극한강우 조건을 고려한 산사태 위험도 분포 양상 분석

Analysis of Landslide Risk Distribution Pattern under Extreme Precipitation

김만일* · 객재환** · 전병희*** · 김남균****

Kim, Man-Il*, Kwak, Jawhwan**, Jun, ByongHee***, and Kim, Namgyun****

Abstract

This study analyzed the landslide risk in Ulsan, Korea using infinite slope stability analysis considering rainfall infiltration in the soil layer. The parameters used in the analysis were obtained by geographic information system (GIS) and field survey using the following parameter values: a cohesion of 30.84 kPa , unit weight of 1.46 t/m^3 , specific gravity of 2.65, effective soil depth of 0.41 m , and internal friction of 27.15°. The rainfall intensity was set to last for 60 min at a 10-year frequency of 57.8 mm/h , 50-year frequency of 78.5 mm/h , 100-year frequency of 87.3 mm/h , and 500-year frequency of 107.5 mm/h . The minimum safety factor for the landslide risk was set at 1.3, according to the slope design criterion of construction slope announced by Korea's Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. The safety factors with the values of 0-1.3 have been classified into four grades based on the saturation depth ratio varying with the rainfall intensity. The higher the rainfall intensity, the higher the percentage of the first grade (very dangerous) area. For verification, the landslide risk area proposed in this study was compared with the 'Landslide Risk Map' provided by Korea Forest Service. It is expected that high accuracy could be achieved in future by increasing the field survey data.

Key words : Infinite Slope Stability Analysis, Rainfall Infiltration, Landslide, Wetting Front

요 지

본 연구에서는 강우에 의한 토층의 포화깊이비를 고려한 무한사면 안정해석 식을 이용하여 울산지역에 적용하였다. 무한사면 안정해석 식에서 사용되는 인자의 울산지역의 값은 GIS를 이용한 공간정보의 활용하고 현장조사를 통하여 획득하였다. 울산지역의 사용된 평균 인자 값은 점착력 30.84 kPa , 단위중량 1.46 t/m^3 , 비중 2.65, 유효 토심 0.41 m , 내부마찰각 27.15°로 나타났다. 확률 강우량도에 기반하여 적용된 강우강도는 10년 빈도 57.8 mm/h , 50년 빈도 78.5 mm/h , 100년 빈도 87.3 mm/h , 500년 빈도 107.5 mm/h 로 60분 동안 지속되는 것으로 설정하여, 강우강도별 산사태 발생 위험 지역을 도출하였다. 산사태 발생 위험 지역은 국토교통부에서 공고하는 '건설공사비탈면설계기준'을 참고하여 우기시 최소 안전율인 1.3을 기준으로 1.3보다 낮은 지역을 추출하였다. 0-1.3의 값을 가지는 안전율은 강우빈도에 따라 변화하는 침투 깊이의 평균값을 기준으로 4등급으로 분류하였다. 강우강도가 높을수록 위험한 등급인 1등급의 면적이 차지하는 비율이 높은 것으로 나타났고, 강우강도가 낮을수록 위험등급이 상대적으로 낮은 4등급의 면적이 높은 것으로 나타났다. 제시되는 토층 내 강우침투의 영향에 의한 울산지역 산사태 발생 위험지역은 산림청에서 제공하는 '산사태위험지도'와 비교하였다. 본 연구에서 제시하는 10년빈도의 위험 결과 매우높음(1등급)과 높음(2등급)의 위치와 산사태 위험지도에서 제시되는 위험등급이 매우높음(1등급)과 높음(2등급)에 해당하는 위치와의 비율이 각각 40%와 35%로 비슷한 경향을 나타내었다. 향후, 위험등급을 결정하는 안전율을 조절하고, 현장조사로 얻어진 데이터의 조사 개소수를 높이면 높은 정확도를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 무한사면 안정해석, 강우침투, 산사태, 포화깊이

*정회원, 산림조합중앙회 산림종합기술본부 책임연구원(E-mail: mikim@nfcf.or.kr)

Member, Principal Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

**산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원

Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

***강원대학교 방재전문대학원 교수

Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

****교신저자, 정회원, 산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원(Tel: +82-42-341-1056, Fax: +82-42-637-8046, E-mail: knkblue2@nfcf.or.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

1. 서 론

강우분포와 지질특성, 지형특성은 산사태의 발생을 예측하는데 반드시 필요한 요소이다. 각각의 요소에 따른 산사태의 특성이나 토석류의 특성 및 취약성, 위험성 평가에 관한 연구들이 진행되었으며(Wieczorek and Guzzetti, 2000; Lee et al., 2002; Ko et al., 2014; Passalacqua et al., 2015) 요소들 사이의 상관성을 분석하여 산사태 발생지역을 예측하는 연구들도 진행되고 있다. Song and Hong (2007)은 지질의 조건과 강우 조건에 따른 산사태의 유발 특성을 분석하였고, Kim and Chae (2009)는 강우와 지질 및 산사태 기하형상을 분석하였으며, Salciarini et al. (2012)는 지형의 특성을 고려한 산사태 발생의 강우 조건을 공간적으로 분석하였다. 산사태의 유발특성 인자들 사이의 상관관계를 통하여 공간적인 해석방법 이외에도 산사태 발생 위험 여부를 판단하는 방법으로는 대표적으로 사면안정해석 방법이 있으며, Fellenius 방법, Bishop 방법, Spencer 방법, 무한사면해석방법 등이 있다. 사면안정해석 방법을 이용한 산사태 발생 여부에 관한 분석은 많은 연구자들에 의해 수행되었으며(Fredlund and Krahn, 1977; Chowdhury and Flentje, 2003), 최근에는 2D 해석방법이 보완된 3차원 해석방법이 제시되고 있다. Zhou and Cheng (2013)은 3차원 분석방법을 제시하였고, Vassallo et al. (2015)는 강우에 의한 간극수압의 영향을 고려한 3차원 사면안정해석 방법을 제시하였다. 다양한 사면안정해석 방법 중에서도 산사태 발생의 여부에 관한 연구는 보편적으로 한계평형이론에 근거하여 무한사면 안정해석식을 이용한 산사태 발생지역을 예측하는 연구가 수행되고 있다(Song and Hong, 2007; Cha and Kim, 2011). 또한 우기시의 사면의 안정성을 고려하기 위하여 무한사면 안정해석 식을 이용한 지반의 강우 침투에 따른 연구도 수행되고 있다(Santoso et al., 2011; Ali et al., 2014). 또한 강우 침투에 의한 지반의 습윤 함량에 기반하여 경보시스템을 제안하는 방법 등의 연구도 진행되고 있다(Chae and Kim, 2012). 하지만, 강우의 토층 침투영향 보다 대부분 지하수위가 상승하여 토층이 포화된 상태를 가정한 산사태 위험도 분석 연구가 수행되어 (Lee et al., 2002; Yu, 2003), 강우의 조건에 따른 토양 침투 해석 모델의 국내 적용 결과와 이에 대한 검증이 부족하다.

일반적으로는 강우에 의하여 불포화토 내 지하수위가 상승하여 침윤선의 높이가 상승함에 따라 토층 내 간극수압이 증가하여 산사태가 발생하지만, 단시간 내 집중호우에 의해 산사태가 발생하는 형태는 지하수위보다 지표로부터 강한 침투에 의한 영향이 크다. 특히 우리나라는 토층의 두께가 대부분 2 m 이내로 얇기 때문에 강우에 의한 산사태의 발생 파괴면은 강우침투로 인한 침윤선과 일치하는 경우가 많다. 이러한 이유로 토층이 얇은 조건에서는 불포화 토층 내 강우침투의 영향에 따른 침윤선의 변화가 중요하다.

따라서 본 연구에서는 극한 강우조건에 토양 침투 영향을

고려한 무한사면 안정해석 식(Chae et al., 2015)을 이용하여 산사태 발생 위치를 선정하고 안전율의 등급에 따른 위험성 조건을 설정하여 산사태 위험지도를 도출하였다. 대상지역은 울산지역으로써 무한사면 안정해석 식에 사용되는 인자의 값들은 현장조사와 공공데이터로 제공되는 GIS 속성정보를 활용하였다.

2. 연구방법

울산지역의 산사태발생 위험지역을 판단하기 위하여 무한사면 안정해석 식에서 사용되는 인자는 지질, 지형, 강우 요소를 모두 포함하고 있다. 지형요소는 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도를 이용하여 경사도를 추출하고, 산림청에서 제공하는 산림입지토양도의 토심을 사용하였다. 토양물성정보는 실제 현장조사를 통하여 토양의 비중, 단위중량, 점착력, 내부마찰각을 도출하였다. 강우빈도는 국토교통부에서 제공하는 한국확률강우량정보를 이용하여 10년, 50년, 100년, 500년의 빈도별 강우강도를 적용하였다. 각 사용되는 물성값은 무한사면 안정해석 식에 반영하여 1 km × 1 km의 격자로 구성된 울산지역의 안전율을 계산하였다. 국토교통부에서 공고하는 ‘건설공사비탈면설계기준’을 참고하여 우기시 최소 안전율인 1.3을 기준으로 하여, 격자별로 도출된 안전율 값이 1.3 이상인 지역은 안전하다고 판단하고, 반대인 값을 4개의 위험등급으로 구분하였다. 제작된 산사태 발생 위험지도는 산림청에서 제시하는 ‘산사태위험지도’와 비교하여 검증을 하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Research Flow Chart

3. 연구지역

강우의 토양 침투 해석 모델의 국내적용 대상지는 울산광역시로 선정하였다(Fig. 2). 울산광역시의 면적은 1,061 km²

으로써, 시가지를 제외한 산림의 면적은 약 640 km²에 달한다. 산림청에서 제공하는 산사태발생 위험등급 기준으로 산림면적의 9.3%가 산사태발생 매우위험(1등급), 산림면적의 25.6%가 위험(2등급)으로 분류된다. 이는 전국 17개의 광역시·도 중 6번째로 산사태발생 위험등급이 높은 것으로 나타났다. 2001년부터 2018년까지 과거 산사태 발생 면적은 0.49 km²으로 낮은 면적을 기록했으나, 2016년 태풍 차바에 의한 산사태 피해 2017년 집중호우에 의한 지반침하, 2018년 태풍 솔릭에 의한 토사유출피해 등 매년 산사태로 인한 피해가 발생하였다.

Fig. 2. Research Area

4. 물성정보구축

무한사면 안정해석을 위해 필요한 인자로서, 토사의 점착력, 내부마찰각, 사면경사, 유효 토심이 필요하다. 유효 토심과 경사도는 기존의 지도를 활용하여 값을 추출하였고, 그 외의 인자들은 100개소의 현장조사를 통해 보간법을 이용한 공간주제도를 작성하였다.

유효 토심은 산림청에서 제공하는 산림입지토양도의 유효 토심 값을 사용하였으며, 천(0~30 cm), 중(30~60 cm), 심(60~90 cm)의 값으로 구분된다. 각각의 면적 비율은 천(0~30 cm) 31%, 중(30~60 cm) 51%, 심(60~90 cm) 17%의 값으로 나타났으며 평균 유효 토심은 약 41 cm로 나타났다(Fig. 3(a)). 경사도는 국토지리정보원에서 제공하는 1:25,000 수치지형도를 이용하여 DEM을 생성하고 구축하였다(Fig. 3(b)). 최대경사는 77.9°, 최소경사는 0°, 평균경사는 10.6°로 나타났다. 산지지역을 고려할 때 비교적 최소경사와 평균경사가 낮은 값을 가지는 이유는 산지가 아닌 시가지지역을 포함하고 있기 때문이다. 즉, GIS를 이용한 공간주제도 작성시 울산지역 전부를 포함한 값을 가지고 있다.

Figs. 3(c)-(f)는 각각 비중, 단위중량, 점착력, 내부마찰각을 나타낸다. 현장조사를 통해 사면경사 15°이상, 심도 40 cm이상의 비교적 시료채취가 용이한 자연산지 토층에서 시료를 채취하였다. 시료채취 시, 표토를 제거한 후, 원통형

샘플러(직경 100 mm, 높이 50 mm)를 이용하여 교란, 불교란 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 한국산업표준(KS)의 시험기준에 준하여 각각의 인자 값을 추출하였다. 채취 및 분석된 토양샘플의 물성값은 점데이터로써, 이산된 점들로부터 울산지역의 전체의 연속적인 면데이터로 변환하기 위한 방법으로 역거리가중법(Inverse Distance Weighting, IDW)을 활용하였다. 역거리가중법은 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중값을 주어 보간하는 방법으로 반대로 실측값으로부터 멀어질수록 가중되는 값의 영향력은 줄어든다. 이러한 방법은 지리적 공간에서의 보간법을 위해 사용된다(Yu et al., 2015). 역거리 가중법의 최적의 지수를 선정하여 가중치의 값은 0.5, 참조점은 18개로 적용하였다.

비중의 최대값은 2.75, 최소값은 2.54, 평균값은 2.65로 나타났다. 단위중량의 최대값은 1.72 t/m³, 최소값은 1.19 t/m³, 평균값은 1.46 t/m³으로 나타났다. 점착력의 최대값은 48.02 kPa, 최소값은 13.33 kPa, 평균값은 30.84 kPa로 나타났다. 내부마찰각의 최대값은 32.18°, 최소값은 22.12°, 평균값은 27.15°로 나타났다(Table 1).

5. 침윤선 변화를 고려한 무한사면 안정해석

Fig. 4와 같이 경사각이 θ 인 무한사면이 지표면과 평행한 평면 활동면을 따라 활동을 일으키는 경우 무한사면안정해석 방법이 편리하다(Skempton and Delory, 1957). 침투수압은 사면에 평행하게 작용한다고 가정하고, 흙의 성질 또한 사면전체에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정한다. 그리고, 임의의 분할면 양 끝의 수직면에 작용하는 절편력의 크기가 같고 반대방향으로 작용하여 응력상태가 어느 분할면에서나 같다고 가정하므로 침투수가 지표면까지 높아질 때, 안전율의 크기가 가장 높게 나타나는 것으로 계산된다. 본 연구에서는 Chae et al. (2015)에 의해 제안되는 Eq. (1)을 적용하였다. 제안되는 식은 사면 토층의 침윤선 변화를 고려한 토층의 포화깊이비 개념을 적용함으로써 강우조건에따라 안전율의 변화를 계산할 수 있다. 다시 말해, 강우조건에 따른 토층사면 내의 침윤선의 깊이(D_{wf})가 중요 변수로써, 안전율의 변화에 큰 영향을 주며, 그림과 같이 침윤선 깊이의 변화는 강우강도에 따라 달라진다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta(1 - H(t)r)\tan\phi}{\sin\theta} \quad (1)$$

$$H(t) = \frac{D_{wf}}{D} \quad (2)$$

여기서 C : 토층의 무게에 대한 점착력 비(무차원), θ : 사면경사각(°), ϕ : 흙의 내부마찰각, $H(t)$: 시간에 따른 포화 깊이 비, D_{wf} : 침윤선 깊이, D : 토층(유효 토심)을 의미한다.

Fig. 3. Property Maps

Table 1. Soil Test Results

	Effective soil depth (cm)	Slope (°)	Specific gravity	Unit weight (t/m^3)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)
Maximum value	90	77.9	2.75	1.72	48.02	32.18
Minimum value	0	0	2.54	1.19	13.33	22.12
Average value	41	10.6	2.65	1.46	30.84	27.15

Fig. 4. Schematic of Saturation Depth Ratio

제시되는 식은 기존의 강우에 따른 지하수위의 상승에 의한 포화상태를 고려하는 것이 아닌 표토층에서 침투되는 포화상태를 고려하고 있다. 초기상태의 침윤선의 값은 표토층의 값을 기준으로 0을 의미하며 초기의 평균 토심 값을 기반암까지의 깊이인 41 cm를 갖게 된다. 초기의 토심값은 불포화토층의 깊이를 의미하게 되어 침윤선의 깊이에 따른 비율로 안전율이 고려되기 때문에 시간에 따른 포화 깊이 비 $H(t)$ 의 값은 0에서 1사이의 값을 가진다. 여기서 1의 값은 완전포화

상태로써 침윤선이 표토층에서 기반암에 도달했을 때를 의미한다. 침윤선의 침투속도는 투수계수에 의하여 결정된다. 울산광역시시의 평균 점착력은 30.84 kPa, 내부마찰각은 27.15° 각각의 평균값을 가짐에 따라 흙의 종류는 SM, SC로 구분이 되어 투수성이 작기 때문에 2.0E-03의 값으로 가정하였다.

사용되는 인자의 값은 울산지역을 1 km × 1 km의 격자로 구분하여 현장조사한 상기의 물성값들이 적용되었고, 10년 빈도 57.8 mm/h, 50년 빈도 78.5 mm/h, 100년 빈도 87.3 mm/h, 500년 빈도 107.5 mm/h의 빈도별 강우 빈도에 따라 안전율의 변화를 계산하였다.

6. 결과 및 토의

Fig 5는 강우빈도별 울산지역의 산사태 발생 위험 면적과 등급을 나타낸다. 사면 안전율이 1.3 이하인 산사태 발생 위험 면적의 평균값은 410 km²로 울산지역 산지사면의 640 km²중 64%로 산정되었다. 강우강도가 10년 빈도일 경우 402 km²으로 가장 낮게 도출되었고, 강우강도가 500년

Fig. 5. Distribution of the FS Evaluated Using the Rainfall Return Period

빈도일 경우 415 km²로 가장 높게 도출되었으나 차이가 약 13 km²에 불과해, 강우빈도에 따른 산사태 발생 위험 범위의 면적은 거의 차이가 없다고 볼 수 있다. 따라서, 산사태 발생 위험 범위는 강우빈도보다는 점착력이나 내부마찰각 등의 토질의 물성값에 따라서 크게 변화하는 것을 유추할 수 있다.

또한 강우빈도별 1.3 이하의 안전율을 가지는 격자에서 4가지 등급으로 분류하여 산사태 위험도 평가를 수행하였다. 등간격으로 구분하여, 1등급은 매우 높음($FS < 0.3$)으로 안전율이 값이 낮아 매우 위험한 지역을 의미하고, 2등급은 높음($0.3 \leq FS < 0.6$)으로 매우 위험한 지역에 비하여 안전율의 등급은 높으나 허용안전율보다 여전히 낮아 위험한 지역을 의미한다. 3등급은 낮음($0.6 \leq FS < 0.9$)으로 2등급과 같은 형태로써 위험한 지역을 의미하지만 허용안전율에 가까운 값으로써 2등급보다 상대적으로 위험성이 약한 지역을 의미한다. 4등급은 매우 낮음($0.9 \leq FS < 1.3$)으로 앞선 등급에 비하여 안전율이 높으며 1보다 큰 값들도 가지고 있기 때문에 상대적으로 위험도가 낮을 것을 의미한다.

등급이 낮을수록 위험도는 높으며, 1등급에 비하여 상대적으로 위험도가 낮은 4등급일지라도 위험지역이 아니라는 것을 의미하지는 않는다. 10년 빈도의 강우강도 결과로 1등급의 면적은 157 km²으로써 전체면적의 39%를 차지했다. 강우강도가 높아질수록 1등급의 면적 또한 높아져 500년 빈도의 강우강도의 결과로 1등급의 면적은 325 km²으로써 전체면적의 78%를 차지했다. 이와 반대로 10년 빈도의 강우강도의 결과로 4등급의 면적은 54 km²인데 비하여 500년 빈도의 강우강도의 결과로 4등급의 면적은 6 km²으로 상대적으로 면적이 작아진 것을 볼 수 있었다. 2등급, 3등급의 결과 역시 4등급과 마찬가지로 강우강도가 높아질수록 산사태 발생 위험 면적이 작아지는 것을 타나내었다. 이러한 이유는 1.3에 가까이 위치한 안전율의 값들이 강우강도가 높아질수록 0의 값에 가까워지는 것을 의미한다. 다시 말해, 강우강도가 높아질수록 안전율의 값이 낮아지는 형태를 나타내고 있으며, 무한사면 안정해석의 해석 결과가 적절하게 적용 되었다고 볼 수 있다(Table 2).

극한 강우조건을 고려하고 무한사면안정해석에 기초하여 제작된 산사태 발생 위험지도는 산림청에서 제시하는 ‘산사태위험지도’와 비교하여 검증을 하였다. 산림청에서

제시하는 산사태위험지도는 울산광역시의 산지지역을 전부 분석하여 약 640 km²의 범위에 대하여 산사태 발생 위험등급을 도출하였다. 산사태 발생 매우위험을 나타내는 1등급의 면적 비율이 9.3%, 위험을 나타내는 등급의 면적비율이 25.6%로 산지지역의 약 35%가 위험으로 판정하고 있다. 이는 10년빈도 강우강도의 제시되는 산사태 위험지도의 면적(40%)과 비슷한 것으로 나타났다. 하지만, 양 지도에서 위험하다고 나타내는 위치가 정확하게 일치하지 않으나 경향성은 일치하는 것으로 확인하였다(Fig. 6). 그림 6은 울산광역시 남구 지역의 일부를 나타내고 있으며, 본 연구에서 제시하는 산사태 위험지도는 산림청에서 제시하는 산사태위험지도와 비교하여 시가지 중심지역인 남구, 북구, 동구, 중구지역이 울주군에 비하여 비슷한 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 지반의 물성값을 조사하기 위하여 100개소의 시료를 채취한 지역이 울산 전역을 대표하고 있지만, 시가지 지역은 울주군에 비하여 상대적으로 산지의 면적이 적어 시료채취간의 거리가 짧기 때문에 정확도가 높은 것으로 판단되었다.

Fig. 6. Comparison of Landslide Hazard Map by KFS and Landslide Risk Map by Suggested Research

Table 2. Classification of Risk Area with the Class for Each Rainfall Return Period

	Rainfall return period	1 Class	2 Class	3 Class	4 Class	Mountain are of Ulsan, Korea
Landslide risk area (km ²) (Percentage of landslide risk area per mountain area (%))	10year	157(24.5)	99(15.5)	92(14.4)	54(8.4)	640 km ²
	50year	261(40.8)	82(12.8)	49(7.7)	20(3.1)	
	100year	283(44.2)	76(11.9)	40(6.3)	14(2.2)	
	500year	325(50.8)	60(9.4)	24(3.8)	6(0.9)	

산림청에서 제공하는 산사태 위험지도는 GIS의 Raw데이터를 제공하지 않기 때문에 정량적으로 비교하기는 어려웠으나, 향후 물성값의 추가 현장조사를 통하여 제시되는 방법으로 산사태 위험지도의 현장적용 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단하였다.

7. 결 론

본 연구에서는 토층내 강우침투의 영향에 따른 무한사면 안정 해석식을 이용하여 안전율 기반산사태 위험도 예측을 울산지역에 적용하였다. 울산광역시 산지지역 면적에 대비하여 약 64%가 안전율이 1.3이하인 위험지역으로써 분석되었다. 강우강도가 높아질수록 위험면적이 넓어지는 경향을 보였으나, 그 면적의 변화의 크기는 약 13 km²로써, 매우 미미하였다. 이러한 이유는 사면안정 해석시, 토층내 강우의 영향보다 점착력과 내부마찰각의 영향이 큰 것으로 판단하였다. 또한, 안전율의 등급을 등간격으로 나누어 위험등급별로 산사태 발생 위험도를 평가하였으며, 강우강도가 높아질수록 위험면적이 높아지는 것을 확인하였다.

또한 제시되는 울산지역 산사태발생 위험성 평가 방법은 산림청의 산사태위험지도와 비교하였을 때, 10년빈도의 위험 결과 매우높음(1등급)과 높음(2등급)의 위치와 산사태 위험지도에서 제시되는 위험등급이 매우높음(1등급)과 높음(2등급)에 해당하는 위치와의 비율이 각각 40%와 35%로 비슷한 경향을 나타내었으나, 위험범위가 정확히 일치하지는 않았다. 하지만, 물성값의 추가 현장조사 및 안전율의 등급의 정량적인 구분 등의 연구 및 실제 산사태 발생 사례 조사를 통한 추가 검증을 통하여 제시되는 방법으로 산사태 위험지도의 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2018119C10-1920-AB01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ali, A., Huang, J., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., Griffiths, D.V., Cassidy, M.J., et al. (2014). Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes. *Engineering Geology*, Vol. 179, No. 4, pp. 102-116.
- Cha, K.S., and Kim, T.H. (2011). Evaluation of slope stability with topography and slope stability analysis method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 251-256.
- Chae, B.G., and Kim, M.I. (2012). Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 66, No. 7, pp. 1973-1986.
- Chae, B.G., Lee, J.H., Park, H.J., and Choi, J.H. (2015). A method for predicting the factor of safety of an infinite slope based on the depth ratio of the wetting front induced by rainfall infiltration. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 1835-1849.
- Chowdhury, R., and Flentje, P. (2003). Role of slope reliability analysis in landslide risk management. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 62, No. 1, pp. 41-46.
- Fredlund, D.G., and Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 429-439.
- Kim, W.Y., and Chae, B.G. (2009). Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 3, pp. 331-344.
- Ko, S.M., Lee, S.W., Yune, C.Y., and Kim, G.H. (2014). Topographic analysis of landslides in Umyeonsan. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 1, pp. 55-62.
- Lee, S.R., Choi, U.C., and Jang, B.S. (2002). Development and application of landslide analysis technique using geological structure. *KOREA Spatial Information Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 247-261.
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J.D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., et al. (2015). Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. *Earth-Science Reviews*, Vol. 148, pp. 174-193.
- Salciarini, D., Tamagnini, C., Conversini, P., and Rapinesi, S. (2012). Spatially distributed rainfall thresholds for the initiation of shallow landslides. *Natural Hazards*, Vol. 61, No. 1, pp. 229-245.
- Santoso, A.M., Phoon, K.K., and Quek, S.T. (2011). Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides. *Computers & Structures*, Vol. 89, No. 11-12, pp. 893-900.
- Skempton, A.W., and Delory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech.*, Vol. 2, pp. 378-381.

- Song, Y.S., and Hong, W.P. (2007). A case study on analysis of cause and characteristics of a landslide at the sedimentary rock area. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 2, pp. 101-113.
- Vassallo, R., Grimaldi, G.M., Maio, C.D. (2015). Pore water pressures induced by historical rain series in a clayey landslide: 3D modeling. *Landslides*, Vol. 12, No. 4, pp. 731-744.
- Wieczorek, G.F., and Guzzetti, F. (2000). A review rainfall thresholds for triggering landslides. *Mediterranean Storms, 1999 Proceedings Plinius Conference*, Maratea, GNDCI pub. n. 2012. Editoriale Bios, Cosenza, pp. 407-414.
- Yu, J.S., Waseem, M., Shin, J.Y., and Kim, T.W. (2015). Evaluation of extended inverse distance weighting method for constructing a flow duration curve at ungauged basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 329-337.
- Yu, N.D. (2003). *Characteristics of unsaturated weathered soils with varying clay contents*. Master's thesis, Yonsei University.
- Zhou, X.P., and Cheng, H. (2013). Analysis of stability of three-dimensional slopes using the rigorous limit equilibrium method. *Engineering Geology*, Vol. 160, pp. 21-33.

Received	■	April 12, 2019
Revised	■	April 19, 2019
Accepted	■	April 24, 2019