불포화지반 특성을 고려한 물리적 사면 모델 기반의 산사태 취약성 분석

김진석 · 박혁진*

세종대학교 지구정보공학과

Assessment of Landslide Susceptibility of Physically Based Model Considering Characteristics of the Unsaturated Soil

Jin Seok Kim and Hyuck Jin Park*

Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University, Seoul 143-747 Korea

Rainfall-induced landslides are caused by reduction of effective stress and shear strength due to rainfall infiltration. In order to analyze the susceptibility of landslides, the statistical analysis approach has been used widely but this approach has the limitation which cannot take into account of landslide triggering mechanism. Therefore, the physically based model which can consider the process of landslide occurrence was proposed and commonly used. However, the most previous physically based model analyses evaluate and consider the strength characteristics for saturated soil only in the susceptibility analysis. But the strength parameters for unsaturated soil such as matric suction should be considered with the strength parameters for saturated soil since the shear strength in unsaturated soil also plays important role in the stability of slope. Consequently this study suggested the modified physically based slope model which can evaluate strength characteristics for both of saturated and unsaturated soils. In addition, this study evaluated the thickness of saturated part in slope with rainfall intensity and hydraulic characteristics of slope on the basis of physically based model. In order to evaluate the feasibility, the proposed model was applied to practical example in Jinbu area, Gangwon-do, which was experienced large amount of landslides in July 2006. The ROC graph analysis was used to evaluate the validation of the model, and the analysis results were compared with the results of the previous analysis approach.

Key words : unsaturated soil, physically based model, rainfall intensity, Geographic Information System(GIS), ROC analysis

강우로 인해 유발되는 산사태는 강우침투로 인한 사면내 간극수압의 증가와 흙의 유효응력 및 전단강도의 감소로 인해 발생한다. 현재 광역적인 지역을 대상으로 산사태의 발생가능성을 분석하는데 주로 활용되고 있는 통계적 분석 기법은 이러한 산사태 발생메커니즘을 고려할 수 없는 단점을 갖고 있다. 따라서 최근 들어 산사태의 발생메커니즘을 고려할 수 있는 물리적 사면모델이 산사태 취약성 분석을 수행하는데 많이 적용되고 있다. 그러나 사면 모델을 활용하는 기존의 연구는 강우의 침투로 발생하는 포화층 상부의 불포화층의 특성을 거의 고려하지 않고 포화층의 강도 특성만을 고려하여 분석을 수행하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 포화층의 강도특성과 함께 불포화층의 강도 특성을 고려한 수정 전단강도 식을 활용하여 산사태 취약성 분석을 수행하고자 하였다. 또한 강우강도와 지반의 수리적 특성을 고려하여 지하수위 산정이 가능한 포화깊이비 계산식을 사면 모델과 결합하여 시간에 따른 지하수위 변화를 계산하고 이를 취약성 분석에 활용하였다. 본 연구에서는 실제 집중호우가 발생한 강원도 평창군 진부면 일대지역의 2006년 7월 14 ~ 16일의 강우강도를 이용하여 3일간의 안전율을 계산하여 산사태 취약성 분석을 수행하였으며 그 결과를 ROC 분석을 통해 실제 산사태 발생 위치와 비교하여 예측의 정확성을 분석하였다.

주요어 : 불포화토, 물리적 기반 모델, 강우강도, 지리정보시스템(GIS), ROC 분석

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

1. 서 론

산사태를 유발하는 주요 원인으로는 강우, 지진, 동결융해, 사면하부의 침식이나 굴착, 화산활동 등과 같은 다양한 요인이 있으며 우리나라에서 발생하는 산사태는 주로 강우에 의해 유발된다(Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Chae *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2011). 특히 최근들어 기후변화의 영향으로 많은 양의 강우가 단기간에 집중되는 경향을 보이고 있으며 이로 인해 산사태의 발생과 피해도 증가하고 있는 실정이다. 산사태의 발생은 유발요인인 강우뿐만 아니라 지질, 지형, 식생 등과 같은 다양한 환경적인 요인들의 복합적인 작용에 의해 발생하기 때문에 이러한 다양한 인자들을 고려한 광역적인 평가가 필수적이다. 따라서 이러한 다양한 인자들과 유발요인인 강우를 고려하여 산사태 발생 가능성을 예측하려는 다양한 연구가 시도되어 왔다.

강우로 인하여 유발되는 산사태는 강우발생시 강우의 침투에 의한 사면내 간극수압 증가와 흙의 유효응력 감소 그리고 이에 따른 전단강도 감소로 인해 발생한다. 그러나 광역적인 지역에서 산사태의 발생가능성을 분석하는 데 주로 활용되고 있는 통계적 분석기법은 이러한 산사태 발생메커니즘을 고려할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근 들어 이러한 산사태의 발생메커니즘을 고려할 수 있는 물리적 기반의 모델(physically based model)이 산사태 취약성 분석에서 활발하게 적용되고 있다(Montgomery and Dietrich, 1994; Zhou *et al.*, 2003; Frattini *et al.*, 2004; Godt *et al.*, 2008; Liu and Wu, 2008; Li and Chi, 2011; Ho *et al.*, 2012; Lee and Park, 2012; Park *et al.*, 2013). 물리적 기반의 모델을 활용하여 산사태 발생 가능성을 분석하는 경우 산사태의 발생메커니즘을 구현할 수 있는 물리적 사면모델이 활용되며 다양한 사면모델 중 무한사면모델이 가장 범용적으로 이용된다. 무한사면모델은 사면의 지형적인 특성과 사면을 구성하는 흙의 공학적 특성을 함께 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 국내의 사면활동형태와 유사하여 국내에서 발생하는 산사태를 예측하기 위한 적절한 모델로 평가되고 있다(National Disaster Management Institute, 2000). 물리적 모델을 기반으로 하는 분석의 경우 분석에서 가장 중요한 강우로 인한 지하수 상승을 고려하기 위해 다양한 분석기법을 활용하여 왔으며 최근에는 사면모델과 수리학적 모델을 결합하

고 GIS(Geographic Information System)를 활용하여 산사태 취약성을 분석하는 연구가 수행되고 있다(Salciarini *et al.*, 2006; Godt *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2008; Liao *et al.*, 2011; Lee and Park, 2012; Park *et al.*, 2013). 그러나 이러한 분석기법들은 강우의 침투로 인해 지하수위가 사면 하부로부터 차올라 형성되는 포화층의 특성만 고려하였을 뿐 포화층 상부에 존재하는 불포화층의 특성에 대하여서는 거의 고려하지 않았다. 그러나 Montrasio and Valentino (2008)에 의하면 사면의 안정성은 불포화층과 포화층의 강도특성에 의해 좌우되며 따라서 불포화층의 강도특성을 고려하는 것이 산사태의 취약성 평가에 매우 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사면내 포화 영역과 불포화 영역의 강도 특성을 동시에 고려할 수 있는 취약성 분석기법을 활용하여 집중호우로 대규모의 산사태가 발생한 강원도 평창군 진부면 일대에 대하여 분석을 수행하였으며 그 결과를 기존의 해석기법을 통해 획득한 결과와 비교해 보았다.

2. 불포화지반특성을 고려한 산사태 안정성 해석

물리적 기반의 사면 모델을 이용하여 안정해석을 수행하는 대부분의 연구는 Terzaghi의 유효응력 이론에 따라 지표에 떨어진 강우의 침투에 의해 지하수위가 상승하게 되고 이에 따라 강우로 포화된 영역(포화대)에 간극수압이 상승하게 되고 강도가 감소하여 산사태가 발생한 것으로 분석하여 왔다. 그러나 이런 해석과정은 포화된 영역의 강도 특성만 고려할 뿐 포화대 상부에 존재하는 불포화 영역의 강도 특성에 대하여서는 고려하지 않는 문제점을 가지고 있다. 앞 서 언급한 바와 같이 사면의 안정성은 포화대의 강도특성뿐만 아니라 불포화대의 강도특성에 의해서도 영향 받게 되는데 특히 불포화대의 강도특성은 모관흡수력(matric suction)에 의해 좌우된다(Fredlund *et al.*, 1996). 모관흡수력은 간극 내에 존재하는 공기압과 수압의 차이로 주로 음의 값을 보여 사면의 안정성에 중요한 역할을 한다. Lu and Likos (2004)에 의하면 강우 침투로 인해 지반의 함수율이 증가하게 되면 불포화대에 존재 하던 모관흡수력이 급격하게 감소하게 되고 이에 따라 전단강도 값이 감소하면서 안정성이 감소하게 된다. 흙이 완전히 포화되면 모관흡수력의 값이 0이 되며 이에 따라 전단강도 값도 최소값을 보이게 된다.

포화된 영역내에 작용하는 전단강도는 유효응력이론

에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi \quad (1)$$

이때 c' 은 유효점착력, $(\sigma - u)$ 는 유효응력 그리고 ϕ 는 마찰각이다. 한편 불포화지반은 흙 입자, 물, 물-공기 접촉면(air-water interface) 그리고 공기의 4가지 상으로 존재하게 되는데 물-공기 접촉면에서 공기압(pore-air pressure, u_a)과 수압(u_w)의 관계, 즉 이 두 값의 차이가 모관흡수력이 된다. 건조 상태에서 사면 내의 불포화영역은 음의 간극수압(negative pore water pressure)의 영향으로 모관흡수력이 지반 내부의 유효응력을 증가시키며 사면을 안정한 상태로 유지하게 한다. 그러나 강우의 침투로 인해 함수율이 증가하게 되면 토층상부에 존재하는 불포화영역의 모관흡수력이 감소하게 되며 사면이 불안정한 상태가 된다. 따라서 Fredlund and Rahardjo (1993)은 불포화층의 모관흡수력을 고려하기 위하여 수정된 전단강도식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \tau &= c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \\ &= c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + c_\psi \end{aligned} \quad (2)$$

이때 c' 은 포화층대의 유효점착력, $(\sigma_n - u_a)$ 는 파괴면에 작용하는 순연직응력, ϕ' 은 순연직응력에 의한 유효마찰각, $(u_a - u_w)$ 는 모관흡수력 그리고 ϕ^b 는 모관흡수력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 각이다. $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ 는 모관흡수력과 관계되는 항으로 Fredlund *et al.* (1996)은 이 값을 겉보기점착력(apparent cohesion) c_ψ 로 표현하였다. 그러나 모관흡수력은 그 값을 획득하기 어렵기 때문에 상대적으로 획득이 용이한 흙의 포화도로부터 모관흡수력과 겉보기 점착력을 획득하기 위한 다양한 연구가 시도되었으며 Fredlund *et al.* (1996)와 Silva (2000)가 다양한 종류의 흙을 대상

으로 실험을 실시하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$c_\psi = AS_\lambda(1 - S_r)^\lambda(1 - m)^{3.4} \quad (3)$$

이때 A , λ 는 흙의 종류에 따른 변수(Table 1), S_r 은 흙의 포화도 그리고 m 은 사면의 포화깊이비이다. 식 (3)에서 사용된 m 값은 사면의 깊이대비 지하수위가 상승한 비로 기존의 연구에서는 강우량과 관련 없이 임의의 값을 사용하여 지하수위를 산정하거나 수리모델을 활용하여 획득하여 왔다. 특히 임의의 값을 지하수위로 사용하는 경우 실제 발생한 강우강도를 고려할 수 없으며, 지형과 흙의 성질에 따라 다르게 형성되는 지하수위를 고려할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 강우량과 강우강도를 고려하여 지하수위를 산정하기 위하여 Montrasio *et al.* (2011)이 제안한 식을 이용하였다.

$$m = \frac{0.7}{nH(1 - S_r)} \sum h_i e^{-K_T(t - t_i)} \quad (4)$$

이때 n 은 간극률, H 는 사면의 깊이, h_i 는 강우깊이, K_T 는 배수능[day^{-1}] 그리고 $(t - t_i)$ 는 시간간격이다. 포화깊이비는 강우량을 의미하는 강우깊이 h 와 시간 t 의 함수로써 표현되며 시간에 따른 포화깊이비 산정이 가능하다. 사면내 강우 깊이 h 는 강우발생 시간으로부터 멀어짐에 따라 침투 및 누수 등으로 감소하게 되는데 이를 Saxton and Lenz (1967)로부터 수정된 선행강우지수(Antecedent Precipitation Index, API) 모델을 통해 음의 지수함수로 표현된다. K_T 는 배수능력을 나타내는 파라미터이며 수리전도도(hydraulic conductivity)를 사면의 단위길이로 나눈 값이다. 이렇게 획득된 값들을 활용하여 사면내 불포화영역의 강도특성과 강우량에 따른 포화깊이비가 반영된 수정된 안전율 계산식은 다음과 같으며 이 식을 활용하여 연구지역에 대한 분석을 수행하였다.

$$F_s = \frac{\cot \beta \tan \phi [\Gamma + m(n_w - 1)] + C' \Omega}{\Gamma + mn_w} \quad (5)$$

이때 C' , Γ , n_w , Ω 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C' &= c' + c_\psi \\ \Gamma &= G_s(1 - n) + nS_r \\ n_w &= n(1 - S_r) \\ \Omega &= \frac{2}{\sin 2\beta H r_w} \end{aligned}$$

Table 1. Parameters λ , A for different types of soil(After Montrasio and Valentino, 2008)

Soil	λ	A
Soft clay	0.4	100
Medium clay	0.4	100
Stiff clay	0.4	100
Clayey mud	0.4	80
Mud	0.4	80
Sandy mud	0.4	80
Loose sand	0.4	40
Medium sand	0.4	40
Dense sand	0.4	40

3. 연구지역

본 연구에서 취약성분석을 수행한 연구지역은 행정 구역상으로는 강원도 평창군 진부면 일대이며 경도 $128^{\circ}29'9.86'' \sim 128^{\circ}36'16.61''$, 위도 $37^{\circ}39'5.77'' \sim 37^{\circ}35'11.81''$ 에 위치한다(Fig. 1). 연구지역의 범위는 유역분지(drainage basin)를 토대로 지형의 특성을 고려하여 선정 하였으며 연구지역의 규모는 약

48 km^2 이다. 연구지역의 평균고도는 약 660 m로 대체로 높은 지형의 산악지이고, 사면의 경사각은 최대 46° 이며 평균 21° 를 보인다. 본 연구지역에서 2006년 7월 14일 ~ 16일 동안 약 300 mm의 집중호우가 내렸으며 이로 인해 약 1,100여개소의 산사태가 발생하였다.

연구지역의 지질은 Fig. 2와 같이 임계화강암(Imgye Granite)이 연구지역에 넓게 분포하고 있으며, 조선계 정선석회암층(Jeongseon Limestone)과 부정합으로 놓

Fig. 1. The study area and location of landslides.

Fig. 2. Geological map.

인 평안계 녹암층(Nokam Sandstone)이 연구지역의 남쪽에 분포하고 있다. 쥐라기의 임계화강암은 NW-SE 방향으로 큰 저반과 옥천대를 따라 작은 암주로 나타나며 트라이아스기의 녹암층은 대부분 사암으로 그리고 오르도비스기의 정선석회암층은 대부분 석회암과 소량의 사암 및 셰일로 구성되어 있다(Lee and Park, 2012).

4. 공간 데이터베이스 구축

본 연구에서는 GIS를 활용하여 연구지역의 입력자료를 데이터베이스화하고 산사태 취약성을 분석하였으며 이를 위하여 모든 입력 자료는 Arc/Info 프로그램을 사용하여 10×10 m 격자의 래스터형식으로 데이터베이스화 하였다(Fig. 3). 분석에 활용된 입력 자료는

Fig. 3. Thematic maps for (a) slope, (b) effective cohesion, (c) friction, (d) hydraulic conductivity, (e) soil depth.

크게 연구지역 내 사태물질의 지질공학적 및 물리적 특성, 연구지역의 기하학적 특성, 그리고 강우관련 자료 등이 있다. 분석을 위하여 획득된 입력 자료들은 데이터베이스로 구축하고 수치지도와 연결하여 속성정보를 추가하였고 각 속성을 기반으로 래스터를 구축하여 주제도를 작성하였다.

본 연구에서는 같은 암종으로부터 형성된 흙의 공학적 특성은 유사하다는 가정을 바탕으로 진행하였으며 동일 암종으로부터 형성된 토층 내의 불균질성은 고려하지 않았다. 따라서 유사한 지질공학적 특성을 보이는 지역으로부터 획득된 지반 물성치의 평균값을 지반 물성치의 대푯값으로 고려하여 분석을 수행하였다. 실험을 위한 시료는 주로 산사태가 발생했던 위치를 중심으로 시료채취가 용이하고 암종별로 대표성을 갖는 것으로 판단되는 위치에서 획득하였다.

먼저 사면 경사의 경우 1:25,000 수치지형도를 이용하여 수치지형도의 등고선 벡터레이어로부터 TIN(Triangulated Irregular Network)을 형성한 후 사면의 경사 데이터를 획득하였다(Fig. 3a). 또한 사면 구성 물질의 지질공학적 특성인 점착력과 내부마찰각은 연구지역의 암석 종류에 따라 암종당 2~3개 위치에서 3개씩의 시료를 채취하고 총 84회의 직접전단시험을 수행하여 획득하였다(Table 2). Fig. 3b와 c는 실내실험을 통해 획득한 점착력과 내부마찰각의 분포를 나타내는 주제도이다. 또한 지반의 수리적 특성인 수리전도도는 암종별 시료를 채취하여 총 24회의 정수위 투수시험을 통하여 획득하였고 이를 주제도로 작성하였다(Fig. 3d). 토심의 경우 Saulnier *et al.* (1997)이 제안한 S-model을 이용하여 토심관련 주제도를 작성하였다(Fig. 3e). S-model은 사면의 고도와 경사각을 고려한 지형적 특성의 관계로부터 토심을 예측하는 모델로서 사면의 경사가 클수록 침식 등으로 인해 토심이 얇게 형성된다는 가정을 기반으로 한 모델이다. 그밖에 흙의 물리적 특성을 나타내는 비중, 포화도 그리고 간극률은 실내

시험을 통하여 획득하였다. 또한 연구지역의 흙을 대상으로 체분석을 이용, 통일분류법(Unified Soil Classification System)으로 흙을 분류하고 이에 따라 각 흙의 분류에 해당하는 A, λ 의 값으로 데이터베이스를 구축하였다(Montrasio and Valentino, 2008). 그리고 연구지역의 강수량 산정을 위해 기상청의 지역별상세관측자료(AWS)를 이용하였다. 연구지역인 진부면에는 강우관측소가 없는 관계로 가장 근접하게 위치하고 있는 영월기상관측소의 자료로부터 강우강도, 즉 일간 강우량을 획득하였다. 특히 본 연구에서는 집중강우가 발생한 시기뿐만 아니라 집중강우 이전의 지하수위 변화도 고려하기 위해 집중호우가 발생한 2006년 7월 14일 ~ 16일의 강우강도와 집중호우가 발생하기 이전인 7월 1일부터 13일까지 2주간의 선행강우량도 분석에 포함하였다(Fig. 4).

또한 산사태 취약성 분석결과와 검증에 위해서 필요한 산사태 발생 위치를 획득하기 위하여 산사태 발생 이전인 2005년 4월에 촬영한 항공사진과 산사태 발생 이후인 2008년 5월에 촬영된 항공사진을 비교하여 산사태의 발생 위치를 획득하였으며 현장조사를 통해 이를 확인하였다. 이러한 과정을 통해 약 1,100여개소의

Fig. 4. Records of daily and accumulated rainfall.

Table 2. Input parameters in the study area

Geology	Effective cohesion [kPa]	Friction [degree]	Hydraulic conductivity [m/day]	Specific weight	Degree of saturation [%]	Porosity [%]	Soil classification
Imgye Granite	3.8	33	2.1	2.7	54.3	51.7	SC
Nokam Sandstone	10.4	36	2.2	2.7	42.8	54.1	GC
Jeongseon Limestone	4.4	26	0.4	2.6	51.7	61.8	SC

		True class	
		Positives	Negatives
Modeled class	Yes	True Positives	False Positives
	No	False Negatives	True Negatives
	Σ	P	N

Fig. 5. Confusion matrix(After Park *et al.*, 2013).

산사태 발생 위치를 확인하였으며 이를 산사태현황도 (landslide inventory map)로 작성하였다(Fig. 1).

5. 분석 및 결과

본 연구에서는 불포화 지반의 특성을 고려한 산사태 취약성 분석 결과와 실제 산사태 발생 위치 사이의 상관성을 분석하여 분석기법의 정확성을 분석하기 위하여 ROC(Receiver Operating Characteristics) 그래프 분석기법을 활용하였다. ROC 그래프는 실제 산사태 발생 위치와 제안된 모델의 분석 결과를 비교하여 모델의 적절성과 성능을 쉽게 판단할 수 있는 유용한 방법으로 알려져 있다(Fawcett, 2006). 본 연구에서는 ROC 그래프를 작성하기 위해서 먼저 confusion matrix를 계산하였다(Fig. 5). confusion matrix는 모델의 해석결과를 안정 또는 불안정을 나타내는 Modeled class와 실제 산사태가 발생했는지 여부에 따라 True class로 구분하여 4가지 조합으로 나타낼 수 있다. confusion matrix에서 TP(True Positive)는 취약성 분석결과 불안정한 것으로 예측된 지역에서 실제 산사태가 발생한 경우를, FP(False Positive)는 불안정한 것으로 예측된 지역에서 산사태가 발생하지 않은 경우를 의미한다. 이러한 분석 결과로부터 TPR(true positive rate)과 FPR(false positive rate)을 산정하며 TPR을 세로축, FPR을 가로축으로 구성하여 ROC그래프를 작성한다. 이때 ROC 그래프 상에서 계산된 ROC곡선이 (0,1)에 가깝게 위치할수록, 즉 좌측 상단에 가깝게 위치할수록 좋은 성능을 보인다고 판단할 수 있다(Fawcett, 2006; Godt *et al.*, 2008). 본 연구에서는 정량적인 검증을 위해 ROC 곡선 아래의 면적을 평가하는 AUC(Area Under the Curve)를 계산하여 활용하였다(Kim and Park, 2013; Park *et al.*, 2013).

5.1. 임의의 지하수위를 가정한 산사태 취약성 분석

본 연구에서는 기존의 예측 모델에 의한 해석 결과

Table 3. Result of deterministic analysis with different groundwater level

Groundwater level	30%	50%	80%
Predicted unstable area (Fs≤1)	0.2%	4.2%	21.2%
TPR	0.006	0.123	0.527
FPR	0.002	0.043	0.211
AUC	0.502	0.540	0.658

와 본 연구에서 활용된 해석기법의 결과를 비교하기 위하여, 기존의 연구에서와 같이 연구지역 전체를 동일하게 임의의 지하수위를 가정하여 연구지역의 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 지하수위가 사면 깊이의 30%, 50%, 80%에 위치하고 있는 3가지의 경우로 가정하여 산사태 취약성 분석을 수행하였다(Fig. 6). Table 3을 살펴보면 지하수위가 30%일 경우 불안정한 지역(안전율 1 이하)은 연구지역의 1% 미만으로 거의 위험지역이 존재하지 않는 것으로 분석되었다(Fig. 7A). 그리고 지하수위를 50%로 가정하여 분석을 수행한 경우 연구지역의 4.2%가 불안정한 지역으로 나타났으며 1,180개의 산사태 중 145개의 산사태가 예측기법에 의해 위험한 것으로 분석되었다. 이때 TPR은 0.123, FPR은 0.043 그리고 AUC 값은 54.0%로 계산되었다(Fig. 7B). 마지막으로 지하수위를 80%로 고려하였을 때 연구지역의 21.2%가 불안정한 지역으로 나타났으며 1,180개의 산사태 중 622개가 예측기법에 의해 위험한 것으로 분석되었다. 이때 TPR은 0.527, FPR은 0.211이며 AUC 값은 65.8%로 계산되었으며 지하수위가 상승함에 따라 모델의 예측 정확도가 향상되었다(Fig. 7C).

5.2. 강우강도와 불포화 지반의 특성을 고려한 산사태 취약성 분석

앞 서 제안한 바와 같이 강우강도와 흙의 수리적 특성을 이용하여 산정한 포화깊이비와 불포화 영역의 강

Fig. 6. Factor of safety predicted for (a) $m=0.3$, (b) $m=0.5$, (c) $m=0.8$.

도특성을 고려하여 분석을 수행한 산사태 취약성 결과는 Fig. 8과 같다. 이 분석에서는 집중호우기간인 2006년 7월 14일 ~ 16일의 강우강도뿐만 아니라 선행강우를 고려하여 지하수위를 결정하기 위하여 7월 1일 ~ 13일의 강우량을 포함하여 분석을 수행하였다.

Fig. 7. ROC analysis for A: $m=0.3$, B: $m=0.5$, C: $m=0.8$, D: July 14, E: July 15, F: July 16.

선행강우는 사면안정에 큰 영향을 미치는 요인으로 강우강도와 함께 고려되어야 할 강우특성 인자로 알려져 있다(Shin, 2007; Yune *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012). 또한 앞서 설명한 바와 같이 이 지역의 산사태 발생 당시의 강우 특성을 고려하여 0시부터 자정까지의 24시간의 간격으로 3일간의 산사태 취약성 분석을 수행하였으며 해당 날짜의 자정을 기준으로 분석결과를 나타내었다. 분석에 활용된 일간 강우량은 각각 63 mm(7월 14일), 55 mm(7월 15일), 168 mm(7월 16일)이었다. 또한 계산에서 사용된 유효 점착력의 경우 전단실험을 통해 획득하는데 불포화 영역의 길보기 점착력과 같이 계산될 경우 과도한 값이 계산될 수 있어 이전 연구들(Lancellotta, 2004; Nova, 2010; Zizioli *et al.*, 2013)의 경우를 참고하여 계산에 고려하지 않았다. 분석 결과를 살펴보면 집중호우가 시작된 첫째 날인 7월 14일의 경우 총 63 mm 강우량을 기록하였고 산사태 취약성 분석 결과 연구지역의 2.3%가 불안정한 것으로 나타났으며 1,180개의 실제 산사태 중 79개의 산사태가 불안정한 지역에서 발생한 것으로 분석되었다(Table 4). 이때 TPR과 FPR은 각각 0.067, 0.023이며 AUC 값은 52.2%로 분석되었다(Fig. 7D). 이를 제외한 7월 15일의 경우 55 mm의 일간강우량을 보였으며 전날의 강우량에 영향을 받아 연구지역 중 6.0%에 해당되는 지역이 불안정한 것으로 해석되어 1,180개의 산사태 중 176개의 산사태가 불안정한 지역에서 발생한 것으로 분석되었다. 이때 TPR과 FPR은 각각 0.149, 0.060이며 AUC 값은 54.5%로 약간 상승한 것으로 분석되었다(Fig. 7E). 마지막으로 셋째날인 7월

Fig. 8. Factor of safety predicted for severe rain storm period (a): July 14, (b): July 15, (c): July 16.

16일의 경우 실제 연구지역에서 산사태가 발생한 날짜로 총 168 mm 강우가 집중되었다. 분석 결과 연구지역은 불안정한 지역이 급격히 늘어나 연구지역의 28.1%가 불안정해지는 결과를 보였다. 그리고 1,180개의 실제 산사태 중 745개의 산사태가 불안정한 지역에

Table 4. Result of deterministic analysis adapted hydrological model for severe rain storm period

Period	July 14	July 15	July 16
Predicted unstable area ($F_s \leq 1$)	2.3%	6.0%	28.1%
TPR	0.067	0.149	0.631
FPR	0.023	0.060	0.280
AUC	0.522	0.545	0.676

서 발생한 것으로 분석되었으며 TPR과 FPR은 각각 0.631, 0.280이고 AUC 값은 67.6%로 분석되었다 (Fig. 7F). 본 분석결과를 살펴보면 집중호우 기간의 셋째날인 7월 16일의 경우 위험 지역이 6%에서 28.2%로 급격히 증가하였는데 이는 당일에 집중된 많은 양의 강우로 사면이 급속도로 포화되고 이에 따라 사면의 안정성을 유지시켜주는 모관흡수력이 감소하여 안정성을 잃은 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안된 모델을 적용하여 분석한 결과 강우가 집중된 16일에 모델의 예측정확도가 67.6%로 상승하였으며 신문기사 등을 통해 이 지역의 산사태가 주로 7월 16일을 중심으로 발생한 점을 비추어 보아 본 연구결과가 산사태 발생시기와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 7월 16일의 AUC값은 67.6%로 임의로 가정한 지하수위를 적용한 모델의 경우에 비해 크게 차이를 보이고 있지는 않으나 연구지역 전체에 동일한 임의의 지하수위를 가정하는 분석기법의 경우 연구지역의 지형적 특성과 수리적 특성을 고려할 수 없어 모든 연구지역의 지하수위가 동일한 높이로 계산되어 흙의 투수성이나 지형의 고저에 따라 다르게 형성되는 지하수위를 고려하지 못하며 실제 강우량에 따라 변화되는 연구지역의 상태를 고려할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 반면 본 연구에서 활용된 해석기법은 흙의 불포화 영역에 대한 전단강도를 고려하여 실제 흙의 거동 및 특성을 반영할 수 있으며 흙의 수리적 특성과 강우강도에 따른 시간당 지하수위 변화를 계산하여 산사태의 안정성을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 강우침투에 의한 흙의 공학적 성질 변화로 발생하는 산사태의 발생메커니즘을 반영하기 위하여 물리적 사면 모델을 이용하여 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 그러나 포화대 상부에 형성되는 불포화층의 강도특성이 사면의 안정성에 크게 영향을 미

치며 포화층의 공학적 특성과 많은 차이를 보임에도 불구하고 기존의 연구는 불포화지반의 공학적 특성을 고려하지 않고 산사태 안정성 해석을 수행해 왔다. 또한 분석에 활용되는 사면 내 지하수위의 경우 실제 강우량을 고려하지 않고 지하수위를 임의로 가정하여 분석을 수행하는 경우가 많았다. 이러한 한계점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 사면의 안정성에 크게 영향을 미치는 불포화영역의 강도특성을 파악하여 사면 모델에 반영하였으며 흙의 수리적 특성과 강우강도 등을 고려하여 사면의 포화깊이비를 산정한 후 이 값을 활용하여 사면의 안정성을 산정하였다. 특히 본 연구에서는 분석된 결과의 정확성을 파악하기 위하여 산사태 발생 전후의 항공사진과 현장조사를 토대로 산사태 위치를 확인하여 현황도를 구축하였고 ROC 분석을 활용하여 산사태 발생위치와 예측결과의 비교를 통해 활용된 모델의 정확도를 산정하였다. 그 결과 ROC 분석을 통해 계산된 AUC 값은 본 연구에서 적용된 분석 기법의 경우 7월 14 ~ 16일 각각 52.2%, 54.5%, 67.6%의 값을 보였다. 이 값은 임의의 지하수위를 활용하여 분석을 수행한 경우 즉, 지하수위를 30%, 50%, 80%로 가정하여 수행한 결과인 50.2%, 54.0%, 65.8%와 크게 차이를 보이지는 않는 결과를 보였다. 그러나 본 연구에서 활용한 분석기법은 흙의 불포화 특성과 함께 지반의 수리적 특성과 강우량을 고려하여 시간에 따른 지하수위의 변동을 산정할 수 있으며 이러한 결과를 바탕으로 일간 강우량 변화에 따른 위험 지역의 변화를 예측하고 이로부터 시간에 따른 취약성을 파악할 수 있다는 장점을 가진다.

사 사

이 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 지원으로 수행된 연구입니다(NRF-2013R1A1A2A10058724).

참고문헌

- Chae, B.G., Lee, S.H., Song, Y.S., Cho, Y.C. and Seo, Y.S. (2007) Characterization on the relationships among rainfall intensity, slope angle and pore water pressure by a flume test : in case of gneissic weathered soil. *Journal of Engineering Geology*, v.17, p.57-64.
- Fawcett, T. (2006) An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, v.27, p.861-874.
- Frattini, P., Crosta, G.B., Fusi, N. and Negro, P.D. (2004) Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modeling approach for hazard assessment. *Engineering Geology*, v.73, p.277-295.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, 517p.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D. and Barbour, S.L. (1996) The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Can. Geotechn. J.*, v.33, p.440-448.
- Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H. and Harp, E.L. (2008) Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, v.102, p.214-226.
- Ho, J.Y., Lee, K.T., Chang, T.C., Wang, Z.Y. and Liao, Y.H. (2012) Influences of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction. *Engineering Geology*, v.124, p.38-46.
- Kim, G.H., Yune, C.Y., Lee, H.G. and Hwang, J.S. (2011) Debris flow analysis of landslide area in Inje using GIS. *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, v.29, p.47-53.
- Kim, J.H., Park, S.W., Jeong, S.S. and Yoo, J.H. (2002) A study of stability analysis on unsaturated weathered slopes based on rainfall-induced wetting, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, v.18, p.123-136.
- Kim, J.Y. and Park, H.J. (2013) A comparative study of fuzzy relationship and ANN for landslide susceptibility in Pohang area. *Econ. Environ. Geol.*, v.46, p.301-312.
- Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G., Song, Y.S. and Cho, Y.C. (2005) Engineering geological analysis of landslide on natural slopes induced by rainfall. *Engineering Geology*, v.15, p.105-121.
- Lancellotta, R. (2004) *Geotecnica*. Zanichelli, 481p.
- Lee, J.S., Song, Y.K. and Kim, Y.T. (2012) Slope stability characteristic of unsaturated weathered granite soil in Inje considering antecedent rainfall. *Korean Society of Hazard Mitigation*, v.12, p.85-92.
- Lee, J.H. and Park, H.J. (2012) Assessment of landslide susceptibility using a coupled infinite slope model and hydrologic model in Jinbu area, Gangwon-Do. *Econ. Environ. Geol.*, v.45, p.697-707.
- Li, T.F. and Chi, Y.Y. (2011) Rainfall induced landslide risk at Lushan, Taiwan. *Engineering Geology*, v.123, p.113-121.
- Liao, Z., Hong, Y., Kirschbaum, D., Adler, R., Gourley, J.J. and Wooten, R. (2011) Evaluation of TRIGRS's predictive skill for Hurricane-triggered landslides: A case study in Macon country, North Carolina. *Nat. Hazard*, v.43, p.245-256.
- Liu, C. and Wu, C. (2008) Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach. *Environmental Geology*, v.55, p.907-915.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2004) *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley, 584p.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v.30, p.1153-1171.
- Montrasio, L. and Valentino, R. (2008) A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.8, p.1149-1159.

- Montrasio, L., Valentino, R. and Losi, G.L. (2011) Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.11, p.1927-1947.
- National Disaster Management Institute (2000) Fundamental Issues for Landslide Hazards Avoidance or Mitigation Plans, National Disaster Management Institute, 276p.
- Nova, R. (2010) *Soil Mechanics*. Wiley-ISTE, London, 399p.
- Park, H.J., Lee, J.H and Woo, I. (2013) Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach. *Engineering Geology*, v.161, p.1-15.
- Saulnier, G. M., Beven, K. and Obled, C. (1997) Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *J. Hydrol.*, v.202, p.158-172.
- Saxton, K.E. and Lenz, A.T. (1967) Antecedent retention indexes predict soil moisture. *Journal of Hydraulic Division American Society of Civil Engineers*, v.93, p.223-241.
- Salciarini, D., Godt, J.W., Savage, W.Z., Conversini, P., Baum, R.L. and Michael, J.A. (2006) Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslide in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides*, v.3, p.181-194.
- Schmidt, J., Turek, G., Clark, M.P., Uddstrom, M. and Dymond, J.R. (2008) Probabilistic forecasting of shallow, rainfall-triggered landslides using real-time numerical weather predictions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.8, p.349-357.
- Shin, H.K. (2007) A Study on the Analysis of the Groundwater Level and Characteristic of the Slope-Related Disasters according the Rainfall Intensity and the Infiltration. The Univ. of Seoul, master's thesis, 78p.
- Silva, D. (2000) *Analisi sperimentale del comportamento di terreni stratificati in pendio*. Univ. of Parma, Degree Thesis.
- 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. *The Journal of Korean Geotechnical Society*, v.26, p.27-38.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, T., Xie, M. and Mori, J. (2003) Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology*, v.68, p.373-386.
- Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R. and Montrasio, L. (2013) Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, v.13, p.559-573.

2014년 2월 10일 원고접수, 2014년 3월 2일 1차수정,
2014년 3월 3일 게재승인