을 적용하여 안전율이 1.3이하가 되면 발령하는 것으로 하였고, 2단계 예보인 ‘경보’ 기준은 안전율이 1.0에 근접했다는 경고로 안전율 1.1을 적용하였다.

Fig. 4는 대상 사면에 대하여 포화심도의 깊이에 따른 안전율의 변화를 이용한 주의보 및 경보기준을 나타낸다.

대상 사면은 경사가 매우 급하여 강우가 없는 조건에서도 안전율은 1.32로 나타났다. 또한 대상 사면은 토심 전체가 포화되는 경우 파괴에 이를 위험성이 존재하는 것으로 나타났다. 강우가 발생하고 시간이 경과하면서 포화심도가 0.5 m에 도달하면 안전율은 1.3이 되고, 포화심도가 1.5 m에 도달하

면 안전율은 1.1이 되어 각각 주의보와 경보를 발령해야 되는 것으로 나타났다.

나. 강우사상의 적용 결과

실제 강우사상을 적용하여 예·경보의 발생 현황을 고찰하고 예·경보 시스템의 적용성을 검토하고자 하였다. 적용한 강우(1)은 2012년 7월 5일 07시부터 2012년 7월 6일 22시까지 발생한 강우로 최대 시강우량은 31 mm/hr이 발생하였다. 강우(2)는 2013년 7월 13일 01시부터 2013년 7월 16일 24시까지 발생한 강우로 최대 시강우량은 42 mm/hr이 발생하였다. 강우(2)의 경우는 전체를 연속강우로 고려할 수 있는가를 고려하였으나 침투에 영향을 미칠 수 있을 정도의 연속적인 강우로 판단하였다. 각각의 강우사상은 Fig. 5와 Fig. 6과 같으며, 강우량과 함께 산림청 산사태정보시스템의 주의보 및 경보발령 현황을 함께 나타내었다.

강우가 진행되는 동안 산림청의 산사태정보시스템에 의하면 강원도 평창군 대화면에 산사태 주의보와 경보가 발령되었다. 강우(1)에 대해서 주의보는 2012년 7월 6일 13시부터 22시까지 발령되었고, 경보는 같은 날 17시와 18시에 발령되었다. 강우(2)에 대해서 주의보는 2013년 7월 15일 08시부터 20시까지 발령되었고, 경보는 같은 날 14시와 18시에 발령되었다. 하지만 면지역 전체에 발령되어 개별 사면에 대해서 주의 수준을 설정하기는 어렵다. 적용된 강우사상과 연구대상 사면의 침투능은 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 그리고 침투된 강우에 의한 포화심도의 진행을 시간별로 나타내면 Fig. 9, Fig. 10과

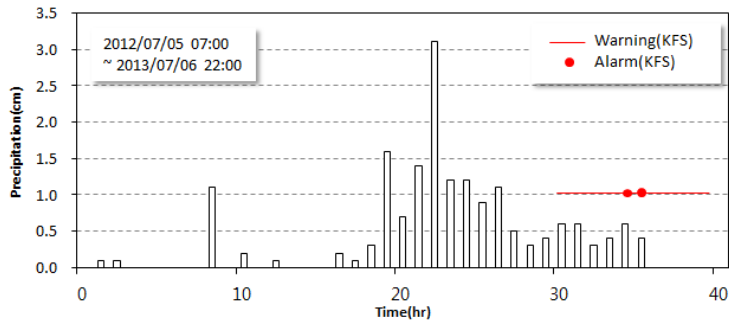


Fig. 5 Rainfall (1) and Korea Forest Service warning status

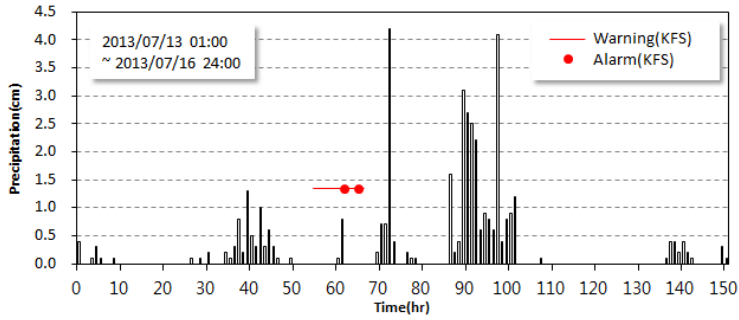


Fig. 6 Rainfall (2) and Korea Forest Service warning status

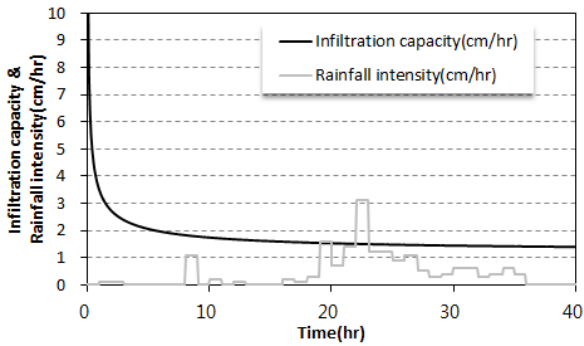


Fig. 7 Infiltration capacity and rainfall intensity for rainfall (1)

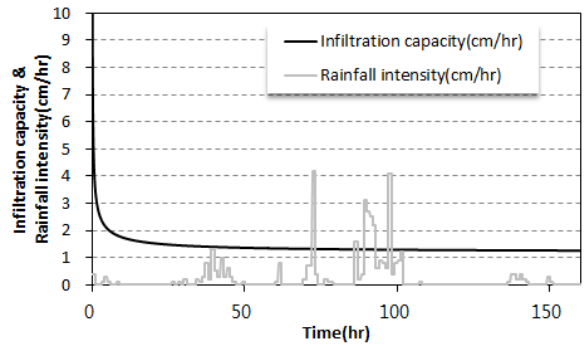


Fig. 8 Infiltration capacity and rainfall intensity for rainfall (2)

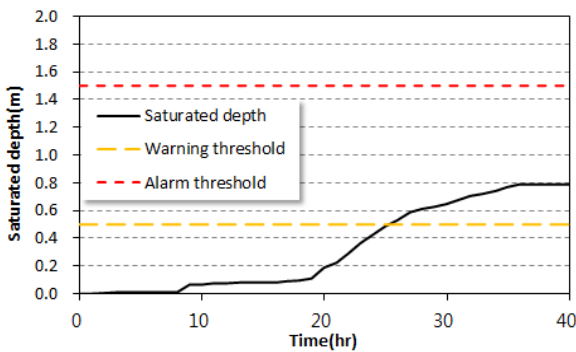


Fig. 9 Saturated depth change with rainfall (1)

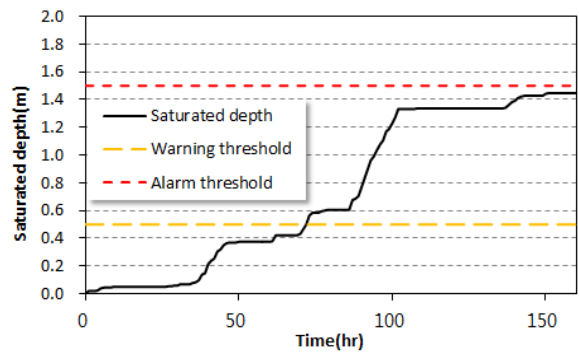


Fig. 10 Saturated depth change with rainfall (2)

같다.

Fig. 9에서 보면 상대적으로 짧은 강우시간에도 포화심도는 0.8 m까지 나타났고 그로 인해 Fig. 4에 의하면 사면의 안전율은 1.3이하로 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 강우가 시작되고 약 25시간 이후에 주의보가 발령되는 것으로 나타났다. 산림청 산사태정보시스템에 의한 주의보는 강우 시작 후 30시간 이후에 발령되어 경보까지 진행되었으므로 본 시스템과 유사한 정도의 시간에 발령된 것을 알 수 있다. 단지 본 시스템에 의하면 경보 수준까지는 도달하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 10을 보면 주의보인 안전율 1.3에 해당하는 포화심도는 약 70시간 경과 후인 2013년 7월 15일 23시에 발령되는 것으로 나타났다. 전체 강우기간 중에서 경보에 해당하는 포화심도는 나타나지 않았다. 본 시스템에 의하면 산림청 산사태정보시스템에서 주의보와 경보를 대상지역에 발령하던 시점 이후에 보다 사면의 안전율이 낮아지는 것을 알 수 있다.

3. 예·경보 시나리오

이상에서 실제 강우를 적용하고 연구대상 사면에 적용한 결과를 이용하여 당시의 예·경보 상황을 정리하면, 강우가 시작되면서 관측자료와 강우예측자료를 이용하여 매 시간 관측자료+12시간의 강우 입력자료를 생성한다. 강우 입력자료를 이용하여 대상 사면에 대한 침투해석 및 안정해석을 통하여 관측자료+12시간 동안의 안전율 변화를 구하고, 기준 안전율 이하에 대하여 주의보 및 경보를 발령하게 된다. 따라서 본 예·경보 시스템에 의하면 현재부터 12시간 이후의 사면의 파괴 위험에 대한 주의보 및 경보를 발령할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 최근에 증가 추세에 있는 강우에 의한 돌발 산사태 피해에 대비하기 위하여 산사태 예·경보에 강우 예측자료를 활용하기 위한 연구이다. 이를 위하여 강우예측자료는 국지예보모델(LDAPS) 자료를 이용하였으며, 사면에 대한 침투해석과 안정해석을 연계하여 향후 산사태 위험을 예측하여 개별 사면에 대한 주의보 및 경보를 발령할 수 있는 체계를 제안하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 산림청에서 제공하는 산사태정보시스템의 경우 기상청의 강우자료(동네예보)를 이용하여 사전에 주의보와 경보를 발령하는 시스템이지만, 산사태 예측정보는 읍면동 단위로 제공되어 피해예방의 기초자료 정도로 활용되는 실정이다.

2. 본 연구에서는 개별 사면에 대한 산사태 예·경보 시스템으로서 직접적인 피해가 예상되는 시설 또는 주민에게 직접적으로 예측정보를 전달할 수 있는 시스템을 제안하였다.
3. 예·경보 시스템은 강우자료와 연계된 사면의 침투해석, 침투에 따른 포화심도의 진행에 따른 안정해석을 통해 개별 사면에서의 주의보 및 경보 기준을 설정하였다. 강우자료를 예보자료를 이용하게 되면 향후의 사면의 안전율의 변화를 예측할 수 있고, 기준에 따라 주의보 및 경보를 전달할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 과거에 발생한 강우자료를 예·경보 시스템에 적용한 결과, 산사태정보시스템에서와 달리 개별 사면에 대한 산사태 위험도를 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 강우에 의하면 해당사면의 안전율은 강우에 의해 안전율 1.1에 접근한 수준으로 나타났다.
5. 과거에 발생한 강우자료를 예·경보 시스템에 적용한 결과, 예·경보 시스템에서는 강우의 지속시간을 어떻게 선정할 것인가가 매우 중요할 것으로 판단된다. 예를 들어 장마기간에 산발적으로 강우가 지속되는 경우에는 개별 강우로 해석하는 경우와 각 강우를 연속해서 해석하는 경우 산정되는 안전율의 차이가 크게 되므로 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안된 예·경보 시스템은 사면에 대한 안정해석을 기본으로 하고 있으며, 대상 사면이 해석과 다른 거동을 보이는 경우에는 기대하는 기능을 수행하지 못할 수 있다. 따라서 현장에 사면의 파괴와 관련된 거동을 계측할 수 있는 센서 및 통신기술을 융합하여 예측과 다른 거동에 대비한다면 보다 효율적인 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 농생명산업기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (과제번호: 313018-03).

REFERENCES

1. Aleotti, P., 2004, A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failure, *Engineering Geology* 73: 247-265.
2. Baek, H. J., Kim, K. M., Kim, D. H., 2010, Effect of the Hysteresis of Soil-Water Characteristic Curve on Unsaturated Soil Slopes Stability, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* 47(3):349-358. (in Korean)

3. Dahal, R. K. and Hasegawa, S., 2008, Representative Rainfall Thresholds for Landslides in the Nepal Himalaya, *Geomorphology* 100: 429-443.
4. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H., 1995, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, *John Willey & Sons, Inc.*
5. Fredlund, D. G. and Xing, A., 1994, Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532.
6. Green, W. H., Ampt, G. A., 1911, Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils, *Journal of Agricultural Science*, 4: 1-24.
7. Jeong, S. S., Choi, J. Y., Lee, H. H., 2009, Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 29(1C): 1-9. (in Korean)
8. Kim, H. W., Kim, G. S., Chang, S. B., 2008, A study on the landslide detection method using wireless sensor network (WSN) and the establishment of threshold for issuing alarm, *Preceeding of the 2008 ITFE Summer Conference*, 262-267. Yongin, Gyeonggi, Korea. (in Korean)
9. Kim, J. H., Jeong, S. S., Bae, D. H., 2013, Predicting Rainfall Infiltration-Groundwater Flow based on GIS for a Landslide Analysis, *Journal of the KGS* 29(7): 75-89. (in Korean)
10. Kim, S. P., Park, J. S., Bae, S. J., Heo, J., 2014, Thresholds of Rainfall Duration and Intensity for Prediction Abrupt Landslide Occurrence, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 53-58. (in Korean)
11. Lee, J. and Yu, C., 2012, A Study on Change of Soil-Water Retention Curve with Different Net Confining Pressures and Porosities using a Suction-Saturation Control Technique, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 93-103. (in Korean)
12. Lu, N. and Likos, W. J., 2004, Unsaturated Soil Mechanics, Hoboken, New Jersey : *John Willey & Sons, Inc.*
13. Lumb, P., 1962, Effects of rain storms on slope stability, *Symposium on Hong Kong Soils*: 73-87.
14. Mein, R. G., Larson, C. L., 1973, Modeling infiltration during steady rain, *Water Resources Research* 9(2): 384-394.
15. Morel-Seytoux, H. J., Meyer, P. D., Nachabe, M., Touma, J., Van Genuchten, M. T., and Lenhard, R. J., 1996, Parameter equivalence for Brooks-Corey and van Genuchten soil Characteristic: Preserving the effective capillary drive, *Water Resources Research* 32(5): 1251-1258.
16. Oh, J. R. and Park, H. J., 2014, Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(2): 115-129. (in Korean)
17. Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H., 2010, Relationship between the Initiation of a Shallow Landslide and Rainfall Intensity-Duration Thresholds in Japan, *Geomorphology* 118: 167-175.
18. Song, C. S. and Shin, C. S., 2005, Characteristics of Permeability for an Unsaturated Soil, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(4): 35-41. (in Korean)
19. Van Genuchten, M. T., 1980, A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
20. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., Clifton, A. W., 1996, Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal* 33: 379-392.