무한사면모델과 수리학적 모델의 결합을 통한 강원도 진부지역의 산사태 취약성 분석

이정현 · 박혁진*

세종대학교 지구정보공학과

Assessment of Landslide Susceptibility using a Coupled Infinite Slope Model and Hydrologic Model in Jinbu Area, Gangwon-Do

Jung Hyun Lee and Hyuck Jin Park*

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

The quantitative landslide susceptibility assessment methods can be divided into statistical approaches and geomechanical approaches based on the consideration of the triggering factors and landslide models. The geomechanical approach is considered as one of the most effective approaches since this approach proposes physical slope model and considers geomorphological and geomechanical properties of slope materials. Therefore, the geomechanical approaches have been used widely in landslide susceptibility analysis using the infinite slope model as physical slope model. However, the previous studies assumed constant groundwater level for broad study area without the consideration of rainfall intensity and hydraulic properties of soil materials. Therefore, in this study, landslide susceptibility assessment was implemented using the coupled infinite slope model with hydrologic model. For the analysis, geomechanical and hydraulic properties of slope materials and rainfall intensity were measured from the soil samples which were obtained from field investigation. For the practical application, the proposed approach was applied to Jinbu area, Gangwon-Do which was experienced large amount of landslides in July 2006. In order to compare to the proposed approach, the previous approach was used to analyze the landslide susceptibility using randomly selected groundwater level. Comparison of the results shows that the accuracy of the proposed method was improved with the consideration of the hydrologic model.

Key words : GIS, infinite slope model, rainfall intensity, geomechanical properties, groundwater level

정량적인 산사태 취약성 분석은 산사태를 유발하는 인자 및 모델에 대한 접근방법에 따라 통계적 기법과 지질역학적 기법으로 구분된다. 이 중 지질역학적 기법은 산사태 모델을 가정하고 사면의 기하학적 특성과 사면 구성물질의 공학적 특성을 고려하여 산사태의 취약성을 판단하는 기법으로 산사태의 발생메커니즘과 과정을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산사태의 취약성 분석에 가장 효과적인 기법 중의 하나로 보고되고 있다. 지질역학적 해석기법의 경우 최근 들어 무한사면모델이 주로 사면 모델로 사용되고 있으며 GIS의 활용을 통해 광역적인 지역에 대한 분석이 가능해짐에 따라 무한사면모델을 이용한 광역적인 지역에서의 산사태 취약성 분석이 가능해졌다. 기존의 무한사면모델을 활용한 연구의 경우 연구지역의 지하수위를 지반이나 강우의 특성에 대한 고려 없이 임의로 가정하여 해석함으로써 강우량과 연구지역의 지반특성에 따라 지하수위가 유동적으로 포화되는 것을 전혀 고려할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 산사태의 유발에 가장 큰 영향을 미치는 강우강도와 지반의 수리특성을 반영할 수 있는 수리학적 모델을 무한사면모델과 결합하여 연구지역의 현장 조건을 반영한 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 또한 기존의 해석방법과 본 연구에서 제안된 해석기법을 비교분석하기 위하여 2006년 7월 대규모의 산사태가 발생한 강원도 진부지역을 대상으로 분석을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 제안된 해석기법이 기존의 해석기법에 비해 높은 예측 정확도를 보이는 것으로 분석되었다.

주요어 : GIS, 무한사면모델, 강우강도, 지반특성, 지하수위

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

1. 서 론

산사태 취약성 분석은 산사태 발생과 관련이 있는 인자들의 공간적 분포에 대한 분석을 통해 산사태 발생 가능성이 있는 지역을 예측하는 방법으로 산사태를 유발하는 인자 및 모델에 대한 접근방법에 따라 크게 통계적 기법(statistical method)과 지질역학적(또는 지질공학적) 기법(geomechanical method)으로 구분된다(Aleotti and Chowdhury, 1999; Chacón *et al.*, 2006). 통계적 기법은 산사태의 발생위치와 산사태 유발 인자들에 대한 통계적 상관성 분석을 통하여 취약성을 판단하는 방법으로 이변량 분석(bivariate analysis)이나 다변량 분석(multi-variate analysis) 등이 주로 활용된다. 통계적 기법은 광역적인 지역의 다양한 산사태 유발 인자 자료를 효과적으로 분석할 수 있지만 자료에 대한 단순 통계적 처리에 의존하고 사면 물질의 공학적 특성에 대한 고려가 부족하다는 단점을 가지고 있다. 반면 지질역학적 기법은 기존 산사태의 특성을 파악하여 산사태 모델을 가정하고 사면의 기하학적 특성과 사면 물질의 특성을 고려하여 사면의 안정성을 판단하는 기법이다. 따라서 지질역학적 기법은 물리적 모델과 현장 및 실내시험 자료를 이용하여 사면의 안정성을 분석할 수 있으며 이러한 해석기법은 산사태의 발생메커니즘과 과정을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산사태의 취약성이나 위험도 분석에 가장 효과적인 기법 중의 하나로 보고되고 있다(Fell *et al.*, 2008). 지질역학적 해석기법의 경우 대부분 무한사면모형을 물리적 사면 모델로 사용하고 있는데 이는 산사태 발생 파괴면의 기하학적 형태가 유사하다는 점과 함께 다른 모델에 비해 해석이 용이하기 때문이다(Kamai, 1991; Terlien, 1996; Pack *et al.*, 1998, 2001; Fratini *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2006; Rosso *et al.*, 2006; Godt *et al.*, 2008; D'Amato Avanzi *et al.*, 2009; Apip *et al.*, 2010; Jang and Yang, 2010; Griffiths *et al.*, 2011; Santoso *et al.*, 2011; Song and Hong, 2011; Ho *et al.*, 2012). 특히 최근 들어 GIS(Geographic Information System, 지리정보시스템)의 활용을 통해 광역적인 지역에 대한 취약성 분석이 가능해짐에 따라 단일사면의 해석에 주로 사용되던 무한사면모형을 이용한 광역적인 지역에서의 산사태 취약성 분석이 가능해졌다(Luzi nad Pergalani, 1996; Park *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2003; Xie *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005; Salciarini *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2007; Godt *et al.*, 2008; Liu

and Wu, 2008; Ho *et al.*, 2012).

한편 기존의 무한사면모형을 활용한 산사태 취약성 분석 연구들은 해석과정에서 사면 내의 지하수위를 지반이나 강우의 특성에 대한 고려 없이 임의의 값을 결정하여 분석에 사용하여 왔다. 그러나 이 경우 강우 발생 시 연구지역의 지반특성에 따라 지하수위가 유동적으로 포화되는 것을 고려할 수 없으며 대상 지역의 강우량과 관련된 정보가 전혀 고려될 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하기 위하여 사면 물질의 수리적 특성과 강우강도 등의 자료와 수리학적 모델을 활용하여 사면 내 지하수위를 산정하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 연구지역에 대한 산사태 취약성 분석을 수행하였다.

2. 강우강도 및 지반특성을 고려한 무한사면 안정해석

본 연구에서 산사태 취약성 분석을 위해 활용된 무한사면모형은 지반의 깊이가 비교적 얇고 산사태의 길이가 매우 길다고 가정하는 모델로서 국내외에서 발생하는 낮은 깊이의 산사태 분석에 주로 적용된다(National Disaster Management Institute, 2000). 무한사면모형에서는 사면의 안정성을 판단하기 위하여 안전율(factor of safety, FS)을 산정하는 데 Fig. 1에서와 같이 무한사면의 지하수위가 파괴면(failure surface)으로부터 z_w 되는 곳에 있으며 사면과 평행한 방향으로 침투가 일어난다고 가정할 때, 사면의 안전율은 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다(Kwon *et al.*, 2009).

$$FS = \frac{c + \{\gamma(1 - z_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)z_w\} D \cos^2 \alpha \tan \phi}{\gamma D \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

Fig. 1. Infinite slope model.

이 때 α 는 사면의 경사, c 는 흙의 점착력, ϕ 는 마찰각, γ 는 흙의 전체단위중량, γ_{sat} 는 흙의 포화단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, D 는 사면의 깊이이다.

일반적으로 무한사면모델을 이용하여 안정해석을 수행하는 기존의 연구에서는 집중강우에 따른 강우 조건을 감안하기 위하여 지하수위를 임의로 가정하여 분석을 수행하였다(Park *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2003; Xie *et al.*, 2004; Jang and Yang, 2010; Song and Hong, 2011). 그러나 지하수위를 임의로 가정하여 해석하는 경우 강우강도와 사면 구성물질의 수리특성을 반영하지 못한다는 문제점을 가지고 있으며, 전체 연구지역의 지하수위가 동일한 높이까지 상승하는 것으로 가정하여 해석을 수행하기 때문에 사면의 지형학적 형태에 따라 사면이 유동적으로 포화되는 것을 고려하지 못하는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 해석기법의 한계를 극복하기 위하여 무한사면모델과 수리학적 모델을 결합하여 사면의 안정성을 분석하는 해석방법을 활용하였다.

본 연구에서 활용한 수리학적 모델은 사면 구성물질의 투수율과 강우강도를 고려하여 지하수위를 산정하는 Montgomery and Dietrich(1994)의 모델을 활용하였다. 이 모델에서는 사면에 침투하는 강우와 지반에 포화되는 지하수위가 평형을 이루는 정상상태(steady state)라고 가정하여 지형학적으로 수렴하고 지반이 포화되는 부분에서 산사태가 발생한다고 고려한다. 이를 위해 Beven and Kirkby(1979)가 제안한 상부사면의 유역지수(contributing area, $A[m^2]$)와 등고선 횡방향 길이(unit contour length, $b[m]$)를 이용하여 강우에

의한 집수면적(specific catchment area, $a[m^2/m] = A/b$, Fig. 2)을 계산하였으며, 식 (2)를 이용하여 지하수위를 획득하였다(Pack *et al.*, 1998).

$$m = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T \sin \alpha}, 1\right) \quad (2)$$

이 때 R 은 강우강도, T 는 흙의 투수계수이며 지하수위 비율(m)은 사면 깊이(D)에 대한 지하수위의 높이(groundwater level, z_w), 즉 $m = \frac{z_w}{D}$ 이다.

이와 같이 획득된 지하수위 비율은 최댓값을 1로 정하는데, 산의 계곡부와 같이 강우가 집수되어 넘치는 부분의 경우 강우에 의한 지하수의 포화정도가 지반의 지하수 유량을 초과하기 때문에 1 이상의 값이 획득될 수 있으므로 제한을 두는 것이다(Pack *et al.*, 1998).

3. 연구지역

본 연구에서는 강원도 평창군 진부면 일대의 경도 $126^\circ 29' 9.86'' \sim 126^\circ 36' 16.61''$, 위도 $37^\circ 39' 5.77'' \sim 37^\circ 35' 11.81''$ 에 해당하는 지역에 대하여 앞서 제안된 해석기법을 이용한 산사태 취약성 분석을 수행하였다(Fig. 3). 이 지역은 2006년 7월 14일 ~ 20일 까지 집중호우의 영향을 받았으며 약 1,000여개소의 산사태가 발생하였다.

본 연구에서는 연구지역의 강우 흐름에 따른 유역(basin) 형태를 고려하여 진부면 일대의 가로 10.46 km, 세로 7.29 km에 해당하는 약 48.52 km² 넓이의 지역을 중심으로 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 연구지역의 지질은 Fig. 4에서와 같이 남서부에 분포된 선캄브리아기의 흑운모 편마암(Biotite Gneiss)을 기반으로, 그 위에 조선계 정선석회암층(Jeongseon Limestone)과 평안계 녹암층(Nokam Sandstone)이 부정합으로 놓여있으며, 연구지역에 가장 넓게 분포하고 있는 임계화강암(Imgye Granite)의 광범위한 관입을 받고 있다(Oh, 2010).

본 연구에서는 집중강우에 따른 강우 조건을 감안하여 연구지역의 지하수위를 분석하기 위하여 산사태가 발생한 시기인 2006년 7월 강원도 평창군 진부면 일대의 강우량을 고려하였다. 이를 위하여 기상청에서 제공하는 지상관측자료 중 연구지역과 가장 가까운 관측소인 영월 기상대를 기준으로 획득된 강우자료 중 집중호우 기간의 평균 강우량 2.0 mm/hr, 일평균 최고 강우량 7.0 mm/hr를 선정하여 분석을 수행하였다.

Fig. 2. Definition of specific catchment area (Pack *et al.*, 1998).

Fig. 3. Shaded relief map of study area with landslide location.

Fig. 4. Geological map of study area.

4. 공간 데이터베이스 구축

본 연구에서는 광역적인 지역에 대한 취약성분석을 수행하기 위하여 연구지역의 지형학적 특성과 공학적 특성을 GIS 기반의 공간 데이터베이스로 구축하였다. 본 연구에서 제안된 분석기법 적용에 필요한 입력 자료(input data)를 얻기 위하여 먼저 연구 지역의 1:25,000 축척 수치지형도, 1:25,000 축척의 수치토양도, 1:50,000 축척의 수치지질도 자료를 획득하였다. 또한 지반의 공학적 특성을 분석하기 위해 현장으로부터

획득된 샘플에 대한 실내 시험과 현장 조사를 수행하여 공학적 특성에 대한 공간자료 데이터베이스를 구축하였다. 이러한 과정을 통해 획득된 수치지도와 데이터베이스는 Arc/Info 프로그램을 사용하여 연결(join)하고 입력 자료에 대한 10 m × 10 m 격자 구조의 래스터(raster)를 구축하여 분석에 필요한 주제도(thematic map)를 작성하였다. 또한 본 연구에서 제안하는 분석기법의 정확성 검증에 위해 항공사진 분석과 현장조사를 바탕으로 총 1,099개소의 산사태 발생위치를 수집하였으며 이를 inventory map으로 구축하였다.

Fig. 5. Thematic maps for (a) slope angle, (b) cohesion, (c) friction, (d) permeability, (e) unit weight and (f) soil thickness.

먼저 연구지역의 1:25,000 축척의 수치지형도에서 높이 속성을 포함한 등고선 벡터 레이어(vector layer)를 추출하여 TIN(Triangulated Irregular Network)을 구축하고 이를 활용하여 사면의 경사(slope) 주제도를 작성하였다(Fig. 5a). 사면의 경사를 얻기 위해서는 주제도의 격자 크기를 10 m×10 m로 설정하고 불규칙한 삼각형으로 분할된 TIN 구조에서 각 격자에 해당하는 삼각형 기울기를 획득하여 경사를 추출하였다. 또한 지반의 공학적 특성을 파악하기 위해 현장에서 실내 시험에 필요한 시료를 채취하였다. 먼저 현장에서 획득된 시료에 대한 실내시험을 통해 단위중량(unit weight,

Fig. 5b)을 획득하였으며 현장에서 획득한 총 27개의 시료를 대상으로 직접전단시험(direct shear test)을 수행하여 점착력(cohesion, Fig. 5c)과 마찰각(friction, Fig. 5d)을 획득하였다. 또한 9개의 시료를 대상으로 실내투수시험을 실시하여 투수계수(permeability, Fig. 5e)를 획득하였다(Table 1). 획득한 값은 데이터베이스로 구축하고 수치지형도와 연결하여 속성 정보를 추가하고, 각 속성을 기반으로 레스터를 구축하여 주제도를 작성하였다. 또한 파괴면의 깊이(soil thickness, Fig. 5f)는 농촌진흥청에서 발행하는 1:25,000 축척의 수치토양도에서 제공하는 토양의 종류를 파악하여 각 토양층

Table 1. Geomechanical engineering properties by classification of rock

	Cohesion [kN/m ²]	Friction [degree]	Permeability [m/hr]	Unit Weight [kN/m ³]
Imgye Granite	3.8	35.2	0.0887	17.9
JeongSeon Limestone	4.4	28.4	0.0185	14.0
Nokam Sandstone	10.4	40.2	0.0901	14.5

에 대한 유효토심으로부터 획득하였으며, 이를 바탕으로 주제도를 작성하였다.

이러한 과정을 통해 구축한 연구지역의 주제도는 Arc/Info 프로그램에서 ASCII 형식으로 변환하여 MATLAB을 기반으로 설계한 무한사면모델 모듈(module)에서 계산을 수행하였다. 특히 강우강도와 지반의 수리특성을 고려하여 연구지역의 안전율을 계산하기 위하여 먼저 강우강도와 사면의 경사 및 깊이, 지반의 투수계수를 수리학적 모델에 적용하여 각 강우강도에 따른 연구지역의 지하수위를 계산하였다. 이러한 계산 결과와 지형학적 특성 그리고 지반의 공학적 특성을 변수로 설정하고, 이를 무한사면모델 모듈에 적용하여 강우강도에 따른 사면 안전율 계산 결과를 획득하였다. 이 결과를 ASCII 파일로 구축하였으며 Arc/Info 프로그램에서 래스터 파일로 변환하여 취약성도를 작성하였다. 또한 좀 더 자세한 분석을 위하여 각기 다른 두 강우강도를 사용하여 사면 안전율을 계산하였으며 두 경우에 대한 취약성도를 작성하였다.

5. 분석 및 결과

본 연구에서는 연구지역 전체의 지하수위를 동일하게 가정하는 기존의 방법과 본 연구에서 제안된 해석기법을 활용하여 안전율을 계산하고 두 해석 결과를 비교 및 분석하였다. 이를 위하여 각 분석기법을 적용하여 획득한 결과로부터 위험한 것으로 해석된 지역(즉, 사면의 안전율이 1.0 미만인 지역)과 실제 산사태가 발생한 위치를 비교하여 연구지역의 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 또한 산사태 취약성 분석을 수행한 결과의 예측 정확성을 고려하기 위해서 Huang and Kao(1996)가 제안한 MSR(modified success rate)을 활용하여 분석기법의 신뢰성을 고려하였다. MSR은 위험한 것으로 해석된 지역이 실제 산사태가 발생한 위치를 얼마나 예측하는지 고려하고, 전체 연구지역에서 안전한 것으로 해석된 지역(즉, 안전율이 1.0보다 큰 지역)이 차지하는 면적을 계산하여 다음 식 (3)과 같이 정의한다.

$$MSR(\%) = \left(0.5 \times \frac{\text{successfully predicted landslide}}{\text{actual landslide}} + 0.5 \times \frac{\text{successfully predicted stable}}{\text{actual stable}} \right) (3)$$

5.1. 임의로 지하수위를 가정한 산사태 취약성 분석

무한사면모델을 적용하여 산사태 취약성 분석을 수행하는 기존의 연구에서는 집중강우에 따른 강우의 영향을 감안하기 위하여 지하수위를 사면 높이의 0~100%까지의 값 중 특정한 값을 연구지역 전체에 동일하게 가정하여 분석을 수행하였다. Zhou *et al.*(2003)의 경우 지하수위를 사면 높이의 30%와 80%로 적용하였으며, Van Westen and Terlien(1996)의 경우 0%, 50%, 100%로 전체 연구지역에 동일하게 적용하였다. 이외에도 Jelinek and Wagner(2007)의 연구와 같이 산사태 발생 전후에 측정된 지하수위를 고려하여 간접적으로 지하수위를 유추하여 적용하기도 하는데 이는 강우가 산사태의 발생에 결정적인 유발인자로 인정됨에도 불구하고 기존 해석기법의 경우 해석 시 강우에 대한 직접적인 고려가 현실적으로 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 기존의 연구 결과를 참고하여 지하수위를 사면 높이의 30%, 50%, 80%로 전체 연구지역에 동일하게 적용하여 분석을 수행하였다(Table 2). 지하수위를 사면 높이의 30%로 고려하였을 경우 전체 연구지역의 grid 485,235개 중 안전율이 0.5 미만인 grid는 21,681개, 0.5보다 크고 1.0 미만인 grid는 32,334개로 안전율이 1.0보다 작아 위험한 것으로 해석된 grid는 총 54,015개로 전체 면적의 11.1%에 해당하는 것으로 분석되었다(Fig. 6a). 한편 연구 지역에서 발생한 산사태 1,099개 중 182개인 16.6%만 안전율이 1.0보다 작은 grid에서 발생한 것으로, 즉 위험한 것으로 분석된 grid에서 발생한 것으로 분석되었으며, 이 결과는 52.8%의 MSR 값을 보여 상대적으로 산사태 예측 정확성이 낮은 것으로 분석되었다. 지하수위가 사면 높이의 50%로 상승한 경우 안전율이 1.0보다 작은 grid는 76,084개로 전체 면적의 15.7%에 해당하는 지역이 위험한 것으로 해석되었다(Fig. 6b). 이 경우 연

Fig. 6. Factor of safety evaluated using groundwater levels of (a) 30%, (b) 50% and (c) 80%.

Table 2. The evaluation of factor of safety using constant groundwater levels

Groundwater level		30%		50%		80%	
		Number of cell	Percentage	Number of cell	Percentage	Number of cell	Percentage
Predicted unstable area	$0 \leq F_s < 0.5$	21,681	4.5	21,725	4.5	22,390	4.6
	$0.5 \leq F_s < 1.0$	32,334	6.6	54,359	11.2	101,653	21.0
Predicted stable area	$1.0 \leq F_s$	431,220	88.9	409,151	84.3	361,192	74.4
Successfully predicted landslide (%)		16.6		29.1		48.6	
MSR(modified success rate) (%)		52.8		56.8		61.6	

구지역에서 기존에 발생한 산사태 중 29.1%가 위험한 것으로 해석되었고, 56.8%의 MSR값을 보였다. 마지막으로 지하수위가 사면 높이의 80%까지 상승한 것으로 분석한 경우 위험한 것으로 해석된 지역은 124,043개로 전체 면적의 25.6%를 보이며 (Fig. 6c) 이 지역에서 발생한 산사태 중 48.6%가 불안정한 것으로 해석되었으며, 61.6%의 MSR 값을 보여 지하수위가 상승함에 따라 예측 정확도가 증가하는 것으로 분석되었다.

5.2. 강우강도와 지반의 수리특성을 고려한 산사태 취약성 분석

강우강도와 지반의 수리특성을 고려한 무한사면 안정해석을 수행하기 위해서 먼저 2006년 7월 당시의 강우강도를 수리학적 모델에 적용하여 연구지역의 지하수위를 계산하였다. 이러한 결과를 바탕으로 연구지역 사면 물질의 공학적 특성을 이용하여 사면의 안정성을 분석하였으며, 연구지역에서 위험한 것으로 예측된 지역(즉, 안전율 1.0 이하인 지역)에서 발생한 산사태의 분포를 파악하였다(Table 3). 그 결과 강우강도가 7월 집중호우 기간의 평균 강우량인 2.0 mm/hr의 경우 안전율이 0.5 미만인 grid는 400개, 0.5보다 크고 1.0 미만인 grid는 101,216개로 위험한 것으로 해석된 grid는 총 101,616개로 전체 면적의 20.9%에 해당한다 (Fig. 7a). 분석 결과 이 지역에서 발생한 산사태 중

44.4%만 안전율이 1.0보다 작은 것으로 해석되었으며, 61.8%의 MSR값을 보였다. 또한 일평균 최고 강우량인 7.0 mm/hr으로 분석을 수행한 경우 위험한 것으로 해석된 지역의 경우 전체 면적의 28.6%로 안전율이 0.5 미만인 지역은 2,215개, 0.5와 1.0 사이인 지역은 136,674개로 분석되었다(Fig. 7b). 이 지역에서 발생한 산사태의 60.2%가 안전율이 1.0보다 작은 grid에서 발생한 것으로 해석되었으며, 이러한 결과를 이용하여 계산된 MSR의 경우 65.9%로 가장 높은 산사태 예측 정확성을 보였다.

그러나 앞 선 분석의 결과를 살펴보면 수리학적 모델을 사용하여 지하수위를 계산하고 이를 안전율의 계산에 반영한 분석 결과가 지하수위를 임의로 가정한 분석 결과보다 위험한 것으로 해석된 지역(즉, 안전율이 1.0보다 작은 지역)의 비율이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 또한 제안된 해석기법에 의한 평균 지하수위가 기존의 해석기법에 의한 평균 지하수위보다 높은 것으로 분석되었다. 그러나 위험한 것으로 해석된 지역 중 안전율이 0.5보다 작은 것으로 해석된 지역의 경우 기존의 방법은 전체 면적의 4% 이상을 차지하는 반면 본 연구에서 제안된 해석기법의 경우 전체 면적의 0.1% ~ 0.4%의 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 기존의 방법에서 과도하게 높은 지하수위가 고려되고 있음을 의미하며 또한 제안된 해석기법의

Table 3. The evaluation of factor of safety using different rainfall intensities

Groundwater level		2.0mm/hr		7.0mm/hr	
		Number of cell	Percentage	Number of cell	Percentage
Predicted unstable area	$0 \leq F_s < 0.5$	400	0.1	215	0.4
	$0.5 \leq F_s < 1.0$	101,216	20.9	136,674	28.2
Predicted stable area	$1.0 \leq F_s$	383,619	79.0	346,346	71.4
Successfully predicted landslide (%)		44.4		60.2	
MSR(modified success rate) (%)		61.8		65.9

Fig. 7. Factor of safety evaluated using rainfall intensities of (a) 2.0 mm/hr and (b) 7.0 mm/hr.

경우 전체 연구지역의 평균 지하수위는 높지만 강우강도와 지반의 수리특성을 고려하여 지하수위가 유동적으로 포화되는 것을 고려하므로 적정한 지하수위가 적용된 것으로 판단된다. 특히 두 해석기법의 산사태 예측 정확성을 비교한 결과 본 연구에서 제안된 해석기법의 MSR이 보다 높게 산정된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 본 연구에서 제안된 해석기법이 더 높은 예측 정확성을 보이고 있음을 의미한다.

6. 결 론

무한사면모델을 활용하여 산사태의 취약성을 분석하

는 연구는 산사태의 발생메커니즘을 반영하여 해석에 활용할 수 있다는 점과 사면 구성물질의 공학적 특성을 반영할 수 있다는 장점으로 인해 최근 들어 활발하게 진행되고 있다. 그러나 지하수위를 임의의 값으로 가정하여 분석하는 기존의 해석방법은 강우특성이나 지반의 특성에 대해 고려하지 못하는 문제점을 가지고 있으며 특히 광역적인 지역에 대해 동일한 지하수위를 사용함으로써 사면의 기하학적 특성이나 사면 구성물질의 수리 특성에 따라 지하수위가 유동적으로 변화할 수 있는 환경을 전혀 고려하지 못하고 동일한 지하수위를 일률적으로 적용해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 수리특성과 강우강도

를 반영할 수 있는 수리학적 모델과의 결합을 통해 무한사면에 대한 안정해석을 수행하여 연구지역에 대한 산사태의 취약성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 연구지역에서 산사태가 발생한 시점의 강우강도를 획득하였으며 현장에서 시료를 채취하여 실내 시험을 통하여 얻은 지반의 공학적 특성을 취약성분석에 활용하였다. 또한 항공사진분석과 현장조사를 통해 과거 산사태가 발생한 위치를 파악하고 산사태 취약성 분석의 정확도 파악에 활용하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 2006년 7월 대규모의 산사태가 발생한 강원도 진부지역을 연구지역으로 선정하여 기존의 해석방법과 본 연구에서 제안된 해석기법을 적용하여 분석을 수행하였으며 그 결과를 비교해 보았다. 그 결과 취약성 분석의 예측 정확도를 나타내는 지수인 MSR 값이 기존 해석 방법의 경우 지하수위 30%, 50%, 80%의 경우 각각 52.8%, 56.8%, 61.6%로 계산되었으며 본 연구에서 제안된 해석기법의 경우 강우 강도를 각각 2.0 mm/hr와 7.0 mm/hr로 계산하였을 경우 61.8%와 65.9%의 값을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안된 해석기법의 예측결과가 기존의 해석기법에 비해 높은 예측 정확도를 보이는 것으로 분석되었다.

사 사

본 연구는 공간정보 전문인력 양성사업의 지원과 2010년도 한국연구재단의 지원(No. 2010-0021314)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- Aleotti, P. and Chowdhury, R. (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v.58, p.21-44.
- Apip, Takara, K., Yamashiki, Y., Sassa, K., Ibrahim, A.B. and Fukuoka, H. (2010) A distributed hydrological-geotechnical model using satellite-derived rainfall estimates for shallow landslide prediction system at a catchment scale. *Landslides*, v.7, p.237-258.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v.24, p.43-69.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T. and El Hamdouni, R. (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v.65, p.341-411.
- Chen, C.Y., Chen, T.C., Yu, F.C. and Lin, S.C. (2005) Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide. *Environ Geol*, v.48, p.466-479.
- D'Amato Avanzi, G., Falaschi, F., Giannecchini, R. and Puccinelli, A. (2009) Soil slip susceptibility assessment using mechanical-hydrological approach and GIS techniques: an application in the Apuan Alps. *Natural Hazards*, v.50, p.591-603.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, v.102, p.85-98.
- Fratini, 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.
- 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.
- Griffiths, D.V., Huang, J. and Fenton, G.A. (2011) Probabilistic infinite slope analysis. *Computers and Geotechnics*, v.38, p.577-584.
- Ho, J.Y., Lee, K.T., Chang, T.C., Wang, Z.Y. and Liao, Y.H. (2012) Influence of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction. *Engineering Geology*, v.124, p.38-46.
- Huang, J.C. and Kao, S.J. (2006) Optimal estimator for assessing landslide model performance. *Hydrology and Earth System Science*, v.10, p.957-965.
- Huang, J.C., Kao, S.J., Hsu, M.L. and Lin, J.C. (2006) Stochastic procedure to extract and to integrate landslide susceptibility maps: An example of mountainous watershed in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.6, p.803-815.
- Huang, J.C., Kao, S.J., Hsu, M.L. and Liu, Y.A. (2007) Influence of specific contributing area algorithms on slope failure prediction in landslide modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.7, p.781-792.
- Jang, H.D. and Yang, H.S. (2010) An analysis of stability on rock slope by changing water level. *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, v.20, p.7-14.
- Jelinek, R. and Wagner, P. (2007) Landslide hazard zonation by deterministic analysis (Velká Causa landslide area, Slovakia). *Landslides*, v.4, p.339-350.
- Kamai, T. (1991) Slope stability assessment by using GIS. Science and Technology Agency of Japan, in Japanese.
- Kwon, H.J., Park, J.B., Song, Y.W. and Lee, Y.S. (2009) Soil mechanics. 2nd ed. Goomibook. 557p.
- Liu, C. and Wu, C. (2008) Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach. *Environmental Geology*, v.55, p.907-915.
- Luzi, I. and Pergalani, F. (1996) Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, v.15, p.83-94.
- 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.
- National Disaster Management Institute (2000) Fundamental issues for landslide hazards avoidance or mitigation plans.

- Oh, H.J. (2010) Landslide susceptibility analysis and validation using Weight-of-Evidence model. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.46, p.157-170.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N. (1998) The SINMAP approach to terrain stability mapping. *Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada, p.1157-1165.
- Park, H.J., Lee, S. and Kim, J.W. (2003) Analysis and verification of slope disaster hazard using infinite slope model and GIS. *Econ. Environ. Geol.*, v.36, p.313-320.
- Rosso, R., Rulli, M.C. and Vannucchi, G. (2006) A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, v.42, W06410, doi:10.1029/2005WR004369.
- Santoso, A.M., Phoon, K.K. and Quek, S.T. (2011) Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides. *Computers and Structures*, v.89, p.893-900.
- 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 landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. *Landslides*, v.3, p.181-194.
- Song, Y.S. and Hong, W.P. (2011) Analysis of slope stability with consideration of the wetting front and groundwater level during rainfall. *The Journal of Engineering Geology*, v.21, p.25-34.
- Terlien, M.T.J. (1996) Modeling spatial and temporal variations in rainfall triggered landslide. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Science*, Publication No.32.
- Van Westen, C.J. and Terlien, M.T.J. (1996) An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes*, v.21, p.853-868.
- Xie, M., Esaki, T. and Zhou, G. (2004) GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. *Natural Hazards*, v.33, p.265-282.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., 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.

2012년 10월 16일 원고접수, 2012년 12월 14일 게재승인