

선행강우와 현장 모관흡수력을 고려한 산사태 해석 방법 제안

Proposal of Design Method for Landslides Considering Antecedent Rainfall and In-situ Matric Suction

김 정 환¹ Kim, Jung-Hwan

정 상 섭² Jeong, Sang-Seom

김 용 민¹ Kim, Yong-Min

이 광 우¹ Lee, Kwang-Woo

Abstract

This study presents a design method for typical rainfall-induced landslide considering in-situ matric suction. Actual landslide data are used to validate the proposed method. The soil-water characteristic curve (SWCC) and unsaturated permeability are experimentally determined to estimate hydraulic properties of testing site. The field measurement of matric suction is carried out to monitor in-situ matric suction in a natural slope subjected to rainfall infiltration, which is incorporated in the landslide analysis. The wetting band depth and safety factor of the slope are assessed to clarify the effect of domestic rainfall pattern. Especially, the effect of antecedent rainfall on the slope stability is investigated and discussed in terms of wetting band depth using parametric study. It is found from the result of this study that proposed design method can consider the characteristic of unsaturated soil and effect of antecedent rainfall. The location of the scarp zone is fairly well predicted by proposed design method. Moreover, heavy rainfall, concentrated in the backward part with time, causes the lowest safety factor of the slope. These results demonstrate that decrease in matric suction due to antecedent rainfall may trigger slope instability. After the antecedent rainfall, additional rainfall may cause the slope failure due to increasing wetting band depth.

요 지

본 연구에서는 전형적인 산사태 발생 메커니즘인 강우침투현상과 현장 모관흡수력을 고려한 산사태 해석 방법을 제시하였으며, 실제 산사태가 발생된 지역을 선정하여 그 적용성을 검토하였다. 이를 위해 대상지역의 시료를 채취하여 함수특성곡선(SWCC) 실험을 수행하였으며, 불포화 투수계수를 산정하였다. 또한 초기 모관흡수력과 강우발생에 따른 모관흡수력 변화를 관측하기 위해 현장계측을 수행하였으며, 그 결과를 산사태 해석에 적용하였다. 그리고 국내 강우특성을 고려한 비탈면 설계를 위하여, 강우패턴에 따른 습윤대 깊이와 안전율 변화를 분석하였다. 특히, 선행강우 효과를 고려한 매개변수 해석을 수행하여 비탈면 안정성에 어떠한 영향을 주는지 습윤대 깊이 변화를 통해 분석하였다. 그 결과, 본 연구에서 제안한 산사태 해석 방법은 지반의 불포화 특성과 선행강우 효과를 고려할 수 있으며, 산사태 발생 위치를 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 그리고 강우발생 시, 강우량이 후반부에 집중된 강우패턴에서 비탈면의 안전율이 가장 낮게 나타났다. 또한, 선행강우는 비탈면의 모관흡수력을 감소시켜 불안정성을 증가시키고, 이후 발생된 강우로 인해 습윤대가 깊어지면서 비탈면 파괴 위험이 증가한다.

Keywords : Matric suction, Rainfall infiltration, Landslide, Antecedent rainfall, Seepage-slope stability analysis

1 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내에서는 집중강우에 의한 비탈면 재해가 자주 발생하고 있으며(National Disaster Management Institute, 2012), 특히 도심에서 발생한 산사태 및 토석류로 인하여 재산피해뿐만 아니라 인명피해까지 발생하고 있어 어느 때 보다 비탈면 재해 발생원인과 보강 대책에 큰 관심이 집중되고 있다. 산사태는 강우침투로 인하여 비탈면 표층부에 습윤대(wetting band)가 형성되어 얇은 파괴 형상으로 발생하는 것이 일반적인 현상이며(Fredlund et al., 1994; Cho and Lee, 2001; Kim et al., 2004; Jeong et al., 2008), 산지 유역을 따라 흘러내릴 경우에는 토석류를 발생시키기도 한다(Iverson and Denlinger, 2001; Marchi et al., 2002). 강우가 일정 기간 동안 지속되면 함수비가 증가하여 표층 지반이 포화되기 시작하고 습윤대가 일정 깊이에 도달하면 지반의 전단강도를 증가시키는 모관흡수력(matric suction)이 현저히 감소하여 사면의 불안정성이 증가하게 된다(Ng and Shi, 1998; Fourie et al., 1999; Cho and Lee, 2000; Jeong et al., 2009). 따라서 산지를 이루고 있는 토사의 불포화 특성이 산사태 발생을 결정짓는 중요한 요소라고 할 수 있다. 비탈면에서의 강우침투 현상을 현장상태에 보다 근접하게 분석하기 위해서는 우리나라 전역에 분포하고 있는 불포화 풍화토 특성에 대한 실험적 연구가 반드시 선행되어야 하며, 이를 산사태해석에 적절히 적용할 수 있어야 한다.

강우침투에 의한 산사태는 비탈면 파괴 당시의 강우조건도 중요하지만, 그 이전에 발생했던 선행강우(antecedent rainfall)에 큰 영향을 받는다(Tan et al., 1987; Chatteriea, 1989; Wei et al., 1991; Rahardjo et al., 2001; Yune et al., 2010). 불포화 비탈면이 건조한 상태로 지속되면 국내 풍화토 지반의 경우, 모관흡수력은 약 75~85kPa을 보이며(Lee et al., 2012), 불포화 투수계수는 약 1×10^{-10} cm/sec 이하로 매우 작은 값을 갖는다. 이러한 지반상태에서 강우가 발생하면 초기 모관흡수력은 점점 감소하고 함수비 및 불포화 투수계수가 증가하여 강우침투속도가 빨라지게 된다. 즉, 선행강우는 산사태 발생 당시의 지반의 모관흡수력 초기상태 및 강도를 결정하고, 지속적인 강우로 인하여 비탈면이 파괴된다. 특히, 황현근 등(2013)은 2012년 우리나라에서 발생한 비탈면 재해 발생현황(53개소)을 분석하여 산림청에서 제시한 산사태 예보 기준을 적용 할 경우, 비탈면 재해 발생 이전의 최대시간강우량과 일누적강우량을 고려하였을 때

산사태주의보 기준에 못 미치는 적은 강우에서 비탈면 재해가 발생할 가능성이 높다고 보고하였다. 따라서 강우에 의한 산사태 발생을 예측하고 대책을 마련하기 위해서는 선행강우(I_A)에 따른 비탈면의 초기 간극수압 분포를 반드시 고려해야 하고, 이후에 발생한 강우특성을 반영하여 비탈면 안정성 검토를 수행해야 한다. 강우특성은 강우강도(I), 강우지속시간(t), 선행강우와의 시간 차이(T_g) 등으로 나눌 수 있으며, 비탈면의 안정성에 영향을 미치는 주요한 요소들이다. 이를 위해 우리나라에서는 강우의 재현기간별 최대강우강도와 강우지속시간의 관계를 나타낸 확률강우량도(intensity-duration-frequency, IDF) 곡선을 설계 시 주로 사용하고 있으나(Lee et al., 2009), 그 기준이 명확하지 않고 선행강우를 고려할 수 없기 때문에 수많은 경우의 수를 고려하여 최소 안전율을 나타내는 강우조건을 채택하거나 실시간 강우자료를 사용하기도 한다.

산사태를 예측하기 위한 해석적인 방법으로는 첫째, 산사태 발생과 관련 있는 요소들을 공간적으로 분석하여 산사태 발생 가능지역을 예측하는 통계적/공학적인 해석 방법이 있으며, 지리정보시스템(GIS) 적용을 통해 광역적인 분석이 가능하다(Kim et al., 2012). 둘째, 불포화 지반의 수리학적 특성을 반영할 수 있고 강우침투에 의한 습윤대 깊이와 간극수압분포를 평가하여 비탈면의 안전율을 산정하는 침투-사면안정해석 방법이 있다. 여기에는 강우침투해석과 사면안정해석을 연계해석(staggered analysis)하는 방법(GEO-SLOPE, 2012; SoilWorks, 2013)과 지반의 수리학적 특성과 역학적 특성을 동시에 해석(monolithically coupled analysis)할 수 있는 방법이 있다(Kim, 2010). 실제 설계에서는 사용이 편리하고 침투-사면안정해석을 수행할 수 있는 연계해석 방법을 많이 사용하고 있으며, 상용화된 프로그램을 활용하여 사면안정해석 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 연계해석 시, 위에서 언급했던 불포화 지반 특성에 대한 정확한 이해와 올바른 적용이 필요하며, 지반의 간극수압 분포와 강우 특성에 따라 해석의 정확성이 달라지기 때문에 많은 주의가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지반의 불포화 특성과 선행강우 효과를 고려할 수 있는 산사태 해석 방법을 제시하였다. 그리고 해석 방법의 적용성을 검토하기 위하여 첫째, 산사태가 발생한 지역의 시료를 채취하여 불포화 풍화토 지반의 수리학적 특성인 함수특성곡선과 불포화 투수계수를 산정하였으며, 장력계(tensiometer)를 이용

한 현장 모관흡수력을 측정하여 그 결과를 침투해석에 적용하였다. 둘째, 국내 강우 특성인 확률강우량도에 따른 강우 패턴과 선행강우 효과를 고려한 연계해석을 수행하여 습윤대 깊이와 안전을 변화를 분석하였다. 셋째, 상용프로그램인 GEO-SLOPE(2012)을 이용하여 침투 및 사면안정해석을 수행하였으며, 그 결과를 실제 산사태가 발생된 위치와 비교 검토 하였다.

2. 흙의 불포화 특성

흙의 불포화 특성은 수리학적 특성(hydraulic characteristic)과 강도 특성(mechanical characteristic)으로 구분할 수 있으며, 현장실험과 실내실험을 통해 산정할 수 있다. 대표적으로 현장에서는 불포화 투수계수를 산정할 수 있는 지표투수실험, 장력계를 이용한 모관흡수력(matric suction) 측정 등이 있다. 실내에서는 불포화 지반의 고유한 특성인 함수특성곡선을 산정할 수 있으며, 불포화 투수계수 및 전단강도를 측정할 수 있다. 투수 및 전단실험을 모두 수행하기 어려운 경우 함수특성곡선을 통해 불포화 투수계수 및 전단강도를 추정할 수 있으므로 정확한 함수특성곡선을 산정하는 것이 중요하다(van Genuchten, 1980; Fredlund et al., 1994; Vanapalli et al., 1996). 본 장에서는 산사태 해석을 위하여 함수특성곡선 및 지표투수실험과 현장 모관흡수력 계측을 수행하여 현장시료의 불포화 특성을 파악하였다.

2.1 불포화 풍화토의 함수특성곡선

함수특성곡선(soil-water characteristic curve, SWCC)은 불포화 지반의 체적함수비(V_w/V)와 모관흡수력(S)의 관계로 표현 되는 곡선으로 불포화 지반의 수리학적 특성을 결정짓는 가장 기본적인 물성이다. 함수특성곡선은 물이 흙 내부로 흡수되는 습윤과정(wetting process)과 간극 공기압에 의해 물이 배출되는 건조과정(drying process)을 통해 산정할 수 있으며, 습윤과정이 강우 침투에 의한 비탈면 파괴 문제와 유사하지만 과정이 복잡하여 많은 시간이 소요되고 실험값의 차이가 크지 않기 때문에 실험이 용이한 건조곡선(desorption curve)을 많이 사용하고 있다(Lee, 2004; Lee et al., 2009).

함수특성곡선은 초기 포화상태에서 모관흡수력이 증가하여도 간극속의 물은 유출되지 않고 체적함수비가 유지되다가 모관흡수력이 공기함입값(air-entry value, AEV)

을 넘어 계속 증가하면 흙 알갱이의 크기와 입자 배열에 따라 일정한 경사를 가지면서 체적함수비가 점점 감소하게 된다. 모관흡수력이 증가하여도 더 이상 물이 추출되지 않은 상태에 이르게 되며(Fig. 1), 이때의 함수비를 잔류체적함수비(residual volumetric water content)라 한다. 이러한 원리를 이용하여 시료의 모관흡수력을 조절할 수 있는 압력판 추출 시험기(pressure plate extractor)와 잔류모관흡수력을 측정할 수 있는 filter paper(ASTM D5298-10)를 통해 함수특성곡선을 산정할 수 있다.

본 절에서는 산사태 발생 이력이 있는 OO산을 대상으로 불포화 특성을 산정하기 위하여 함수특성곡선 실험 및 지표투수실험을 수행하였다. 먼저 대상지역의 시료를 채취하여 기본 물성 실험을 수행하였다. Fig. 2는 체분석 실험 결과이며, 통일분류법상 CL계열로 나타났다. 액·소성 한계 실험을 수행하여 액성한계는 36.6%,

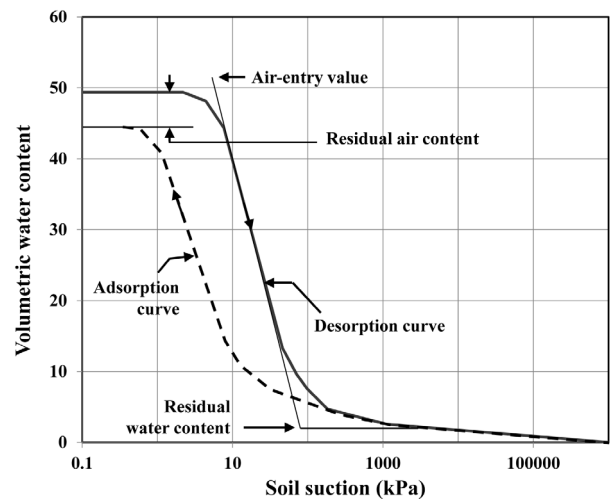


Fig. 1. Typical soil-water characteristic curve for silty sand (Fredlund and Xing, 1994)

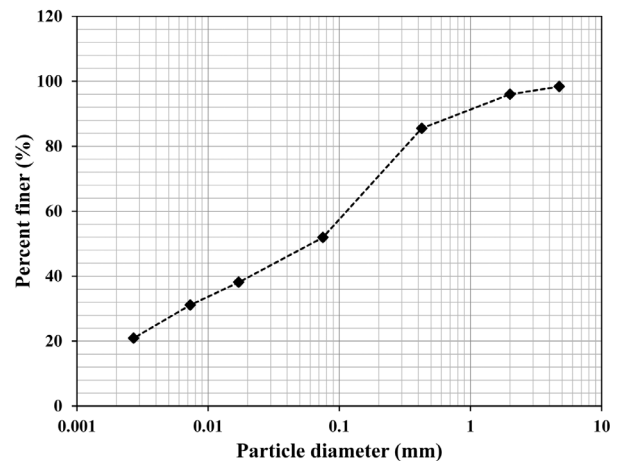


Fig. 2. Grain-size distribution curve for in-situ soils

Table 1. Physical properties of the soils

Properties	Value
Specific gravity (G_s)	2.73
Passing percent of No. 200 sieve	51%
Liquid limit (LL)	36.6%
Plastic index (PI)	15.4
USCS	CL
Saturated permeability (k_s)	8.0×10^{-6} m/sec

Table 2. Curve-fitting parameters for the soil-water characteristic curve

Curve-fitting parameters	Value
α (1/kPa)	0.1125
n	1.351
$m=1-1/n$	0.251
Saturated volumetric water content (θ_s)	0.5
Residual volumetric water content (θ_r)	0.17

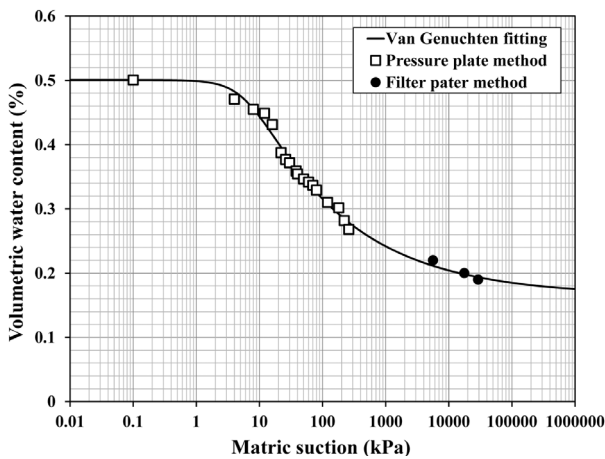


Fig. 3. SWCC for the colluvial soils: experimental data and fitted curve

소성지수는 15.4로 나타났으며 비중은 2.73으로 나타났다. 그리고 정수위 투수실험을 수행하여 포화 투수계수를 산정하였다(Table 1).

대상지역의 함수특성곡선을 산정하기 위하여 압력판 추출 시험기인 GCTS SWC-150(Pham and Fredlund, 2004) 과 filter paper(whatman No.42)를 사용하였다(Fig. 3). 실험을 통해 획득한 데이터를 함수식으로 표현하기 위하여 van Genuchten(1980) 모델식을 이용하여 매개변수 (fitting parameter)를 산정하였다(Table 2).

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

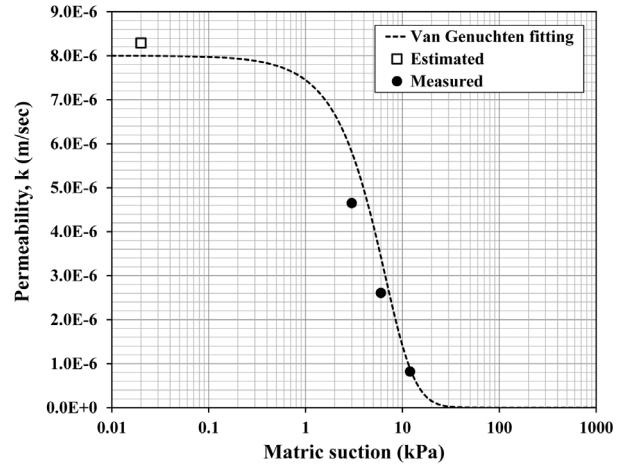


Fig. 4. Unsaturated permeability for the colluvial soils: experimental data and fitted curve

여기서, θ_r 은 잔류 체적함수비, θ_s 는 포화 체적함수비, s 는 모관흡수력이다.

모관흡수력에 따른 불포화 투수계수는 함수특성곡선과 연계하여 추정할 수 있으며(Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund et al., 1994), 본 연구에서는 van Genuchten(1980) 모델을 이용하여 불포화 투수계수를 산정하였다. 또한, Eq. (2)를 통해 산정한 불포화 투수계수를 검증하기 위하여 교란되지 않은 현장에서 지표 침투실험을 수행하였다. 그 결과, Fig. 4와 같이 Eq. (2)를 통해 추정된 불포화 투수계수는 지표침투실험 결과와 유사하게 나타났다.

$$k_u = k_s \frac{[1 - (\alpha s)^{nm} (1 + (\alpha s)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha s)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (2)$$

여기서, k_s 는 포화투수계수, s 는 모관흡수력, α , n , m 은 van Genuchten 매개변수이다.

2.2 현장 모관 흡수력 측정

불포화 지반의 침투 해석을 정확하게 수행하기 위해서는 비탈면 지반의 초기 모관흡수력 분포와 선형강우에 의한 모관흡수력 변화를 파악할 수 있어야 한다. 침투해석 시 초기 모관흡수력을 정의하는 방법에는 1) 지하수위를 입력하는 방법과, 2) 지반의 모관흡수력을 측정하여 값을 직접 입력하는 방법이 있다. 초기 모관흡수력은 함수특성곡선과 불포화 투수계수에 영향을 미치며, 습윤대 깊이를 산정하는데 큰 역할을 하기 때문에

정확한 값을 사용해야 한다. 따라서 본 절에서는 비탈면의 초기 모관흡수력을 측정하고 강우 발생 시 모관흡수력 변화를 관찰하기 위해 OO산에서 현장계측을 수행하였다. 먼저, 건조 상태의 초기 모관흡수력을 측정하고자 Fig. 5와 같이 장기간 강우가 기록되지 않은 2012년 6월 29일 오전에 계측을 시작하였으며, 강우가 시작된 6월 30일부터 7월 19일까지 계측을 수행하였다.

2.2.1 모관흡수력 측정

본 계측에서 사용한 장력계는 세라믹팁, 튜브, 게이지로 구성되어 있으며, 0~100kPa 범위에서 모관흡수력을 측정할 수 있다. 세라믹을 통하여 부의 간극수압을 측정하기 위해서는 흡과 적절히 접촉되는 것이 중요하기 때문에 튜브 보다 직경이 작은 장비를 사용하여 천공한 후 장력계를 설치하였다.

비탈면의 전체적인 모관흡수력을 측정하기 위해서는 설치할 수 있는 장력계가 한정되어 있기 때문에 Fig. 6

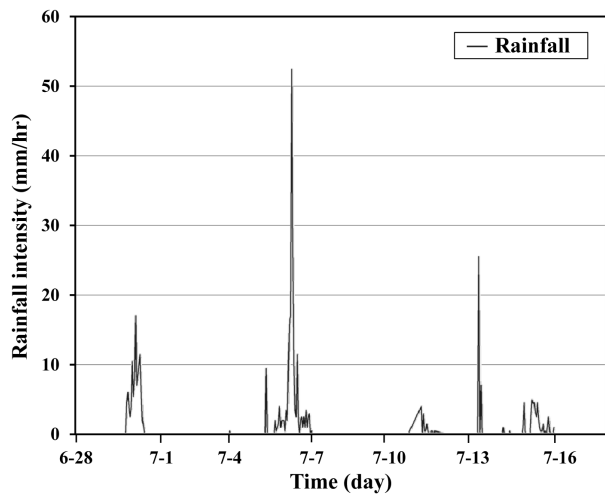


Fig. 5. Rainfall data obtained from raingauge station

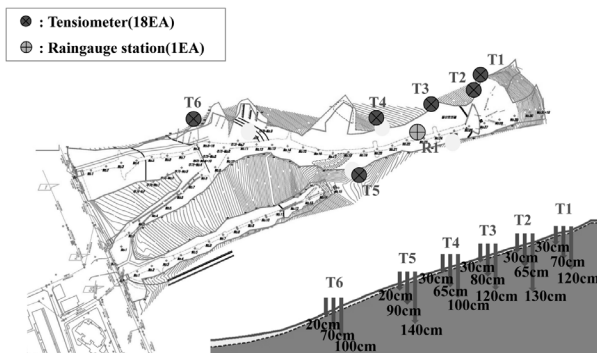
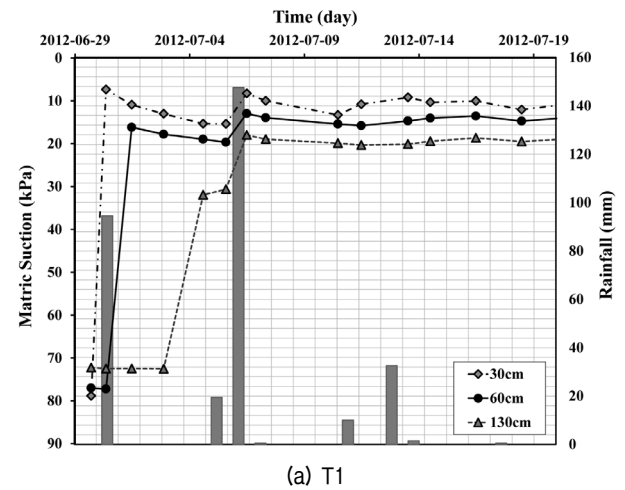


Fig. 6. Overall view of the natural slope and location of instrumentation

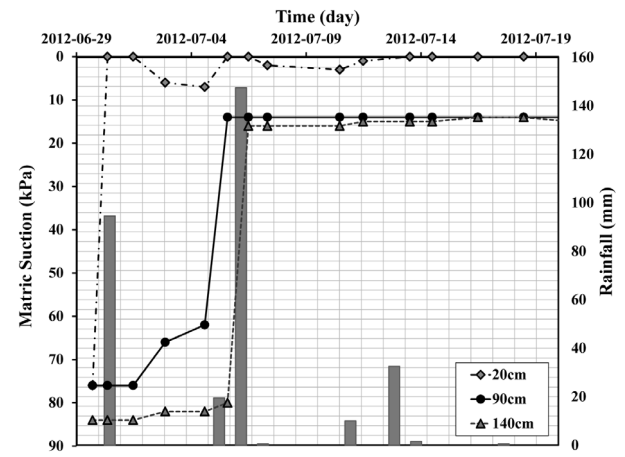
과 같이 한 유역에 대해 지류를 따라 종단방향(계곡부)으로 6개 지점에서 계측을 수행하였다. 설치위치에 따라 주변 환경적인 요인들을 최소화 하기 위하여 비탈면 상부에서부터 설치를 시작하였고, 각 지점의 장력계 간격이 500m를 넘지 않도록 하였다. 또한 지점마다 심도에 따른 모관흡수력을 측정하기 위하여 흡의 풍화가 진행될 수 있는 깊이(심도 20~30cm)에 장력계-A를 설치하였고, 예비침투해석을 수행하여 강우 시 발생할 수 있는 최대 습윤대 깊이(심도 105~140cm)를 산정하여 장력계-C를 설치하였으며, 그 중간에 장력계-B를 설치하였다.

2.2.2 계측 결과

Fig. 7은 대표적으로 T1과 T5에서의 계측결과를 나타낸 것이며, 2012년 6월 29일 초기 건조 상태의 모관흡수력은 모든 심도에서 약 75~85kPa 정도 값을 나타내고 있다. 그리고 강우가 시작된 6월 30일부터 강우에 의한



(a) T1



(b) T5

Fig. 7. Distribution of field matric suction with rainfall

지표 침투로 인하여 30cm에 설치된 장력계-A의 모관흡수력이 6kPa까지 빠르게 감소하였고, 시간이 지남에 나머지 장력계의 모관흡수력이 점점 감소하여 약 20kPa이하의 모관흡수력을 나타내었다. 장력계-C의 경우, 6월 30일에 발생된 강우에 모관흡수력이 거의 변하지 않은 것으로 나타났다. 이는 강우발생 이후(6월 30일) 지표로부터 침투된 물이 아직 장력계가 설치된 심도에 도달하지 않은 것으로 판단되며, 일정기간이 지난 후(7월 6일) 추가적인 강우 발생으로 인해 모관흡수력이 감소하였다.

3. 국내 강우특성을 고려한 산사태 해석

3.1 국내 강우특성과 산사태

국내의 강우는 하절기인 6월~9월에 집중적으로 발생되며, 비탈면 재해 기록으로부터 집중 호우가 주로 발생하는 이 기간 산사태가 집중되는 것으로 나타났다(윤찬영 등, 2010). 국내에서는 강우량에 따라 산사태를 예·경보하고 있으나(산림청, 2010), 강원도 지역의 비탈면 재해 기록을 보면, 약 60%의 재해가 산림청 산사태 주의보 기준에 못 미치는 것으로 나타났다. 윤찬영 등(2010)의 연구 결과에서는 비탈면 재해 발생이전 최대 시간강우량을 사용하여 산림청기준을 적용하는 경우에는 산사태 주의보에 미달하는 자료가 약 35% 줄어드는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 8의 사례에서와 같이 시간강우량이 20mm인 시점에 산사태 주의보가 발령되었으나, 43시간이 지난 시점에서 약 5mm의 매우 작은 강우량에서 산사태가 발생하는 경우도 있었다. 이는 비탈면

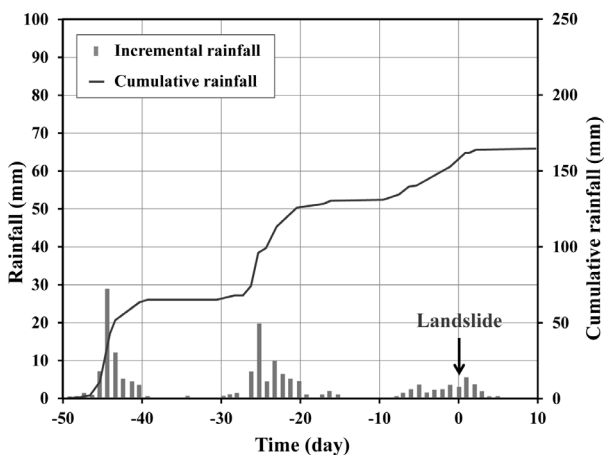


Fig. 8. The landslide case of Gosung-gun (Yune et al., 2010)

재해 발생 이전의 선행강우가 산사태 발생에 중요한 영향을 미친다는 것을 의미하며, 산사태 해석에서는 반드시 선행강우가 미치는 영향에 대한 정량적인 검토가 필요하다.

3.2 강우사상의 설계 적용(강우패턴의 영향)

산사태를 예측하고 설계하는 단계에서는 미래의 실시간 강우를 적용하기에는 불확실성이 매우 크기 때문에, 일반적으로 확률강우량도를 이용하여 산사태를 예측한다. 확률강우량도는 배수시설과 같은 수공구조물의 설계강우량 기준을 제시하기 위해 만들어 졌으며(MLIT, 2009), 최근 우리나라 확률강우량 기준이 개정되어(Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2012) 기존의 강우강도-지속시간-발생빈도 관계에서 지속시간(5분, 15분, 4320분)이 추가되었다(Fig. 9). 그러나, 지반공학적인 측면에서 산사태는 강우강도뿐 아니라 총 강우량에도 민감성이 크게 나타나므로, 확률강우량도를 산사태 해석에 적용하기 위해서는 최소한 지속시간과 발생빈도에 대한 설계기준이 수립되어야 하나 현재 국내외로 전무한 실정이다. 따라서, 본 절에서는 확률강우량도 사례 해석을 통하여 확률강우량도의 강우조건과 산사태 발생과의 관계를 분석하였다.

사례 해석은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 서울관측소의 확률강우량도를 사용하였다. 지속시간이 길어짐에 따라 강우강도는 감소하나, 총 강우량이 지속적으로 커지는 특성이 있으므로, 산사태 해석에서는 지속시간이 긴 조건을 사용하는 경우 안정성이 가장 불리하게 나타나게 된다. 그러나, 실제 현상에서는 총 강우량 이외에도 강

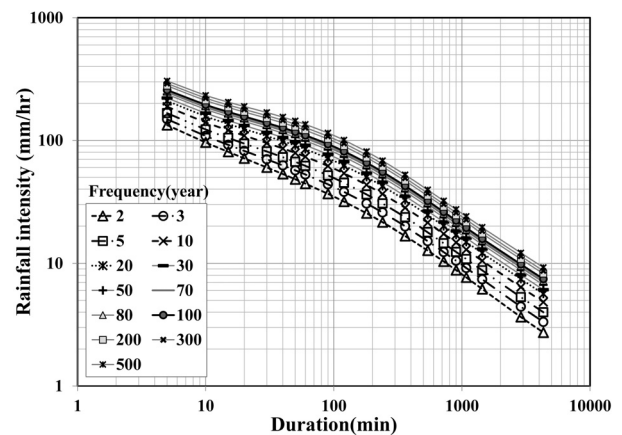


Fig. 9. IDF curve obtained from Seoul Weather Station (MLIT, 2013)

우 강도, 강우 패턴 및 선행 강우 등의 영향이 복합적으로 작용하여 산사태가 발생하게 된다. 따라서, 확률강우 강도로부터 이러한 여러 가지 강우문제와 산사태 발생에 대한 관계를 분석하기 위하여 먼저, 확률강우량도로부터 24시간 지속 총 강우량과 1시간 지속 최대 강우강도를 이용하여 Fig. 10과 같이 강우 패턴을 산정하였다. 패턴 I은 1시간 최대강우강도를 24시간 지속기간 중 가운데에 위치시켰으며, 패턴 II는 마지막에, 패턴 III은 처음에, 그리고 패턴 IV는 확률강우량도와 같이 동일한 강우강도를 24시간 지속기간 균일하게 적용하였다.

이와 같이 강우 패턴의 영향을 분석하기 위하여 상용 프로그램 GEO-SLOPE(2012)을 이용하여 무한사면의 침투 및 사면안정 해석을 수행하였다. 여기서, 강우조건은 Fig. 10을 적용하였으며, 강우조건 이외의 해석 및 경계조건은 Kim et al.(2004)과 동일하게 적용하였다. 그 결과, 강우량이 뒤로 집중되는 패턴 II의 경우 습윤대 깊이가 2.0m로 가장 깊게 나타났으며, 강우량이 앞으로 집중되는 패턴 III의 경우 습윤대 깊이가 가장 얇은 0.6m로 나타났다(Fig. 11). 비탈면의 안전율은 강우가 뒤로 집중되어 있는 패턴 II에서 0.97로 가장 낮게 나타났고, 강우강도가 일정한 패턴 IV는 1.13으로 두 번째 낮은 결과를 나타내었다. 각각의 패턴에 따라 강우가 집중되는 구간에서 전반적으로 최소안전율을 나타내고 있으나, 전후의 적은 강우량에서는 보다 큰 안전율을 보이거나(패턴 I, II), 안전율이 급격히 증가하는 경향(패턴 I, III)을 나타내었다(Fig. 12). 이와 같이 총 강우량과 최대 강우강도가 동일한 조건에서도 강우패턴에 의해 안전율의 변화가 크게 나타나므로, 기존의 확률강우량도를 명확한 기준 없이 그대로 산사태 예측에 적용하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 별도의 설계기준이 없는 현 상황을 감안하면 강우에 대한 여러 가지 민감도 분석을 충분히 수행하여 설계강우를 결정하고, 이를 바탕으로 산사태 예측을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

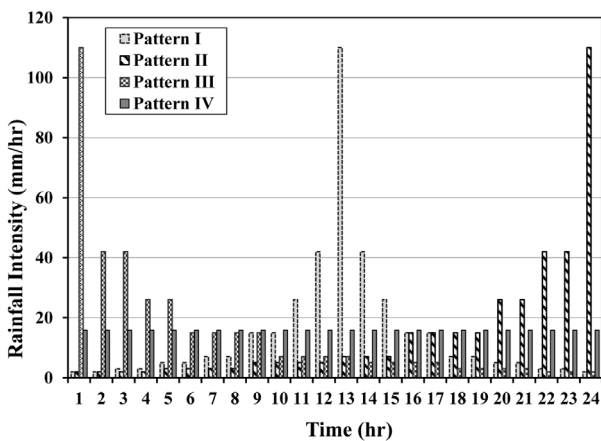


Fig. 10. Four cases of rainfall patterns based on IDF curve

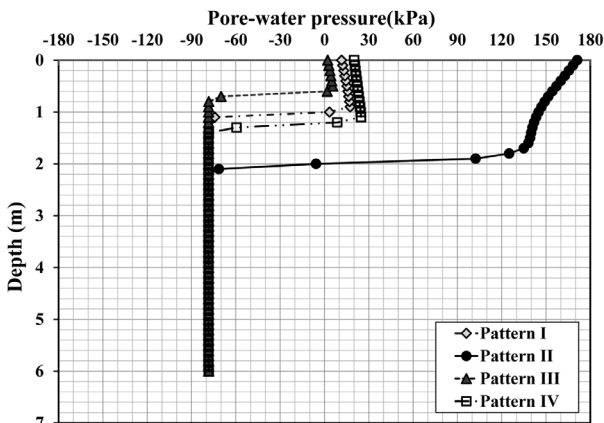


Fig. 11. Pore-water pressure along the soil depth with various rainfall patterns

중되는 패턴 III의 경우 습윤대 깊이가 가장 얇은 0.6m로 나타났다(Fig. 11). 비탈면의 안전율은 강우가 뒤로 집중되어 있는 패턴 II에서 0.97로 가장 낮게 나타났고, 강우강도가 일정한 패턴 IV는 1.13으로 두 번째 낮은 결과를 나타내었다. 각각의 패턴에 따라 강우가 집중되는 구간에서 전반적으로 최소안전율을 나타내고 있으나, 전후의 적은 강우량에서는 보다 큰 안전율을 보이거나(패턴 I, II), 안전율이 급격히 증가하는 경향(패턴 I, III)을 나타내었다(Fig. 12). 이와 같이 총 강우량과 최대 강우강도가 동일한 조건에서도 강우패턴에 의해 안전율의 변화가 크게 나타나므로, 기존의 확률강우량도를 명확한 기준 없이 그대로 산사태 예측에 적용하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 별도의 설계기준이 없는 현 상황을 감안하면 강우에 대한 여러 가지 민감도 분석을 충분히 수행하여 설계강우를 결정하고, 이를 바탕으로 산사태 예측을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

3.3 강우사상의 설계 적용(선행강우의 영향)

선행강우가 산사태에 미치는 영향은 통계적인 연구를 통하여 많이 알려져 있으나(Yune et al., 2010; Hwang, 2013), 설계에 적용하기 위해서는 해석적인 검증과 경계조건 및 매개변수에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 절에서는 Fig. 13과 같은 강우 사례를 이용하여 선행강우 영향에 대한 해석적인 분석을 수행하고, 설계단계에서 선행강우를 고려할 수 있는 경계조건 및 매개변수에 대한 연구를 수행하였다.

선행강우 효과를 고려하기 위하여 Table 3과 같이 선

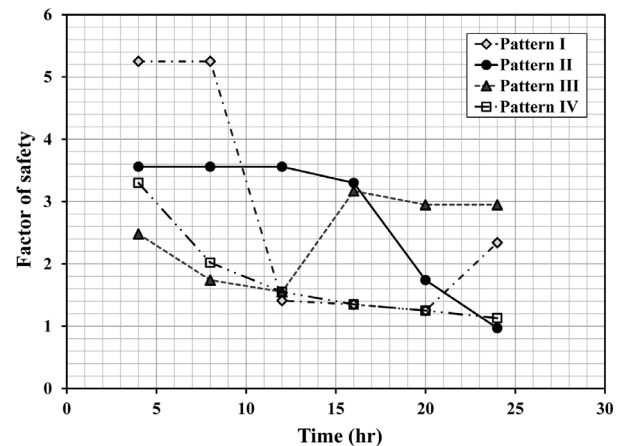


Fig. 12. Factor of Safety for various rainfall patterns

행 강우(I_A)의 유/무, 선행 강우 이후 산사태 유발 강우까지의 시간(T_g : 0~240시간), 산사태 유발 강우량(I : 10~30mm/hr)을 변수로 선정하여 침투해석을 수행하였다. 선행 강우가 있는 Case A와 선행강우가 없는 Case B의 결과를 비교하면, Fig. 14에서와 같이 선행 강우가 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 2배 이상의 습윤대 깊이가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 선행 강우의 유무와 관계없이 산사태 유발 강우량이 커짐에 따

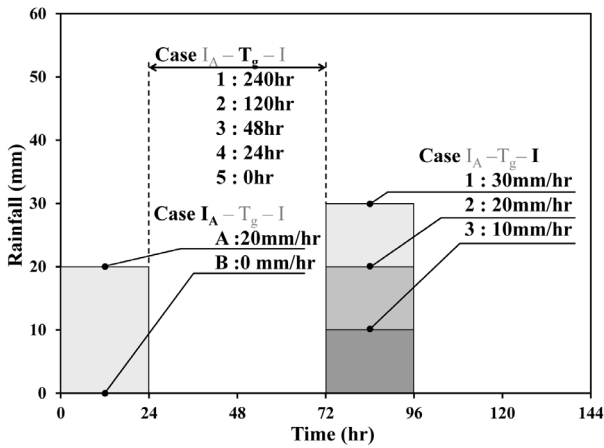


Fig. 13. Cases of rainfall pattern

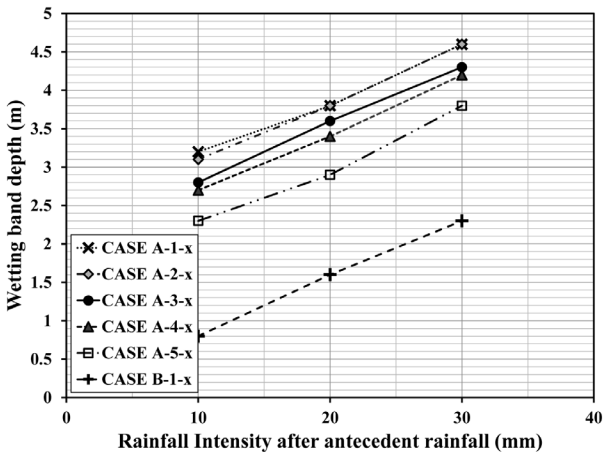


Fig. 14. Wetting band depth with various rainfall patterns

Table 3. Sequential analysis cases

Antecedent rainfall (I_A)	Time gap (T_g)	Rainfall intensity (I)
Existence (Case A)	0 hr	10 mm/hr
	24 hr	20 mm/hr
	180 hr	30 mm/hr
	240 hr	-
Not (Case B)	-	10 mm/hr
		20 mm/hr
		30 mm/hr

라 습윤대 깊이가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 선행 강우 이후 산사태 유발 강우까지의 시간과 습윤대 깊이 관계를 분석한 결과, Fig. 15에 나타난 바와 같이 선행 강우 이후 약 48시간이 경과하면 습윤대의 깊이가 거의 증가하지 않는 경향을 보였다. 이러한 결과는 선행 강우에 의해 흙의 체적함수비 증가와 모관흡수력이 감소함에 따라 습윤대가 깊게 발생하지만, 한번 감소한 모관흡수력은 강우가 없는 기간 동안 다시 회복하여 일정한 값으로 수렴하기 때문에(Fig. 7, Fig. 16) 일정 시간 이후에는 더 이상의 습윤대 깊이 증가가 없는 것으로 판단된다.

3.4 현장 모관흡수력 결과를 활용한 선행강우 영향 검증

본 연구에서는 선행강우 효과와 경계조건 및 매개변수에 대한 검증을 위하여 현장 모관흡수력 측정 결과와

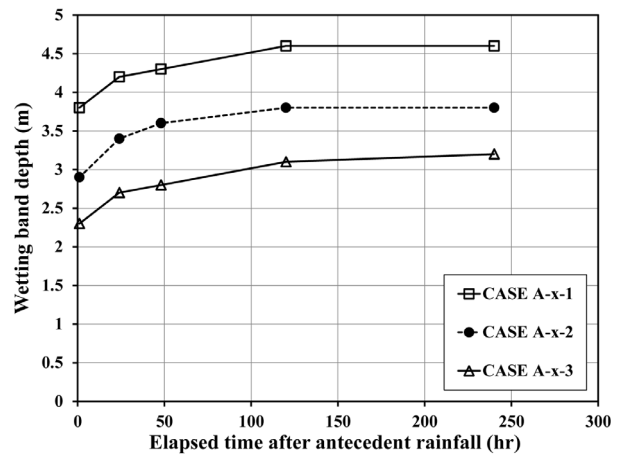


Fig. 15. Wetting band depth for elapsed time after antecedent rainfall

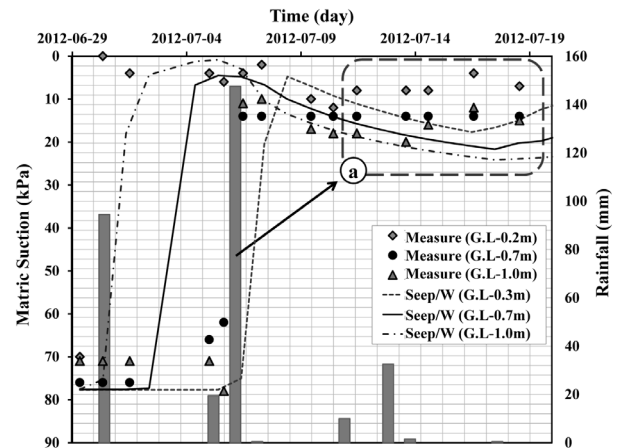


Fig. 16. Distribution of matric suction with varying rainfall

실제 강우데이터를 이용한 침투해석 결과를 비교 분석하였다. 현장 계측은 2.2절에 언급한 바와 같이 대상 지역, 계측 기간, 설치 방법 및 위치가 동일하며, 장력계 계측이 수행되는 구간에 자동 강우량 측정계를 설치하여 실시간 강우데이터를 수집하였다. 계측결과, 건기 시 모관흡수력은 평균적으로 75~85kPa으로 측정되었으며, 강우시 0kPa, 연속강우 종료 약 2일 경과 후 약 10~20kPa의 모관흡수력으로 수렴하는 것으로 나타났다. 이 기간 동안 측정된 강우데이터를 이용하여 침투해석을 수행하였으며, 계측된 모관흡수력 변화를 적절히 예측하는 것으로 나타났다(Fig. 16). 여기서, 6월 29일 강우 이후 모관흡수력이 10~20kPa로 수렴하다가 ㉠구간에서 다시 증가하는 것은 7월 5일 이후에 발생한 강우의

영향인 것으로 판단되며, 침투해석에서도 비슷한 경향을 보였다. 따라서, 산사태 해석 시 초기 경계 조건으로 흙의 초기 모관흡수력 또는 수치해석으로부터 산정된 모관흡수력을 적용할 수 있으며, 이 경우 Figs. 14-15의 결과로부터 산사태 해석에서 선행 강우 효과를 고려할 수 있는 것으로 분석되었다.

4. 현장 모관흡수력을 이용한 산사태 해석 방법 제안 및 적용

4.1 산사태 해석 방법 제안

침투 및 사면안정해석에서는 강우, 지반의 초기 간극

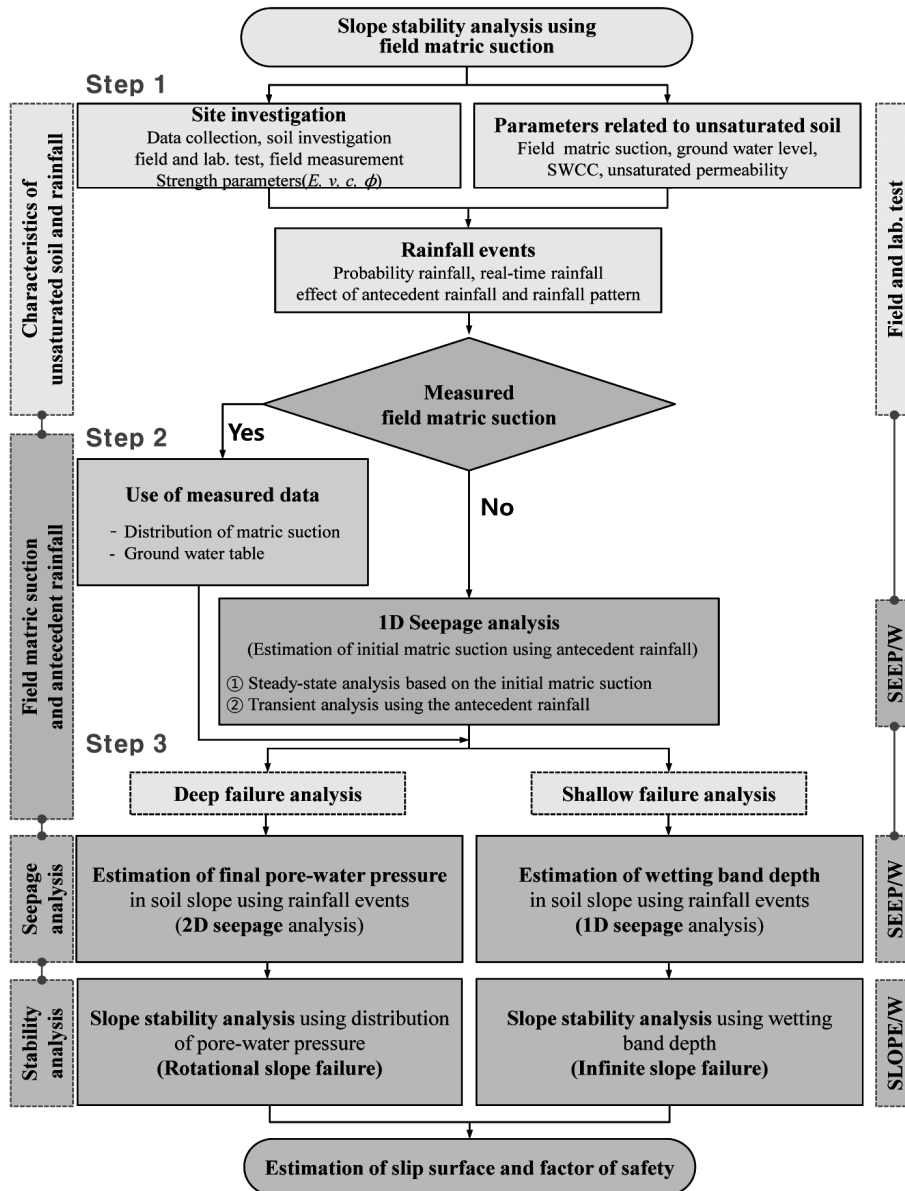


Fig. 17. Flow chart of integrated landslide analysis

수압, 지하수 등 다양한 경계조건이 복잡하게 얽혀 있어, 이를 명확하게 구분하여 적용하는 것이 어려운 문제이다. 즉, 지반의 초기간극수압과 지하수의 분포는 선행강우에 지배 받고, 침투는 초기간극수압에 영향을 받으며, 비탈면 안전율은 강우의 침투 결과에 큰 영향을 받는다. 특히, 초기 조건을 지배하는 요인은 선행강우이므로 이를 어떻게 고려하느냐에 따라 사면안정해석 결과가 달라진다. 침투해석에서 선행 강우의 영향은 현장계측을 통한 지반의 초기 모관흡수력으로 구현할 수 있으며, 현장계측 결과가 없는 경우 실시간 강우자료를 이용한 침투해석을 통해 초기 모관흡수력 분포를 산정할 수 있다.

본 절에서는 현장 모관흡수력과 선행강우를 고려한 산사태 해석방법을 3가지 단계로 제안하였으며, 흐름도(flow chart)는 Fig. 17에 도시하였다.

Step 1) 설계 지역의 지반조사를 통해 기본물성 및 불포화 특성을 산정한다. 그리고 선행강우를 고려할 수 있는 강우조건을 결정한다(3장 참조).

Step 2) 선행강우 효과를 고려한 초기 간극수압 분포를 산정하기 위하여 현장 모관흡수력 계측을 수행한다. 현장계측자료가 없는 경우, 1차원 침투모델(총 2단계)을 이용하여 습윤대 깊이를 결정하고(무한사면 파괴 해석), 1차원 침투모델(총 2단계)과 2차원 침투해석을 이용하여 간극수압분포를 결정한다(원호활동 파괴 해석).

Step 3-1) (원호활동파괴 해석) 비탈면의 초기 경계조건을 구현하기 위하여 설계 대상 비탈면을 모델링 한 후, 압력수두 경계조건을 이용하여 1차원 침투모델로부터 산정된 간극수압 분포를 적용한다. 그리고 산사태 유발강우를 적용한 침투해석을 수행하여 최종 간극수압 분포를 결정 한 후, 사면안정해석을 수행한다.

Step 3-2) (무한사면파괴 해석) 1차원 침투모델로부터 산정된 간극수압 분포를 초기 경계조건으로 설정하고 산사태 유발강우를 적용하여 습윤대 깊이를 산정한다. 이를 사면안정해석에 적용하기 위하여 설계 대상 비탈면을 모델링 한 후, 결정된 습윤대 깊이 내에서 얇은 파괴가 발생 하도록 사면안정해석을 수행한다.

4.2 제안된 산사태 해석 방법의 적용

본 절에서는 4.1절에서 제시한 산사태 해석방법의 적용성과 그 과정을 이해하기 위하여 OO산 산사태 사례

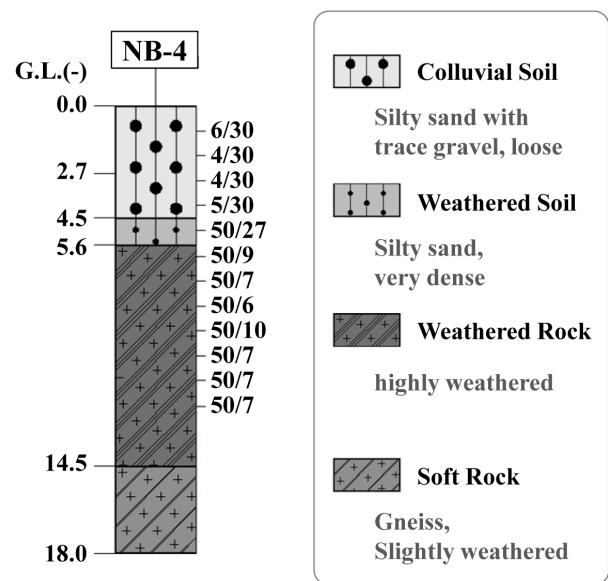


Fig. 18. Soil profile for the selected slope

를 통해 연계해석(GEO-SLOPE, 2012)을 수행하였다. 먼저 제 1단계인 현장 및 실내실험을 수행하였다. 대상 지역은 Fig. 18과 같이 붕적층 아래로 풍화토, 풍화암, 연암이 존재하는 것으로 나타났으며, 산사태는 대부분 붕적층에서 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 약 2.8~6.9m 심도의 붕적층만 모델링 하였으며, 기본적인 물성은 현장 및 실내 실험으로부터 산정된 값을 사용하였다(Fig. 2, Table 1). 그리고 해석에 필요한 지반의 초기 모관흡수력을 파악하기 위하여 현장 모관흡수력 계측 하였으며(2.2절 참조), 건조상태의 모관흡수력이 약 75~85kPa 정도의 범위를 보였기 때문에 침투해석에서는 초기 모관흡수력을 80kPa을 적용하였다. 또한 침투해석에 사용되는 함수특성곡선과 불포화 투수계수는 2장의 Figs. 3-4, Table 2에 나타낸 값을 사용하였다.

4.2.1 간극수압 분포를 반영한 원호활동파괴 해석

선행강우를 고려한 원호활동 파괴 해석을 위하여, 1차원 침투모델을 이용하여 모관흡수력 분포를 산정하였다.

- (1) Fig. 19(a)와 같이 지반을 기둥(column)형태로 모델링 한 후, 압력수두(pressure head) 경계조건을 이용하여 건조상태의 초기 모관흡수력(80kPa)을 적용하고, 강우조건 없이 정상상태 침투해석(steady-state seepage)을 먼저 수행하였다.
- (2) 그 다음 선행강우 영향을 고려하기 위하여 전 단계

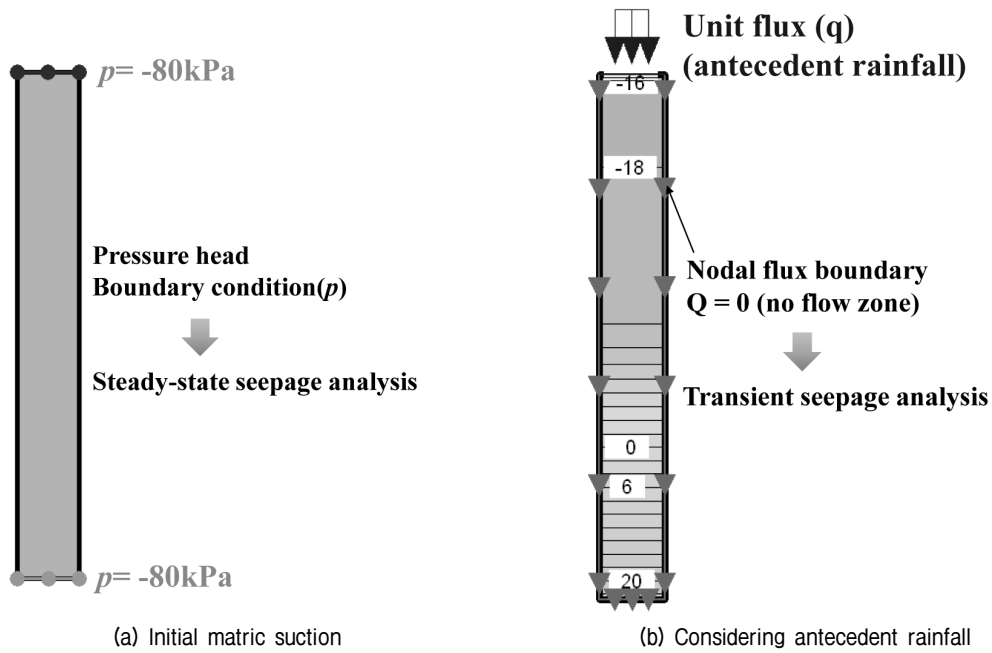


Fig. 19. One-dimensional seepage model

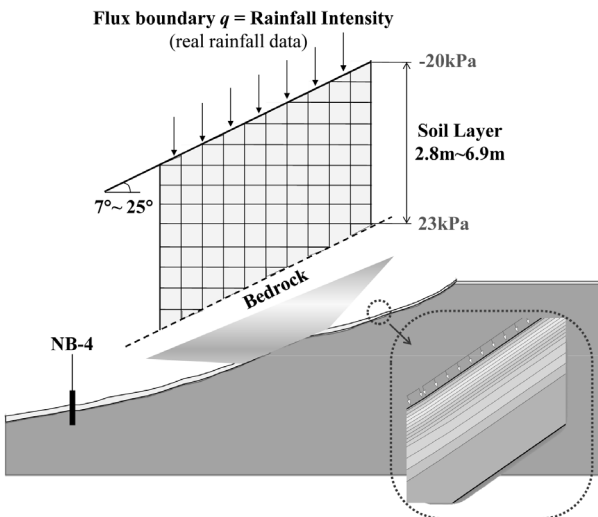


Fig. 20. Soil slope mesh used for two-dimensional seepage analysis, boundary conditions and results of pore-water pressure distribution

에서 해석된 결과를 비정상상태 침투해석(transient seepage)의 초기값으로 입력한 후, 지표면에 unit flux(q) 경계조건을 이용하여 한달 동안의 실시간 강우를 적용하였다. 이때, 좌우측 경계조건은 nodal flux(Q)를 적용하여 흐름이 없는 상태(no flow zone, Q=0)로 설정하였다(Fig. 19b). 그 결과, 지반 상부의 모관 흡수력은 약 20kPa로 나타났으며, 하부에서는 23kPa의 양의 간극수압이 산정되었다.

(3) 이렇게 산정된 간극수압 분포는 선행강우에 의한

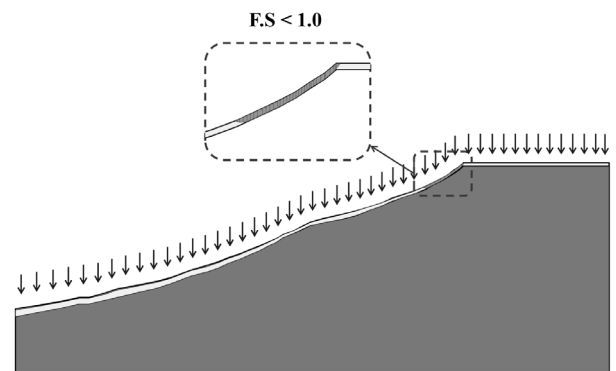


Fig. 21. Results of slope stability analysis considering antecedent rainfall

비탈면 초기 상태로 간주하여 Fig. 20과 같이 비탈면을 모델링 한 후 압력수두를 이용하여 초기 간극수압 상태를 구현하였다. 그리고 산사태가 발생한 4일전의 실시간 강우를 비탈면 상부에 unit flux(q) 경계조건으로 입력하여 비탈면 전체의 간극수압 분포를 산정하였다.

(4) 원호활동에 의한 사면안정해석을 위하여 침투해석에서 사용된 유한요소망(mesh)과 계산된 간극수압 분포를 SLOPE/W에 그대로 연동시켜 비탈면의 안전율을 산정하였다. 그 결과 Fig. 21과 같이 비탈면 상부에서 안전율이 1.0 보다 작은 값을 보였으며, 실제 최초 산사태 발생 위치와 동일한 것으로 나타났다.

4.2.2 습윤대에 의한 무한사면파괴 해석

비탈면 설계 시 해석 단면이 많은 경우나 무한사면 파괴를 검토하는 경우에는 4.1절과 같이 전체 비탈면의 간극수압을 계산하여 안전율을 산정하는 것이 복잡하고 많은 시간이 소요되기 때문에 1차원 침투 모델을 이용하여 습윤대 깊이를 산정하고 이를 사면안정 해석에 적용하는 것이 보다 효과적이다.

- (1) 선행강우를 고려한 초기 모관흡수력을 고려하는 과정은 4.2.1절에서 언급한 과정과 동일하며(Fig. 19), Fig. 19(b)의 해석결과를 다시 초기조건으로 설정하여 산사태가 발생하기 4일전의 강우자료를 통해 산사태 발생 당시의 습윤대 깊이를 산정하였다(Fig. 22).
- (2) 이렇게 산정된 최종 습윤대 깊이를 사면안정해석에 적용하기 위하여 습윤대 깊이 내에서 파괴가 발생하도록 설정 한 후 사면안정해석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 23과 같이 비탈면 상부에서 1.0 이하의 안전율이 나타났으며, 실제 파괴 위치와 유사한 것

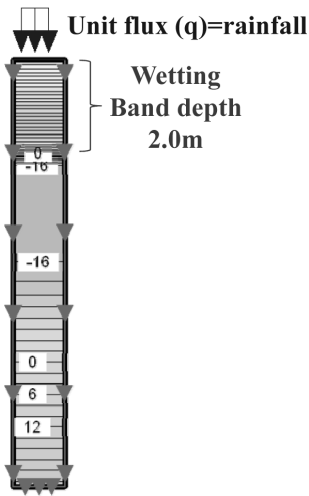


Fig. 22. One-dimensional seepage analysis for wetting band depth

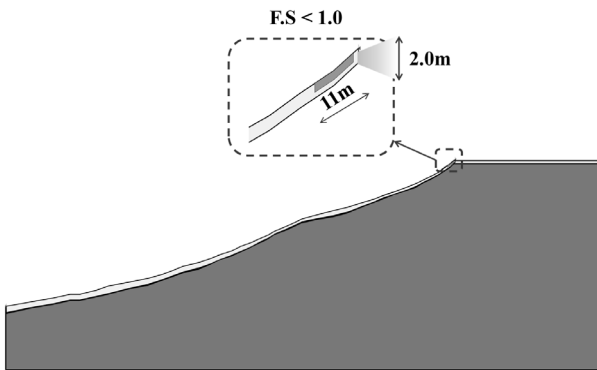


Fig. 23. Results of slope stability analysis using wetting band depth

으로 나타났다. 여기서, 지반조건이 유사하고 강우 조건이 동일한 비탈면을 설계할 경우, 1차원 침투 해석을 추가적으로 수행하지 않아도 계산된 습윤대 깊이를 직접적으로 사면안정해석에 적용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현장 모관흡수력과 선행강우 효과를 고려할 수 있는 산사태 해석 방법을 제안하였으며, 지반의 불포화 특성을 산정하고 침투 및 사면안정해석에 적용할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 확률강우량도를 바탕으로 한 강우패턴과 선행강우에 따른 습윤대 깊이 및 안전율 변화에 대해 분석을 수행하였으며, 사례 해석을 통해 제안된 방법의 적용성을 검토하였다. 본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 제시한 산사태 해석 방법은 현장 모관흡수력 측정값과 강우침투현상을 고려할 수 있는 방법으로써, 1차원 침투모델을 통해 지반의 불포화 특성과 선행강우 효과를 고려할 수 있다. 그리고, 산사태가 발생한 지역을 대상으로 제안된 해석 방법을 적용한 결과, 무한사면파괴 및 원호활동파괴 해석 모두에서 실제 조사된 산사태 발생위치를 적절히 예측하는 것으로 나타났다.
- (2) 산지 비탈면을 대상으로 강우 발생에 따른 모관흡수력을 측정한 결과, 건조한 상태의 모관흡수력은 75~85kPa로 나타났으며, 강우 발생 이후 모관흡수력은 20kPa 이하로 수렴하는 것으로 나타났다. 이러한 계측 결과는 강우 침투속도와 비탈면의 초기 모관흡수력 분포를 결정짓는 중요한 요소이기 때문에 산사태를 정확히 예측하기 위해서는 현장 계측결과를 반영하는 것이 바람직하다.
- (3) 비탈면 설계 시, 확률강우량도를 이용하여 일정한 강우강도를 적용하는 것 보다 시간에 따라 집중 강우가 뒤쪽에 위치할 때 습윤대가 깊게 형성되고 안전율이 가장 낮게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 총 강우량과 최대 강우량이 동일한 조건에서도 강우패턴에 따라 안전율의 변화가 크게 나타나므로 산사태 해석 시, 확률강우량도에 대한 정확한 기준을 수립하여 사용하거나 여러 민감도 분석을 충분히 수행하여 설계강우를 결정해야 한다.
- (4) 선행강우를 고려한 연계해석을 통해 습윤대 깊이를

정량적으로 분석한 결과, 선행강우(I_A)와 산사태 유발 강우(I)와의 시간차이(T_y)가 증가함에 따라 습윤대 깊이는 일정한 심도로 수렴하는 것으로 나타났으며, 선행강우 고려 유무에 따라 약 2배이상 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 선행강우에 의한 모관흡수력 감소가 비탈면의 불안정성을 증가시키고, 이후 발생된 강우로 인하여 습윤대 깊이가 증가하여 비탈면이 파괴되는 것이다. 따라서 산사태 해석 시 선행강우를 고려한 해석이 반드시 수행되어야 한다.

- (5) 이와 같이 강우에 의해 유발되는 산사태는 확률강우량도에 제시된 강우강도와 지속시간 이외에도 강우 패턴과 선행 강우 등에 많은 영향을 받으므로 기존 확률강우량도의 정규화된 강우를 이용한 산사태 예측은 한계가 있다. 또한, 최근 개정된 비탈면 설계 기준에서는 강우를 고려한 침투해석을 권고하고 있음에도 불구하고 적용할 수 있는 강우 기준이 없어 확률강우량도에 의존할 수 밖에 없는 실정이다. 따라서, 강우패턴, 선행강우 등의 산사태 유발인자가 고려된 강우 설계기준의 수립이 절실히 필요하다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030842)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2009), River design criteria.
2. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2012), Korea Precipitation Frequency Data Server, www.k-idf.re.kr.
3. National Disaster Management Institute (2008), A study on the steep slope information compilation and development of an analysis system, 1st report: the application of an early warning system using rainfall data in Korea.
4. Korea Forest Service (2010), Countermeasure for forest disaster in the summer season, *Korea Forest Service Report*, pp.21.
5. ASTM D5298-10, "Standard test method for measurement of soil potential using filter paper".
6. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic properties of porous media", *Colorado State Univ. Hydrol. Paper*, No.3, pp.27.
7. Chatterjea, K. (1989), "Observation on the fluvial and slope processes in Singapore and their impact on the urban environment" *PhD*

Thesis. National Univ. of Singapore, Singapore.

8. Cho, S.E. and Lee, S.R. (2000), "Slope stability analysis of unsaturated soil slopes due to rainfall infiltration" *Journal of Korean Geotechnical Society*. Vol.16, No.1, pp.51-64.
9. Cho, S.E. and Lee, S.R. (2001), "Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration", *Computers and Geotechnics*, Vol.28, No. 3, pp.185-208.
10. Fourie, A.B., Rowe, D., and Blight, G.E. (1999), "The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump" *Geotechnique*, Vol.49, No.1, pp.1-13.
11. Fredlund, D.G., Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 533-546.
12. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.521-532.
13. Geo-slope International (2012), *Seep/w for finite element seepage analysis*, user's guide, Calgary, Alta., Canada.
14. Hwang, H.G., Cho, K.M., Lee, S.W., Kim, K.H., and Yune, C.Y. (2013), "Site Investigation on 2012 Slope Hazard in Korea and its Triggering Factors", 2013 KGS Spring National Conference, pp. 117-120.
15. Lee, K.W., Kim, Y.M., Kim, J.H., and Jeong, S.S. (2012), "Distribution of matric suction for unsaturated soils based on filed measurement and soil-water characteristic curve test", 2012 *KGS Fall National Conference*, pp.587-529.
16. Lee, S.R., Oh, T.K., Kim, Y.K., and Kim, H.C. (2009), "Influence of Rainfall Intensity and Saturated Permeability on Slope Stability during Rainfall Infiltration", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.1, pp.65-76.
17. LEE, S.J. (2004), *Estimation of Unsaturated Shear Strength and Soil Water Characteristic Curve for Weathered Granite Soil*, *PhD Thesis. Korea Advanced Institute of Science and Technology.*
18. Iverson, R.M. and Denlinger, R.P. (2001), "Flow of variably fluidized granular masses across three dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory", *Journal of Geophysical Research*, Vol.106(B1), pp.537-552.1
19. Jeong, S.S., Kim, J.H., and Lee, K.H. (2008), "Effect of clay content on well-graded snads due to infiltration", *Engineering Geology*, Vol.102, pp.74-81.
20. Jeong, S.S., Cho, J.Y., and Lee, J.H. (2009), "Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.1, pp.1-9.
21. Kim, J. H. (2010), *Plasticity modeling and coupled finite element analysis for partially-saturated soils*. Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder, US.
22. Kim, J.H., Jeong, S.S., and Regueiro, R.A. (2012), "Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern", *Engineering Geology*, Vol.147-148, pp.28-36.
23. Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W., and Sharma, J. (2004), "Influence of rainfall-induced wetting on the stability ok slopes in weathered soils", *Engineering Geology*, pp.251-262.
24. Soilworks (2013), *Theoretical user's manual*. MIDAS IT.
25. Marchi, L., Arattano, M., and Deganutti, A.M. (2002), "Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps)," *Geomorphology*, Vol.46, pp.1-17.

26. Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998), "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage", *Computers and Geotechnics* Vol.22, No.1, pp.1-28.
27. Pham, H.Q. and Fredlund, D.G. (2004), "New apparatus for the measurement of the soil-water characteristic curves", *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference*, Quebec, Quebec City, Canada
28. Rahardjo, H., Li, X.E., Toll, D.G., and Leong, E.C. (2001), "The effect of antecedent rainfall on slope stability", *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol.19, pp.371-399.
29. Tan, S.B., Tan, S.L., Lim, T.L., and Yang, K.S. (1987), "Landslide problems and their control in Singapore." *Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference*. vol.1 Bangkok, Thailand, pp.25-36.
30. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Can. Geotech. J.*, Vol.33, pp.379-392.
31. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
32. Wei, J., Heng, Y.S., Chow, W.C., and Chong, M.K. (1991), "Landslide at Bukit Batok sports complex", *Proceedings of the 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. vol. 1. Balkema: Rotterdam; Bangkok, Thailand. pp.445-448.
33. Yune, C.Y., Kim, K.S., Lee, S.W., Jun, K.J., and Kim, G.H. (2010), "Analysis of Slope Hazard-Triggering Rainfall Characteristics in Gangwon Province by Database Construction", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.10, pp.27-39.

Received : May 15th, 2013

Revised : November 11th, 2013

Accepted : December 12th, 2013