

불포화토 내 강우침투에 따른 포화깊이비를 고려한 사면안정해석

채병곤¹ · 박규보² · 박혁진² · 최정해^{1*} · 김만일³

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²세종대학교 공간정보공학과, ³한국수자원공사 수자원사업본부

Analysis of Slope Stability Considering the Saturation Depth Ratio by Rainfall Infiltration in Unsaturated Soil

Byung-Gon Chae¹, Kyu-Bo Park², Hyuck-Jin Park², Jung-Hae Choi^{1*}, and Man-Il Kim³

¹Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University

³Water Resources Business Division, Korea Water Resources Corporation

본 연구는 기존에 제안된 무한사면 안정해석식을 바탕으로 불포화토 내에 강우침투 시 지표로부터 시간에 따른 토층의 포화깊이비를 새로운 변수로 삽입하여 무한사면 안정해석 수정식을 제안하고자 하였다. 이를 위해 기존에 고려하지 못했던 시간에 따른 포화깊이비와 지표하 흐름 깊이의 개념을 새로이 도입하였으며, 유사동력학적 습윤지수 이론에서 도출되는 해석대상 지역의 유효상부기여면적, 지표하흐름 깊이, 포화깊이비를 계산하고, 이를 토대로 시간에 따른 포화깊이비를 반영한 무한사면 안정해석을 수행하도록 하였다. 이를 통해 실질적인 시간에 따른 강우의 변화양상과 사면 안전율 변화를 계산할 수 있게 되었다. 한편, 본 연구에서는 Park et al. (2011 a)가 실시한 불포화토 칼럼시험을 통한 강우침투 속도분석 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안한 식을 이용하여 토층의 포화깊이비를 고려한 사면안정해석을 실시하였다. 이 해석을 통해 편마암 풍화토의 토층 내 강우 침투속도를 고려하여 포화깊이비가 변화함에 따른 안전율의 변화를 파악할 수 있었다. 해석결과에 의하면, 연속강우의 경우 안전율이 1.3 이하로 감소하는 시간이 강우강도 20 mm/h 조건에서 2.86 ~ 5.38시간이고, 강우강도 50 mm/h 조건에서는 1.34 ~ 2.92시간으로 나타났다. 반복강우의 경우, 안전율이 1.3 이하가 되는 시간은 강우조건별로 3.27 ~ 5.61시간으로 나타났다. 따라서, 토층 내 강우침투속도 차이에 따른 포화깊이비 변화를 고려한 무한사면의 안전율 변화 파악이 가능하였다.

주요어 : 무한사면 안정해석식, 강우침투, 포화깊이비, 편마암 풍화토, 산사태 예측

This study proposes a modified equation to calculate the factor of safety for an infinite slope considering the saturation depth ratio as a new variable calculated from rainfall infiltration into unsaturated soil. For the proposed equation, this study introduces the concepts of the saturation depth ratio and subsurface flow depth. Analysis of the factor of safety for an infinite slope is conducted by the sequential calculation of the effective upslope contributing area, subsurface flow depth, and the saturation depth ratio based on quasi-dynamic wetness index theory. The calculation process makes it possible to understand changes in the factor of safety and the infiltration behavior of individual rainfall events. This study analyzes stability changes in an infinite slope, considering the saturation depth ratio of soil, based on the proposed equation and the results of soil column tests performed by Park et al. (2011 a). The analysis results show that changes in the factor of safety are dependent on the saturation depth ratio, which reflects the rainfall infiltration into unsaturated weathered gneiss soil. Under continuous rainfall with intensities of 20 and 50 mm/h, the time taken for the factor of safety to decrease to less than 1.3 was 2.86-5.38 hours and 1.34-2.92 hours, respectively; in the case of repeated rainfall events, the time taken was between 3.27 and 5.61 hours. The results demonstrate that it is possible to understand changes in the factor of safety for an infinite slope dependent on the saturation depth ratio.

Keywords : Equation of the factor of safety for an infinite slope, Rainfall infiltration, Saturation depth ratio, Weathered gneiss soil, Landslide prediction

*Corresponding author: jhchoi@kigam.re.kr

서 론

최근 우리나라에서는 하절기의 강우패턴이 과거와는 달리 상당히 많은 양의 강우가 짧은 시간동안 내리는 양상을 보이고 있다. 예를 들어 2008년 경북 봉화군 춘양면 서벽리에서 발생한 대규모 산사태의 경우, 7월 25일 오후 9시경부터 약 2시간 동안 198.5 mm의 집중적인 비가 내리고 이로 인해 서벽리 일대에서 약 200여개의 산사태가 발생하여 서벽리 마을의 70%가 산사태로 인한 피해를 입었으며, 4명이 사망하였다. 즉, 시간당 100 mm에 가까운 엄청난 양의 강우가 실제로 내린 것이다. 2009년의 경우 부산지역에서는 7월 7일과 16일의 2회에 걸쳐 각각 310 mm, 266.5 mm가 4시간~5시간 동안 집중적으로 내리는 현상이 발생하였으며, 특히 7월 16일 내린 강우로 부산시 연제구의 아파트 밀집지 배후 산지에서 길이 300여 m의 산사태가 발생하여 아파트 한 개동의 지하층과 1층, 그리고 지하주차장이 토사에 매몰되었다. 2011년 7월 28일 오전 8시부터 9시까지 우면산 일대에는 시간당 최고 94 mm, 1일 301.5 mm의 극한강우가 내려 대규모의 산사태가 발생하였으며, 이로 인해 인근 주민 16명이 사망하고 많은 이재민이 발생하였다.

이와 같이 강한 강우강도로 비가 내릴 경우는 낮은 강우강도의 경우에 비해 불포화토내 강우의 침투양상이 다르며, 이로 인해 사면의 안정성도 급격히 변화하게 된다. 일반적으로 강우는 불포화토에 서서히 침투하면서 비교적 수평적 침윤선(wetting front)을 형성하게 되며 (Olivares and Picarelli, 2003; Springman et al., 2003; Xue and Gavin, 2008), 이에 따라 토층이 서서히 포화되다가 일정 시간이 경과하면서 완전포화되거나 또는 강우가 종료됨에 따라 포화도가 낮아지게 된다. 그러나, 집중강우 조건에서는 많은 양의 강우가 한꺼번에 토층에 침투하므로 토층내 간극수압이 급격히 증가하게 되고, 강우의 토층내 흐름이 균일하지 않고 특정방향을 따라 더 우세하게 발생하는 우선흐름(preferential flow)이 나타나기도 한다. 특히, 집중강우시에는 지하수위의 증가가 발생하기 이전에 지표로부터의 강한 침투로 인해 흙이 포화되는데 이 경우 불포화토 내 포화깊이가 중요하다. 즉, 강우량과 시간에 따라 토층의 포화깊이가 달라지게 되고, 이는 급경사지의 안정성에 직접적 영향을 미치게 된다.

특히, 우리나라와 같이 자연사면에서 토층의 두께가 대부분 2 m 이내로 얇은 경우, 주로 강우에 의한 사면

파괴는 지표로부터 강우 침투에 따른 토층 내 함수비와 간극수압 증가로 인하여 발생하며, 이때 토층 내 강우침투로 인한 침윤선과 파괴면이 일치하는 경우가 많다. 그러나, 기존의 사면 안정성 분석은 전통적 개념에서 지하수위 상승에 따른 지반의 완전포화 상태에서의 사면 안정성만을 해석하기 때문에 국내 토층의 얇은 발달과 이를 통한 지표로부터의 강우침투에 따른 사면 안정성 변화와는 차이가 발생한다(Yu, 2003; Lee et al., 2005; Lee et al., 2007; Jung et al., 2009).

전술한 바와 같이 강우강도, 강우의 토층내 침투속도, 포화깊이, 그리고 사면의 안정성은 서로 밀접한 관련이 있다. 그러나, 일반적으로 사면안정성을 해석하는 방법들은 강우와 강우지속시간, 그리고 사면 안정성을 직접적으로 연계시키는데 한계를 가지고 있다. 특히, 무한사면으로 분류되는 자연사면을 대상으로 한 안정성해석 방법들은 강우가 매우 중요한 인자임을 인지하고 있지만, 실질적으로 안정성 해석의 인자로 반영하고 있지 못하고 있다. 최근과 같은 강우패턴의 갑작스런 변화조건에서는 시간에 따른 강우의 영향을 사면 안정성 해석에 반드시 반영하여야 하므로, 본 연구에서는 강우량과 강우지속시간에 따른 토층의 포화깊이비를 반영한 새로운 개념의 무한사면 안정해석 수정식을 제안하였다. 기존의 무한사면 안정해석식에서는 시간에 따른 강우의 영향을 직접적으로 반영할 수 없었으며, 일부 연구에서는 강우에 따른 습윤지수를 고려하는 시도를 하였다(Beven and Kirkby, 1979; Burt and Butcher, 1985; Pack et al., 1999). 그러나, 본 연구에서는 강우량과 강우지속시간에 따른 토층의 포화깊이비를 반영한 무한사면 안정해석 수정식을 제안함으로써 실질적인 강우의 시간에 따른 변화양상과 사면 불안정성을 연계할 수 있게 되었다. 특히, 우리나라와 같이 토층의 심도가 얇은 조건에서는 집중강우시 지표로부터 강우침투와 토층의 포화가 빠른 시간에 발생하게 되며, 이를 통해 강우강도 및 강우지속시간에 따라 급격한 사면 붕괴가 발생하는 조건에서는 불포화 토층내 시간별 강우의 영향을 중요하게 고려한 사면안정해석이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 제안된 무한사면 안정해석식을 이용하여 Park et al. (2011 a)가 산정한 편미암 풍화토 내 강우침투속도 결과를 바탕으로 토층의 포화깊이비를 고려한 사면안정해석을 실시하였다. 이 해석을 통해 토층 내 강우 침투속도를 고려하여 포화깊이비가 변화함에 따른 무한사면의 안전율 변화를 파악하였다.

**포화깊이비를 고려한 무한사면 안정해석
수정식 제안**

무한사면 안정해석 모델은 활동면의 형태를 사면의 표면에 평행한 직선으로 가정한 해석법으로 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비해 충분히 큰 사면의 안정성 평가에 사용되는 방법이다. 일반적으로 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정하고 지표면까지 침투수가 있을 때 안전율이 가장 낮게 나온다. 우리나라의 경우 자연사면에서의 산사태는 강우가 발생하였을 때 빈번하게 발생한다. 즉 산사태 발생에 지배적으로 영향을 미치는 요인은 사면의 표토층을 통한 강우의 침투가 주요한 요인으로 작용한다. 뿐만 아니라 지하수위의 변화는 사면 주변에서 물의 공급이 원활히 이루어져야만 한다. 강우에 따른 불포화 사면 내에서의 지하수위 상승은 토층의 투수계수와 침투속도 등과 밀접한 관계를 갖기 때문에 일반적으로 장기간의 시간이 소요된다. 따라서 산사태에 가장 크게 영향을 미치는 부분은 사면의 전단면을 기준으로 사면 토층의 하부로부터 지하수위 상승에 따른 사면 토층의 포화조건보다는 강우 발생시 사면 토층 내부로 강우의 침투수가 사면파괴의 원인으로 더 크게 작용한다고 볼 수 있다.

무한사면 안정해석식에서 안전율(FS)에 가장 크게 영향을 미치는 사면의 물성인자로는 사면 토층의 사면경사각, 토층의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)이다. 기존의 무한사면 안정해석식에서는 토층의 단위중량과 토층의 깊이가 상수로만 주어지기 때문에 실제 사면의 붕괴를 유발하는 주요 인자인 강우지속시간과 강우 침투깊이 등을 고려할 수 없다. 따라서, 강우조건과 시간에 따른 강우침투 영향을 반영하여 무한사면의 안전율을 산정하는 것은 기존의 무한사면 안정해석식으로는 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 사면의 토층을 대상으로 한 강우지속시간과 토층의 침윤선 변화를 고려한 토층의 포화깊이비 개념을 새롭게 도입함으로써 강우조건에 따른 사면의 안전율 변화를 시간에 따라 해석할 수 있다.

본 연구에서는 강우량과 강우지속시간에 따른 급경사지의 안정성 변화를 해석하기 위하여 유사동력학적 습윤지수 이론에서 도출되는 포화깊이비를 적용하여 새로운 형태의 무한사면 안정해석 수정식을 제안하였다. 유사동력학적 습윤지수를 이용해 포화깊이비를 산정하기 위해서는 우선적으로 대상 격자에 영향을 미치는 상부 기여면적의 분석이 선행되어야 하며, 이를 위해 대상 지역의 지반정수와 강우강도 및 배수시간을 고려해야 한

다. 일반적으로 유사동력학적 습윤지수 산출 과정 중 도출되는 분석인자는 상부기여면적, 유효상부기여면적, 지표하 흐름 깊이, 포화깊이비가 순차적으로 계산된다(Borga et al., 2002). 기존 무한사면 안정해석식을 수정하여 본 연구에서 제시한 무한사면 안정해석식은 크게 흙의 단위중량이 아닌 전체밀도에 대한 물의 밀도비와 토층의 깊이에 대한 강우 침투시 침윤선의 깊이 변화를 이용하였다. 특히 이를 통해 사면의 표층에서부터 실제 토층의 깊이에 대한 강우 침투수의 포화깊이비를 적용하여 기존의 무한사면 안정해석식에서 고려하지 못한 강우지속 시간에 따른 강우침투와 그에 의한 사면 안전율 변화를 산정하였다. 지표하 흐름깊이와 포화깊이비는 분석대상 격자의 토층 깊이와 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 주어진 조건의 범위 내 값이 분포할 경우 불포화 상태를 의미하며, 조건 범위에서 최대값을 가질 경우에는 포화 상태를 나타낸다. 최종적으로 유사동력학적 습윤지수 계산 과정으로 계산된 대상 격자의 포화깊이비는 무한사면 안정해석식에 대입하여 각각의 격자의 안전율을 계산하게 된다.

국내 산사태의 발생 특성은 얇은 천층파괴가 대부분이기 때문에 얇은 토층 내에 분포하는 식물과 흙의 점착력, 흙과 물의 밀도, 그리고 강우사상별 토층 내로 침투하는 침윤선 변화를 고려한 무한사면 안정모델이 필요하다. 침윤선의 개념은 초기 불포화 상태에서 강우 침투에 따라 토층의 함수비가 증가되어 포화상태로 바뀌는 상태를 의미한다. 이는 실질적으로 강우의 침투특성을 보여주는 것으로 무한사면에서 천층 파괴 내지 표층 파괴 등과 같은 산사태 발생원인을 파악하는데 중요한 부분이다. 또한 강우의 침투를 고려하지 않고 지하수위 상승의 영향에 주안점을 두고 전단면에 작용하는 수압(u)을 사용해 왔지만 본 연구에서는 지표면을 대상으로 강우 침투와 강우지속시간을 고려한 토층 내에서 침윤선의 깊이(D_w)를 중요 변수로 설정하였다. 따라서, 강우조건에 따른 토층사면 내에서의 침투양상인 침윤선 변화를 고려함으로써 강우량 및 강우지속시간 등의 강우특성을 적용해 실질적인 사면안정성 평가가 가능한 수정된 무한사면 안정해석식을 다음과 같이 제안하였다.

Hammond et al. (1992)에 의해 제안된 기존의 무한사면 안정해석식은 식 (1)과 같다.

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_w g (D - D_w) + (\rho_w g - \rho_w g) D_w] \tan \phi}{D \rho_w g \sin \theta \cos \theta} \tag{1}$$

여기서, C_r : 식물뿌리의 점착력(N/m²)

- C_s : 흙의 점착력(N/m²)
- θ : 사면각(°)
- ρ_t : 전체밀도(kg/m³)
- ρ_w : 물의 밀도(kg/m³)
- g : 중력가속도(9.81 m/s²)
- D : 토층의 깊이(m)
- D_{wf} : 지반의 침윤선 깊이(m)
- ϕ : 흙의 내부마찰각(°)

실제 강우가 내렸을 때 토층 내에서 강우의 침투양상에 따른 침윤선 변화를 Fig. 1에 나타냈다. 토층의 깊이 에 대한 침윤선의 깊이가 포화깊이비가 되며, 이 포화깊이비는 강우지속시간 등에 영향을 받기 때문에 시간에 따른 값으로 도출된다.

Fig. 1을 바탕으로 토층의 물리적 특성을 다음과 같이 식 (2)~(5)까지 유도하였다. 토층의 두께는 표토층과 기 반암과의 직각일 때의 두께를 의미하며, 실질적으로 사 면이 붕괴될 때의 붕괴체적과 붕괴시의 전단력과 관계 를 갖는다. 즉, 여기서 강우 침투는 깊이방향(D)과 구분 된다. 따라서 토층 두께(h)는 다음과 같다.

$$h = D \cos \theta \tag{2}$$

단일 지점에서 강우 침투는 표토층의 한 지점에서 토 층의 깊이 방향으로 진행하므로, 강우 침투는 침윤선과 동일한 개념으로 파악할 수 있다. 뿐만 아니라 강우 침 투시 침윤선의 측정은 토층의 일정 깊이에 함수비센서 내지 간극수압센서를 설치하여 강우시 체적함수비 내지 간극수압이 상대적으로 최고값을 갖는 지점을 파악하면 된다. 여기서 토층에 대한 포화깊이비(H)는 토층의 깊이

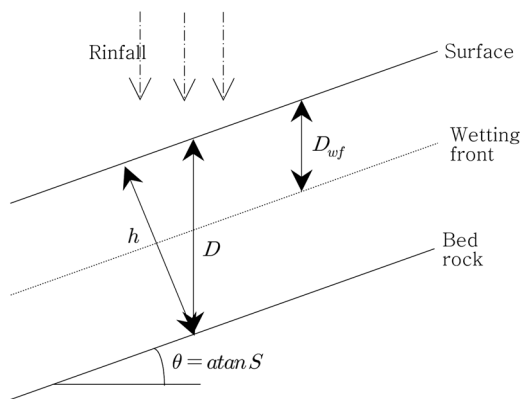


Fig. 1. Schematic figure showing the concept of saturation depth ratio considering a wetting front in the soil.

와 침윤선의 변화 깊이와의 관계로부터 다음과 같이 정 의된다.

$$H = \frac{D_{wf}}{D} \tag{3}$$

일반적으로 토층의 점착력은 식물 뿌리의 영향과 흙 의 영향 모두를 고려해야 하지만, 식물 뿌리의 종류 및 깊이 등에 차이가 있기 때문에 대표적인 점착력(C)만으 로 나타낸다. 이를 위해 식물 뿌리와 흙의 점착력은 토 층의 두께와 전체밀도, 그리고 중력가속도에 대한 항목 과의 관계로 다음과 같이 실질적인 토층의 점착력(C)을 유도한다.

$$C = \frac{C_r + C_s}{h \rho_t g} \tag{4}$$

여기서 C는 토층의 무게에 대한 점착력의 비로서, 단 위를 갖지 않는다.

또한, 토층의 밀도는 강우의 침투에 따른 공극 내에 서 함수비 변화에 따라 민감하게 변화하기 때문에 전체 밀도에 대한 물의 밀도에 대한 비를 다음과 같은 관계 로 나타낸다.

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_t} \tag{5}$$

이렇게 유도한 각각의 지반정수인 토층의 물리적 성 질을 나타내는 식 (2)~(5)를 식 (1)에 대입하여 유도하 면 다음과 같다. 여기서, $[\rho_t g(D - D_{wf}) + (\rho_t g - \rho_w g) D_{wf}]$ 를 A항으로 둔다.

$$\begin{aligned} FS &= \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [A] \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} \\ &= \frac{Ch \rho_t g}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} + \frac{\cos^2 \theta [A] \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} \\ &= \frac{CD \cos \theta \rho_t g}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} + \frac{\cos^2 \theta [A] \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} \\ &= \frac{C}{\sin \theta} + \frac{\cos^2 \theta [\rho_t g D - \rho_w g D_{wf}] \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} \\ &= \frac{C}{\sin \theta} + \frac{\rho_t g D \cos^2 \theta \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} - \frac{\rho_w g D_{wf} \cos^2 \theta \tan \phi}{D \rho_t g \sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 분자와 분모를 제거하고, 식 (3)의 포화깊이비와 식 (5)의 전체 밀도에 대한 물의 밀도의 비를 대입하여

아래와 같이 식을 정리하여 본 연구에서 새로이 제안하였다.

$$FS = \frac{C}{\sin \theta} + \frac{\cos \theta \tan \phi}{\sin \theta} - \frac{\cos \theta \tan \phi H(t)r}{\sin \theta} = \frac{C + \cos \theta (1 - H(t)r) \tan \phi}{\sin \theta} \quad (7)$$

여기서, C 는 점착력 비, θ 는 사면경사각($^\circ$), ϕ 는 흙의 내부마찰각($^\circ$), r 은 전체 밀도에 대한 물의 밀도 비, $H(t)$ 는 시간에 따른 포화깊이비를 의미한다. 상기 수정식은 전술한 바와 같이 강우에 따른 지하수위 상승의 개념이 아니라 지표로부터 강우의 침투에 따른 포화상태 변화를 고려한 것이므로, 지하수위는 고려되지 않는 전제조건을 가진다.

이상과 같이 식 (1)에 대해 토층의 두께, 밀도 및 강우의 침투를 고려하여 식 (7)과 같이 유도하였다. 기존의 무한사면 안정해석식은 일반적으로 얇은 깊이에서의 지하수위 변화만을 고려하여 대상 토층사면의 안정성을 평가하여 왔다. 그러나, 국내의 산사태 발생 특성은 지하수위의 영향보다는 얇은 토층두께의 발달로 인해 강우의 침투 영향이 더 크게 작용한다. 즉, 강우가 발생되었을 때 지표로부터 강우의 침투양상에 따라 불포화 토층이 포화상태로 바뀌면서 천층과괴 형태로 붕괴가 진행된다. 따라서, 현실적인 산사태의 발생원인과 형태로 볼 때, 강우조건에 따른 강우의 침투양상인 침윤선 변화를 토층의 깊이와 고려한 시간에 따른 포화깊이비 ($H(t) = \frac{D_i(t)}{D}$)와 함께 고려하는 것이 더 타당하다. 뿐만 아니라 강우의 침투깊이비는 강우량과 강우지속시간, 강우형태 등의 강우사상별 특성을 모두 포함하는 개념이기 때문에 현실적으로 강우에 의한 사면의 안정성을 파악하는데 합리적이라 할 수 있다.

식 (3)에서 포화깊이비는 유사동력학적 습윤지수의 분석결과에서 도출된 값이며, 이를 토대로 시간에 따른 포화깊이비 $H(t)$ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 여기서 $H(t)$ 는 실제 토층의 깊이에 대한 침윤선의 침투깊이에 대한 비이기 때문에 이 값은 0에서 1 사이의 범위에서 존재한다.

$$H_i(t) = \frac{D_i(t)}{D} \quad : 0 < H_i(t) \leq 1 \quad (8)$$

여기서, D 는 불포화 토층 깊이, $D_i(t)$ 는 i 번째 격자의 지표하흐름 깊이를 나타낸다.

식 (8)에 나타낸 지표하흐름 깊이 $D_i(t)$ 는 최대값의

크기가 토층의 깊이 범위 내에 존재하기 때문에 시간에 따른 유효상부기여면적이 증가하더라도 일정 범위 이상을 나타낼 경우에는 동일한 값을 갖는다. 토층의 깊이를 벗어날 경우에는 이미 포화상태를 의미하기 때문에 강우강도와 유효상부기여면적에 거의 영향을 받지 않는다.

$$D_i(t) = \min \left[\frac{r_0 a_i(t)}{K_s \tan \beta_i}, D \right] \quad : 0 < h_i(t) < D \quad (9)$$

여기서, r_0 는 강우강도, $a_i(t)$ 는 i 번째 격자의 유효상부기여면적, K_s 는 포화 투수계수, $\tan \beta_i$ 는 i 번째 격자의 사면 경사각이다(Borga et al., 2002).

유효상부기여면적은 식 (10)을 통해 구할 수 있다.

$$a_i(t) = \sum_{i=1}^n A(t)/b \quad (10)$$

여기서, $A(t)$ 는 상부기여면적 누적합이며, b 는 각 격자의 단위길이이다.

한편, 유사동력학적 습윤지수 $w_i(t)$ 는

$$w_i(t) = \ln \left(\frac{a_i(t)}{\tan \beta_i} \right) \quad (11)$$

이다. 여기서, $w_i(t)$ 는 i 번째 격자의 습윤지수, $a_i(t)$ 는 i 번째 격자의 유효상부기여면적, $\tan \beta_i$ 는 i 번째 격자의 사면 경사각이다(Borga et al., 2002).

따라서, 이러한 방법으로 식 (7)과 같이 계산된 사면 안전율은 강우가 토층 내로 침투될 때 시간에 따른 토층의 포화깊이 변화를 반영하여 무한사면의 안정성을 해석한 것으로서, 기존의 사면안정해석에서 간극수압 등만을 고려한 방법에 비해 시간에 따른 강우와 토층의 포화상태를 직접적으로 고려한 것이 차별화된 특징이다. 이를 이용할 경우 우리나라와 같이 토층의 두께가 얇은 지역의 경우 지하수의 상승에 의한 포화보다는 강우시 지표로부터의 침투에 의한 토층의 포화가 우세한 조건에 더욱 적합하게 적용할 수 있다(Park et al., 2011 b).

편마암 풍화토의 강우침투속도 산정

앞 절에서 제안한 포화깊이비를 고려한 무한사면 안정해석식을 이용하여 편마암 풍화토 내 강우침투에 따른 사면 안전율의 변화를 파악하기 위하여 편마암 풍화토의 강우침투속도를 산정하였다. 강우침투속도의 산정은 Park et al. (2011 a, 2011 b)가 실시한 칼럼시험을 통한 편마암 풍화토의 강우침투속도 결과를 이용하였다.

Table 1. Test conditions for weathered gneiss soils under continuous rainfall.

Gneiss	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Unit weight of soil (g/cm ³)	Porosity (%)	Mean infiltration velocity of rainfall (cm/s)
GnC1	20	10	1.35	48.8	2.854×10^{-3}
GnC2	20	10	1.55	41.2	2.012×10^{-3}
GnC3	20	10	1.61	39.0	1.297×10^{-3}
GnC4	50	4	1.35	48.8	4.509×10^{-3}
GnC5	50	4	1.55	41.2	2.423×10^{-3}
GnC6	50	4	1.61	39.0	2.016×10^{-3}

Table 2. Test conditions for weathered gneiss soils under repeated rainfall.

Gneiss	Rainfall intensity (mm/h)	Rainfall duration (hour)	Rainfall pause duration (hour)	Unit weight of soil (g/cm ³)	No. of repetition	First infiltration velocity (cm/s)	Repeated infiltration velocity (cm/s)
GnC1	20	10	0	1.35	1	2.854×10^{-3}	-
GnR1	20	1	1	1.35	5	1.871×10^{-3}	1.320×10^{-2}
GnR2	20	1 to 3 (30 minutes interval)	1	1.35	1	2.090×10^{-3}	1.486×10^{-2}
GnR3	20	3 to 1 (30 minutes interval)	1	1.35	1	2.247×10^{-3}	1.366×10^{-2}
GnR4	20	1	1 to 2.5 (30 minutes interval)	1.35	1	1.756×10^{-3}	1.307×10^{-2}
GnR5	20	1	2.5 to 1 (30 minutes interval)	1.35	1	1.309×10^{-3}	1.718×10^{-2}

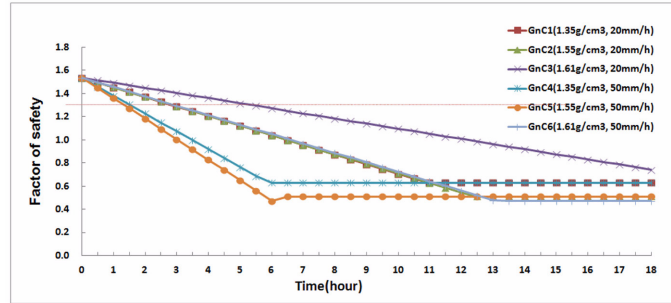
칼럼시험은 인공강우 공급장치, 토조칼럼 및 센서부, 데이터 획득장치로 구성된 시험장치를 이용하여 정량펌프를 통해 편마암 불포화토로 구성된 토조칼럼 내에 강우를 주입하는 방법으로 진행되었다. 토조칼럼 내에는 5개의 TDR 센서가 강우침투에 따른 체적함수비를 일정 시간 간격으로 측정하고, 이를 통해 칼럼내 강우침투속도를 파악할 수 있다(Park et al., 2011 a).

본 시험에서는 강우강도, 연속강우와 반복강우, 불포화토의 단위중량 조건을 각각 변화 시켰으며, 이에 따른 강우침투속도를 산정하였다(Tables 1 & 2). 먼저 연속강우는 강우강도 20 mm/h와 50 mm/h의 두 가지 조건으로 시험을 수행하였으며, 그 이유는 소방방재청의 산사태 주의보 및 경보기준에 근거하여 강우조건을 설정하였다. 강우지속시간은 두 가지의 강우강도 모두 총 강우량이 200 mm가 되도록 설정하였다. 이는 우리나라 집중호우 시 일 평균 강우량이 210 mm이고, 특히 국내

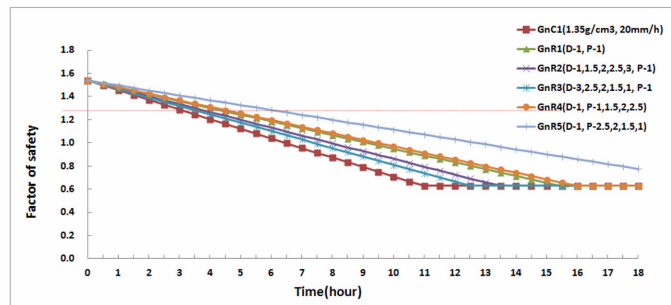
자연사면 산사태가 연속강우 200 mm 이상일 경우 급격히 산사태가 증가하는 경향에 근거하였다(KIGAM, 2000). 불포화토의 칼럼 내 단위중량은 편마암 시료를 채취한 강원도 인제군 덕산리 지역의 현장단위중량을 기준으로 칼럼 내에서 시료성형이 가능한 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량 조건으로 설정하였다. 이러한 조건에 따라 측정된 체적함수비를 이용하여 계산으로 구한 강우침투속도는 Tables 1 및 2와 같다(Park et al., 2011 a; Park et al., 2011 b).

제안식을 이용한 포화깊이비에 따른 무한사면 안정해석

본 연구에서는 지표하 흐름 깊이를 산정하기 위해 평균 강우침투속도를 이용하여 사면 안전율을 계산하였다. 먼저 강우침투속도시험 결과를 활용하여 연속강우 시 풍



(a) Continuous rainfall



(b) Repeated rainfall

Fig. 2. Changes in the factor of safety in weathered gneiss soils under continuous rainfall (a) and repeated rainfall (b).

화토별 단위중량 변화에 따른 사면의 안전을 변화 양상을 알아보기 위해서, 임의의 사면을 가정하여 분석을 수행하였다. 해석을 위하여 설정한 사면은 사면경사 35°, 토층두께 100 cm의 기하학적 특성과 점착력 0.5 kg/cm², 내부마찰각 25°의 역학적 특성을 보이는 사면으로 가정하였다.

계산결과에 의하면 편마암 풍화토 내에서 시간에 따른 무한사면 안전율의 변화는 선형적 변화를 보인다(Fig. 2). 연속강우의 경우 강우 시간에 따른 안전율의 변화는 흙의 단위중량이 감소할수록, 강우강도가 증가할수록 빨라지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2 (a)). 국토해양부의 건설공사비탈면설계기준을 고려하여 안전율이 1.3 이하가 되는 시간을 살펴보면, 강우강도 20 mm/h 조건인 GnC1 ~ GnC3은 각각 2.86시간, 2.87시간, 5.38시간으로 나타났고, 50 mm/h 조건인 GnC4 ~ GnC6은 각각 1.54시간, 1.34시간, 2.92시간으로 계산되었다. 이를 통해 동일한 강우강도에서 흙의 단위중량이 감소할수록 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 대체로 짧아지므로 시간에 따른 안전율의 감소 기울기가 크다는 것을 알 수 있다 (Figs. 2 & 3). 동일한 흙의 단위중량 조건에서 강우강

도를 각각 20 mm/h, 50 mm/h로 조절하여 시험한 결과를 보면, 흙의 단위중량 1.35 g/cm³ 조건인 GnC1, GnC4가 각각 2.86시간, 1.54시간으로 강우강도가 증가할수록 안전율이 1.3 이하로 감소하는 시간이 짧아졌다. 그리고, 흙의 단위중량이 같은 조건인 GnC2와 GnC5, GnC3과 GnC6를 비교해 보아도 각각 2.87시간과 1.34시간, 5.38시간과 2.92시간으로 강우강도가 증가할수록 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 짧아지는 양상을 보였다(Fig. 3 (a)).

한편, GnC2와 GnC6의 경우 토질조건과 강우강도가 다름에도 불구하고 안전율 감소 기울기가 유사하고, 안전율 1.3 이하로 변하는 시간의 경우도 각각 2.87시간, 2.92시간으로 차이가 매우 적게 나타났다(Figs. 2 (a) & 3 (a)). 이는 사면의 점착력과 내부마찰각, 사면경사가 동일할 때, 강우침투속도가 사면 안전율에 미치는 영향이 크게 작용함을 잘 입증하는 것으로서, GnC2와 GnC6의 강우침투속도는 각각 2.012×10⁻³ cm/s, 2.016×10⁻³ cm/s로 비슷하다. 이를 통해 흙의 단위중량과 강우강도가 서로 다르더라도 토층 내 강우 침투속도가 유사하면 안전율 변화속도도 유사해 지는 것을 알 수 있다.

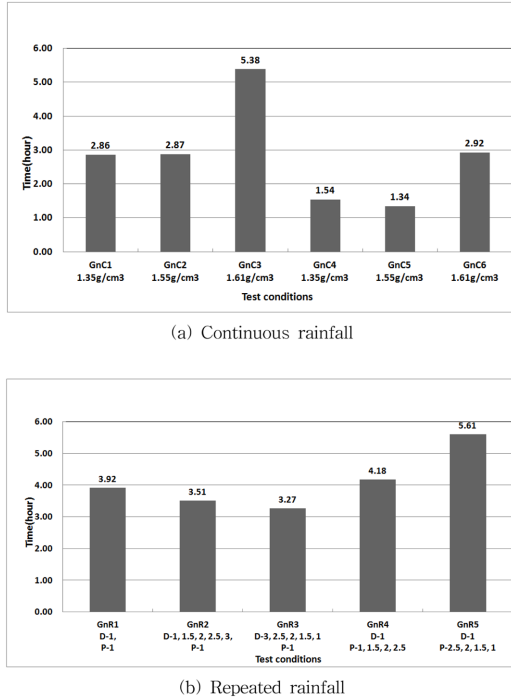


Fig. 3. Time taken for the factor of safety to decrease to less than 1.3 in weathered gneiss soils dependent on rainfall conditions.

따라서, 사면 안전율의 파악을 위해서는 실제 강우침투 속도를 파악하는 것이 매우 중요하다.

반복강우의 경우, 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 GnR1에서 GnR5까지 각각 3.92시간, 3.51시간, 3.27시간, 4.18시간, 5.61시간으로 나타났다(Fig. 3 (b)). 각 조건별 강우침투속도인 1.871×10^{-3} cm/s, 2.090×10^{-3} cm/s, 2.247×10^{-3} cm/s, 1.756×10^{-3} cm/s, 1.309×10^{-3} cm/s와 비교하였을 때, 강우침투속도가 빠를수록 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 짧게 나타났다. 강우침투에 따른 안전율의 변화는 강우침투속도와 흙의 단위중량 변화에 의해 좌우되는데, 반복강우 시험에서는 흙의 단위중량 값을 동일하게 적용하였기 때문에 안전율의 감소는 강우침투속도에 좌우되어 나타났다고 할 수 있다(Figs. 2 (b) & 3 (b)).

결 론

본 연구는 기존에 제안된 무한사면 안정해석식을 바탕으로 불포화토 내에 강우침투 시 지표로부터 시간에 따른 토층의 포화깊이비를 새로이 고려한 무한사면 안

정해석 수정식을 제안하였다. 이를 위해 기존에 고려하지 못했던 시간에 따른 포화깊이비와 지표하 흐름 깊이의 개념을 새로이 도입하였다. 본 연구에서는 제안한 식을 이용한 사면안전율 변화를 산정하기 위하여 편마암 풍화토 칼럼시험을 통해 획득한 강우침투속도를 바탕으로 토층의 포화깊이비를 고려한 사면안정해석을 실시하였다. 해석 결과 편마암 풍화토의 연속강우의 경우 안전율이 1.3 이하로 감소하는 시간이 강우강도 20 mm/h 조건에서 2.86~5.38시간이고, 강우강도 50 mm/h 조건에서는 1.34~2.92시간으로 나타났다. 동일한 강우강도에서 흙의 단위중량이 감소할수록 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 짧아지므로 시간에 따른 안전율의 감소 기울기가 크다는 것을 알 수 있다. 한편, 반복강우의 경우, 안전율이 1.3 이하가 되는 시간은 강우조건별로 3.27~5.61시간으로 나타났으며, 강우침투속도가 빠를수록 안전율이 1.3 이하가 되는 시간이 짧게 나타났다. 본 연구에서 제안한 식에 따르면 강우침투에 따른 안전율의 변화는 강우침투속도와 흙의 단위중량 변화에 의해 주로 좌우되는데, 반복강우 시험에서는 흙의 단위중량 값을 동일하게 적용하였기 때문에 안전율의 감소는 강우침투속도에 좌우되어 나타났다고 할 수 있다. 이는 토층의 단위중량과 강우조건에 따라 강우 침투속도의 차이가 발생하고, 이로 인해 포화깊이비의 변화 시간이 서로 다르기 때문으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2011년도 대한민국 정부(교육과학기술부)의 재원으로 시행하는 한국연구재단 국제협력사업의 지원으로 수행된 연구결과입니다(2011-00379). 또한, 이 논문의 일부 결과는 2012년도 한국지질자원연구원 주요사업(광산개발에 따른 지질환경재해 확산 제어기술 개발; 12-3212)의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

References

- Beven, K. J. and Kirkby, J. N., 1979, A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin*, 24, 43-69.
- Borga, M., Fontana, G. D. and Cazorzi, F., 2002, Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index, *Journal of Hydrology*, 268, 56-71.
- Burt, P.T. and Butcher, D.P., 1985, Topographic controls of soil moisture distributions, *Journal of Soil Science*, 36, 469-486.

- Hammond, C., Hall, D., Miller, S., and Swetik, P., 1992, Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0, General Technical Report INT-285, USDA Forest Service Intermountain Research Station 20p.
- Jung, S. S., Choi, J. Y., and Lee, J. H., 2009, Stability analysis of unsaturated weathered soil slope considering rainfall duration, Korean Society of Civil Engineers, 29(1), 1-9 (in Korean).
- KIGAM, 2000, Prediction and mitigation of landslide hazards, Ministry of Science and Technology, Korea, N2-03-01-A-02, 642p (in Korean).
- Lee, K.H., Jeong, S.S., and Kim, T.H., 2007, Effect of fines on the stability of unsaturated soil slopes, Journal of the Korean geotechnical society, v.23, 101-109 (in Korean).
- Lee, S. J., Lee, H. J., and Lee, S. R., 2005, Soil water characteristic curve for weathered granite soils – A prediction method, Korean Geotechnical Society, 21(1), 15-27 (in Korean).
- Olivares, L. and Picarelli, L., 2003, Shallow flowslides triggered by intense rainfalls in natural slopes covered by loose unsaturated pyroclastic soils, Geotechnique, 53(2), 283-287.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., and Goodwin, C. N., 1999, GIS-based landslide susceptibility mapping with SINMAP, Proceedings of the 34th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, 34, 219-231.
- Park, K.-B., Chae, B.-G., Kim, K.-S., and Park, H.-J., 2011 a, Analysis of rainfall infiltration velocity for unsaturated soils by an unsaturated soil column test : Comparison of weathered gneiss soil and weathered granite soil, Economic and Environmental Geology, 44(1), 71-82 (in Korean).
- Park, K.-B., Chae, B.-G., and Park, H.-J., 2011 b, Analysis of rainfall infiltration velocity in unsaturated soils under both continuous and repeated rainfall conditions by an unsaturated soil column test, The Journal of Engineering Geology, 21(2), 133-145 (in Korean).
- Springman, S.M., Jommi, C. and Teysseire P., 2003, Instability on moraine slopes induced by loss of suction: a case history, Geotechnique, 53(1), 3-10.
- Xue, J. and Gavin, K., 2008, Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes, Geotech Geology Engineering, 26(1), 199-209.
- Yu, N.D., 2003, Characteristics of unsaturated weathered soils with varying clay contents, Yonsei University, 99p.
- 채병곤**
한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
350-305 대전광역시 유성구 가정동 과학로 124
TEL : 042-868-3052
E-mail : bgchae@kigam.re.kr
- 박규보**
세종대학교 공간정보공학과
143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
TEL : 02-3408-3965
E-mail : parkase85@naver.com
- 박혁진**
세종대학교 공간정보공학과
143-747 서울 광진구 군자동 98번지 세종대학교
TEL : 02-3408-3965
E-mail : hjpark@sejong.ac.kr
- 최정해**
한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
350-305 대전광역시 유성구 가정동 과학로 124
TEL : 042-868-3944
E-mail : jhchoi@kigam.re.kr
- 김만일**
한국수자원공사 댐유역관리처 댐안전팀
306-711 대전광역시 대덕구 신탄진로 200
TEL : 042-629-2798
E-mail : mikim@kwater.or.kr

원고접수일 : 2012년 9월 10일

수정본채택 : 2012년 9월 21일

게재확정일 : 2012년 9월 21일