

# 산사태해석을 위한 GIS기반의 강우침투-지하수흐름 예측 기법 제안

## Predicting Rainfall Infiltration-Groundwater Flow Based on GIS for a Landslide Analysis

김 정 환<sup>1</sup> Kim, Jung-Hwan  
 정 상 섬<sup>2</sup> Jeong, Sang-Seom  
 배 덕 효<sup>3</sup> Bae, Deg-Hyo

### Abstract

This paper describes a GIS-based geohydrologic methodology, called YSGWF (YonSei GroundWater Flow) for predicting the rainfall infiltration-groundwater flow of slopes. This physical-based model was developed by the combination of modified Green-Ampt model that considers the unsaturated soil parameters and GIS-based raster model using Darcy's law that reflects the groundwater flow. In the model, raster data are used to simulate the three dimensional inclination of bedrock surface as actual topographic data, and the groundwater flow is governed by the slope. Also, soil profile is ideally subdivided into three zones, i.e., the wetting band zone, partially saturated zone, and fully saturated zone. In the wetting band and partially saturated zones the vertical infiltration of water (rainfall) from surface into ground is modeled. When the infiltrated water recharges into the fully saturated zone, the horizontal flow of groundwater is introduced. A comparison between the numerical calculation and real landslide data shows a reasonable agreement, which indicate that the model can be used to simulate real rainfall infiltration-groundwater flow.

### 요 지

본 연구에서는 산사태 해석을 위한 GIS기반의 지반수문학적인 강우침투-지하수 흐름 모델(YSGWF, YonSei GroundWater Flow)을 개발하였다. 이 모델은 흙의 불포화 특성을 반영하기 위하여 개선된 Green-Ampt 모델을 적용하였으며, 지하수의 흐름을 계산하기 위하여 Darcy의 법칙과 GIS의 래스트 모델을 사용하였다. GIS 수치표고모델을 그리드 형태의 래스트 모델(Raster Model)로 변환하여 기반암 데이터를 모델링 하였으며, 경사와 흐름 방향을 분석하여 지하수 흐름 해석이 가능하도록 하였다. 지하수의 분포는 지표면으로 부터 강우 침투에 의해 일시적으로 형성되는 습윤대, 함양되기 전까지의 불포화대, 기반암 상부의 지하수대로 구분하였으며, 지하수대 상부의 연직방향 침투와 지하수대에서의 수평방향 흐름을 고려하여 3차원적인 지하수 흐름을 계산하도록 하였다. 실제 사례와 비교한 결과, 본 지하수 예측 모델(YSGWF)에 의한 산사태 해석 결과는 산사태 발생지역을 비교적 정확히 예측하는 것으로 판단되며, 이러한 검증 을 토대로 실제 산지에 대한 산사태 해석을 위한 지하수 예측에 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Rainfall-infiltration, Groundwater flow, Landslide analysis, based on GIS, Green-Ampt model, Rainfall-runoff

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)  
 2 정희원, 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, 교신저자)  
 3 비희원, 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Sejong Univ.)  
 \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 기후변화에 의한 강우량 증가로 강우에 의한 산사태 발생이 전 세계적으로 증가하고 있다(Hong et al., 2006; Kirschbaum et al., 2009; Kim et al., 2012). 산사태는 산지 사면의 파괴뿐 아니라, 가옥, 도로 파괴와 인명 및 재산 피해 등 2차, 3차 재해를 발생시키므로, 인간의 삶과 질을 다루는 중요한 문제이며, 이를 평가하는 것은 사회기반시설을 계획하고 관리하는데 있어서 중요한 문제이다(Liao et al., 2011; Kim et al., 2012). 산사태의 발생은 넓은 범위에서 동시 다발적으로 발생하며, 지반, 지형, 식생, 강우 등 다양한 요인들이 복잡하게 연관되어 있으므로, 여러 가지 인자들을 고려한 광역적 평가에 의한 산사태 위험관리가 필요하다.

강우에 의한 산사태는 침투에 의해 습윤대가 임계 깊이에 도달하여 발생하는 경우와, 지하수 상승에 의한 유효응력 감소로 발생하는 경우로 구분할 수 있다(Kim, 1994; Jeong, 2009). 강우에 의한 산사태 문제에서 흙의 불포화 특성을 고려하는 것은 산사태 해석 결과를 결정하는데 매우 중요하며(Jeong, 2009), 강우의 침투-유출의 수문모형 적용에서 정확한 침투량 산정을 위해서는 흙의 불포화 특성이 반드시 고려되어야 한다.

산사태 해석에서 파괴유형의 결정과 강우 침투 및 지하수위의 합리적인 결정은 중요한 요소 중의 하나이다. 복잡한 산지 지형에 내리는 강우에 대해 지반은 공간적으로 서로 다른 함수 상태를 가지며, 강우의 침투와 지하수 흐름을 시뮬레이션 할 수 있는 물리적 기반의 산사태 모형의 사용이 강우에 의한 산사태를 예측하는 데 핵심이 된다. 물리적 기반의 산사태 모형은 지형학적 요소, 기상학적 요소, 수문학적 요소 및 지반공학적 요소를 결합하여 물리모형을 구성하고, 수치표고모형, 지반 정보, 강우 정보 등을 입력하여 산사태를 예측하는 방법이다.(Zonghu et al., 2011; Kim et al., 2012) 최근 지형, 지반, 수문학적 매개변수를 사용하여 산사태 위험도를 평가하는 물리학적 기반의 산사태 모형들이 개발되고 있다(Montgomery and Dietrich, 1994; Wu and Sidle, 1995; Tarboton, 1997; Pack et al., 1998, Iverson, 2000; Baum et al., 2008).

물리적 기반의 산사태해석 모형들은 대부분 사면 파괴 이론과 수문 모형을 결합한 형태를 갖추고 있다. SINMAP (Stability INdex MAPping), TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid- based Regional Slope-stability analysis),

SHALSTAB(Shallow Landsliding STABILITY model) 등의 모형이 있으며, 모두 무한사면 파괴 모델과 수문모형의 결합으로 이루어졌다는 유사점이 있으나, 입력 변수와 수문 모델에서 차이점을 가진다. SINMAP과 SHALSTAB은 지하수의 흐름은 사면의 경사를 따른다는 기본 가정과 TOPMODEL의 상부 지형의 지하수 기여면적 개념(Beven et al., 1979, 1995)을 일부 차용하여 수문 모형을 이루고 있다(Pack et al., 1998). 이들 수문모형에서는 지하수의 흐름을 고려하지 않은 정상상태의 유출만을 고려하고 있다(Montgomery and Dietrich, 1994). 입력변수로는 정상상태 강우강도와 투수량계수가 있다. TRIGRS는 Iverson (2000)의 침투모형을 이용하여 간극수압을 산정하여 안전성 지수를 산정하는데 이용하였다(Baum et al., 2008). 입력변수로는 포화투수계수, 수리학적 확산계수, 강우 강도와 강우지속시간이 있다. SINMAP과 SHALSTAB은 강우에 의한 지하수 상승에 대한 사면파괴를 고려하였으며, TRIGRS는 강우 침투시 일시적으로 형성되는 지하수위인 습윤대에서의 사면 파괴를 고려하고 있다. 그러나, 산지에서의 지하수는 기반암 상부의 원지하수위와 강우시 일시적으로 형성되는 일시지하수위인 습윤대가 동시에 존재하며, 지하수의 분포는 시간에 따라 계속하여 변화된다.

본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 지하수의 분포를 예측할 수 있는 지하수 예측기법을 개발하고자 하였다. 강우침투에서 흙의 불포화 특성을 반영하기 위하여 개선된 Green-Ampt 모델을 적용하였으며, 지하수의 흐름을 계산하기 위하여 Darcy의 법칙과 GIS(Geographic Information System)의 래스트 모델(Soller et al., 1999)을 사용하였다. 개발된 수문 모델을 무한사면 파괴모델과 결합하여 산사태 예측 기법인 YS-Slope(Kim et al., 2012)을 개선하였다. 제안된 해석기법의 검증을 위하여 기존의 산사태 해석기법과 산사태 발생 조사 자료를 통한 비교·분석을 수행하였다.

## 2. GIS기반의 강우침투-지하수 흐름 예측 기법

### 2.1 강우에 의한 산사태

강우에 의한 불포화 토사 사면의 파괴는 대표적으로 2가지 형태의 메커니즘이 많이 사용되어진다. 첫 번째 경우는, 강우로 침투된 물이 지하수에 함양(recharge)되어 지하수가 상승하게 되고, 지하수 상승은 사면내 간극

수압을 증가시켜 사면이 파괴되게 된다. 두 번째는, 강우로 인해 침투된 물이 원지하수위까지 하강하지 못하는 경우이다. 이 때 일시적으로 지하수위(perched water table)가 형성되는데 이를 습윤대(wetting front band)라고도 하며, 원지하수위(main water table)와는 구별 된다(Kim, 1994). 강우로 인해 습윤대가 형성되면 사면내 간극수압이 증가하게 되고, 습윤대 부근에서 사면이 파괴된다(Jeong, 2004; 2009).

각 산사태 해석 모형에서 사용하고 있는 수문모형이 모두 조금씩 다르기는 하지만, 이들 수문모형에는 공통점이 있다. Fig. 1에서와 같이 지하수에는 불투수층 사이에 구속되어 있는 피압대수층과, 기반암 등 불투수층 위에 있는 대수층으로 크게 구분 된다(Topper et al., 2003). 그리고, 점토층 등에 의해 지하수위 상부에 부분적으로 형성되는 지하수가 있는데, 조사를 통해 그 규모나 범위를 파악하기 힘들고 연속적인 해석에서는 고려하기가 힘든 부분이 있기 때문에, 이 지하수는 일반적으로 안정 해석에서 다루지 않는다. 산사태 또는 일반 사면안정해석에서 고려하는 지하수는 보통 대수층으로 계절에 따라 변화하는 특징을 가진다. 특히 국내의 경우 여름철에 강수량의 대부분이 집중되는데, 우기 시 대수층은 지하수가 거의 지표면까지 올라오기도 하고 건기 시에는 기반암 상부에 지하수가 없는 경우도 있다. 이러한 변화는 보통 강우에 의한 침투와 중력에 의한 지하수 흐름에 의해 결정된다. 강우에 의해 침투된 물이 지하수위까지 도달하여 충전되면 수위가 상승하게 되고, 상승

된 지하수는 중력과 기반면의 경사에 의해 결정되는 에너지에 의해 흐름이 발생한다. TRIGRS, SHALSTAB와 SINMAP모형은 모두 대수층에 한정하여 지하수를 고려하고 있다. 그러나 앞서 설명한 바와 같이 각 모형들은 강우침투, 지하수 변화에 대해서는 서로 다른 수문모형을 이용하고 있으며, 이것은 토층의 두께, 흙의 투수 특성, 불포화 특성, 강우 강도 및 지속 시간 등에 따라 복잡하게 변화하는 지하수의 특성 때문이다.

## 2.2 수문기상 모델

수문기상 모델은 수문학과 기상학 사이의 경계이고, 강우가 지하수로 충전되는 것으로 정의되며, 강우, 온도와 같은 기상학적인 요소에 기초하고 한다(Sangrey, 1984). 기본적으로 함양량( $R$ )은 강우량( $P$ )으로부터 유출량( $Q_R$ )과 증발산량( $E$ )을 제하여 구할 수 있다. 이외에도 함양량은 저류량( $S_f$ )과 합성요소( $S_y$ )에도 영향을 받으며, 정리하면 식 (1)이 표현할 수 있다.

$$R = P - Q_R - E \pm S_f \pm S_y \quad (1)$$

저류량( $S_f$ )은 온도와 관련하여 겨울에 눈이 쌓였다가 봄에 녹는 물과 지하수에 도달하지 않은 물 등과 관련이 있으며, 합성요소( $S_y$ )는 비정상적인 관개나 펌핑 등과 관련된 요소이다. 본 연구는 산사태 해석을 위한 지하수 예측을 다루고 있으며, 산사태가 우기시 연속적인

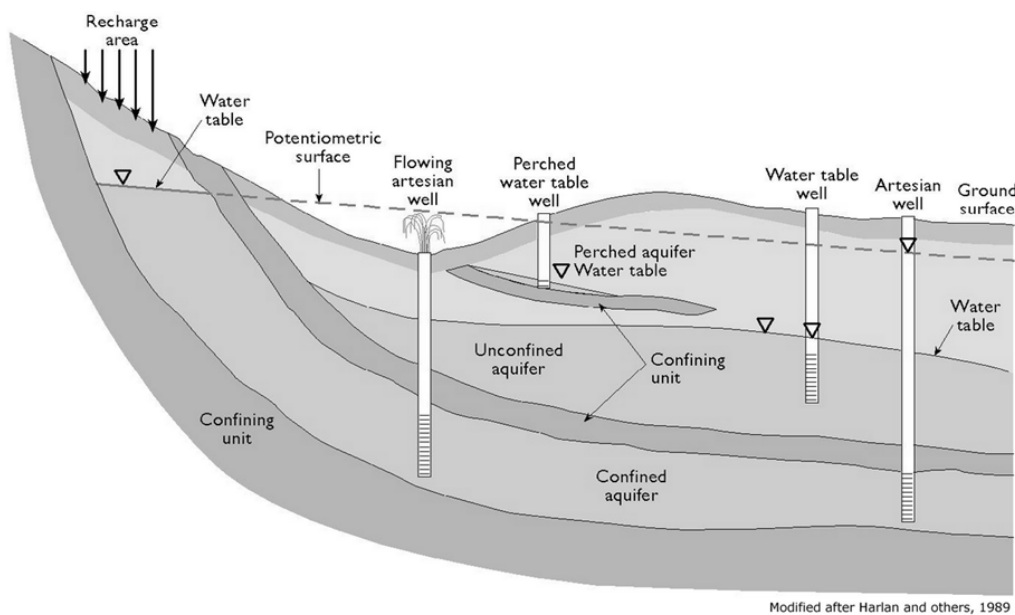


Fig. 1. Schematic cross section of aquifer types (Topper et al., 2003)

강우에 주로 발생하는 점을 감안하여,  $E$ 와  $S_y$ 를 고려하지 않았다.  $S_y$ 는 강우가 지표로 침투되어 함양될 때까지의 시간과, 흙이 완전 포화되기 전 불포화 상태에서 침투된 강우가 흙속에 저류되는 시간에 대하여 제한적으로 고려하였다.  $E$  및  $S_y$ 를 고려하지 않는 것은 본 연구와 같이 산사태 해석을 위해서는 유효할 수 있으나, 다른 기상수문학적 문제에서는 중대한 오차를 야기할 수도 있다.

강우의 지하수 함양에 대해 Goldschmidt(1960)는  $Q_R$ 과  $E$ 는 모두  $P$ 의 선형함수로 정의하고, 식 (2), (3)과 같이 정리하였다.

$$Q_R = c_0 + c_1 P \quad (2)$$

$$E = d_0 + d_1 P \quad (3)$$

$$R = (-c_0 - d_0) + (1 - c_1 - d_1) P \quad (4)$$

여기서,  $c_0$ ,  $c_1$ 와  $d_0$ ,  $d_1$ 은  $Q_R$ 과  $E$ 의  $P$ 에 대한 선형회귀분석으로 구하는 계수이다. 식 (1)을 이용하면  $R$ 을  $P$ 에 대하여 식 (4)와 같이 선형함수로 정의할 수 있다.

본 연구에서는 증발산량과 함성요소를 고려하지 않고, 강우 침투와 유출의 관계로부터 유출량을 정리하였다. 따라서, 유출량에 대한 기초 수문학적 모델로 부터 식 (2)는 식 (5)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$Q_R = P - I_R \quad (5)$$

$$R = I_R \quad (6)$$

여기서, 지반 침투량  $I_R$ 은 강우와 지반에 대한 함수로 정의할 수 있으며, 이 경우 식 (2)와 달리  $Q_R$ 과  $P$ 는 선형 관계가 성립되지 않고,  $S_y$ 는 시간만 고려하므로 식 (1)과 식 (5)의 관계로부터  $I_R$ 과  $R$ 의 관계를 식 (6)과 같이 정리하였다. 본 연구에서는 식 (5)와 (6)의 기상수문학적 모델과, 다음에 설명되는 강우침투와 지하수 흐름의 지반수리학적 모델을 결합하여 산사태 해석을 위한 GIS 기반의 지하수 예측 기법을 제안하였다.

## 2.3 지하수문 모델

지하수문 모델은 강우의 지표 침투와 함양, 그리고 지하수의 흐름과 관련한 모델이다. 이 모델의 개발에서 대

수층은 균질하고, 함양은 흙의 수리학적 특성과 강우강도에 의해 시간에 따라 변화하며, 지하수의 흐름은 불포화영역(Vadose zone) 하부 지하수에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 지반 침투량( $I_R$ )과 함양량( $R$ )을 구하기 위하여, 흙의 불포화특성을 고려한 개선된 Green-Ampt 모델(Green-Ampt, 1911; Mein and Larson, 1973)을 개선하여 사용하였다. 지하수에 도달한 지반 침투량( $I_R$ )인 함양량( $R$ )은 지하수위와 지하수 흐름을 계산에 입력변수로 사용하였으며, GIS의 래스터 모델과 Darcy의 법칙을 결합하여 지하수의 흐름을 구하였다.

### 2.3.1 강우침투 모델

강우에 의해 발생하는 침투는 지표를 통해 물이 흙속으로 들어가는 물리적 과정을 의미한다. 불포화 토사의 경우 침투량은 함수량 조건, 간극수압, 투수계수 등에 따른 물의 재분포에 의해 결정된다. 불포화토는 함수비가 줄어들수록 흙 내부에 부의 간극수압이 작용하게 되며, 이에 따라 투수계수도 함께 작아진다. 체적함수비는 최대와 최소 경계 모두 일정 값에서 수렴하는 경향을 나타내며, 흙은 고유의 체적함수비 변화량 값을 가진다. 체적함수비의 변화량은 흙에 물이 침투될 수 있는 총량을 의미하게 된다. 기존의 산사태 해석 모형인 TRIGRS은 강우침투를 고려할 수 있으나, 흙의 불포화 특성을 반영하지 못하고 정상 강우만을 고려할 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 침윤전선에서 모관 흡수력과 침윤전선 윗부분에서의 함수량 결손 및 투수계수는 일정하다는 Green-Ampt(1911)의 기본 가정은 그대로 이용하였으나, Green-Ampt 모델이 투수계수와 강우강도의 관계를 명확히 구분하고 있지 않은 단점을 보완하기 위해, 이 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 강우강도와 투수계수의 크기를 비교하여 강우에 의한 누적침투량을 달리 산정하는 방법을 적용하였다(Mein and Larson, 1973; Kim et al., 2012). 또한 Mein과 Larson(1973)의 폰딩(ponding) 시간을 반영하여 강우의 침투-유출 관계를 고려하였다(식 (7)). 이와 같은 방법으로 강우의 지반 침투량( $I_R$ )을 식 (8)과 같이 정리하였으며,  $I_R$ 은 누적침투량( $F$ )을 변수로 하는 시산법을 이용하여 구할 수 있다.  $I_R$ 에 의해 불포화영역(Vadose zone)에서 일시적으로 형성되는 지하수위( $Z_w$ )는 지반의 함수특성을 고려하여 식 (9)와 같이 정리하였다.

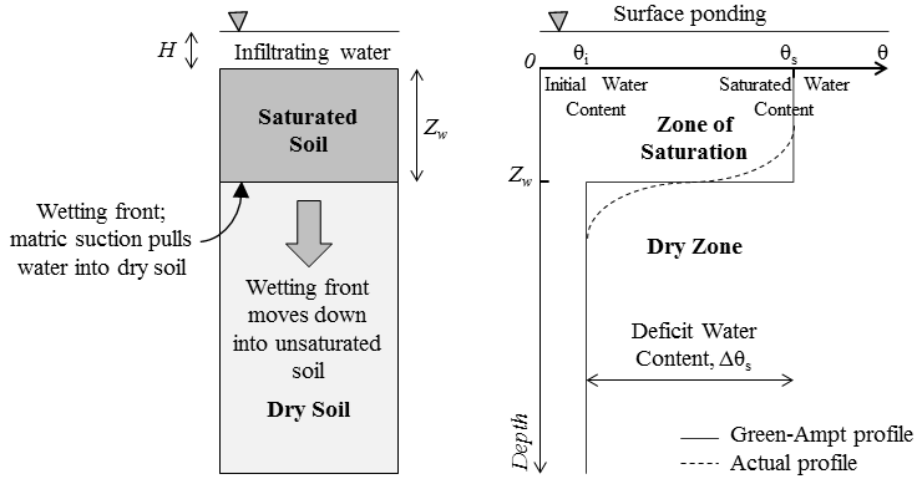


Fig. 2. Water contents profile of Green-Ampt Model (Green and Ampt, 1911)

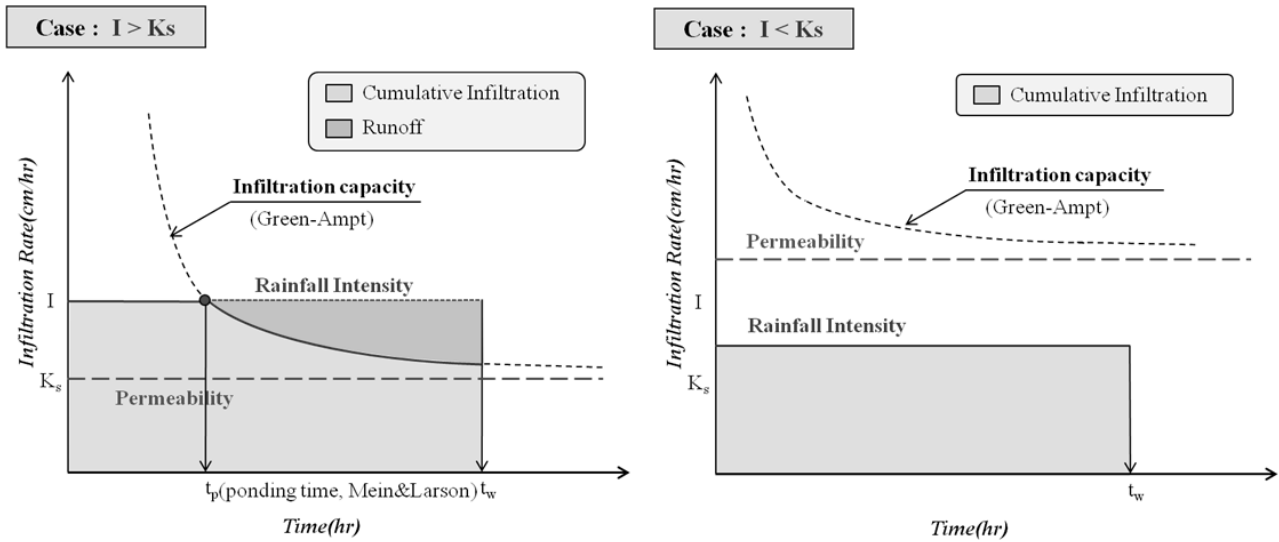


Fig. 3. Rainfall-infiltration rates of modified Green-Ampt Model (Modified from Mein & Larson, 1973)

$$t_p = \frac{k_s \cdot \psi_f \cdot \Delta\theta}{I \cdot (k_s - I)} \quad (7)$$

$$I_R = I \cdot t_p + \int_{t_p}^{t_w} k_s \left(1 + \frac{\psi_f \cdot \Delta\theta}{F}\right) \quad (8)$$

$$Z_w = \frac{I_R}{\Delta\theta} = \frac{I \cdot t_p + \int_{t_p}^{t_w} k_s \left(1 + \frac{\psi_f \cdot \Delta\theta}{F}\right)}{\Delta\theta} \quad (9)$$

여기서,  $I$  : 강우강도,  $t_p$  : 폰딩이 발생할 때까지의 시간,  
 $t_w$  : 강우지속시간,  $k_s$  : 포화투수계수,  
 $\psi_f$  : 모관흡수고,  $F$  : 누적침투량,  
 $\Delta\theta$  : 초기상태( $\theta_i$ )와 포화상태( $\theta_s$ )간의 체적함수량 변화

### 2.3.2 지하수 흐름 모델

본 연구에서는 지하수의 흐름을 계산하기 위하여 Darcy의 법칙과 GIS의 래스트 모델을 사용하였다. GIS 수치 표고모델을 그리드 형태의 래스트 모델(Raster Model)로 변화한 기반암 표고 데이터로부터 경사와 흐름 방향을 분석하여 지하수 흐름을 해석하였다. 지하수 분포는 Fig. 4와 같이 지표면으로 부터 강우 침투에 의해 일시적으로 형성되는 습윤대, 함양되기 전까지의 불포화대, 기반암 상부의 지하수대로 구분하였으며, 지하수 상부의 연직방향 침투와 지하수대에서의 수평방향 흐름을 고려하여 3차원적인 지하수 흐름을 계산하였다. 또한, Green-Ampt 모델과 같이 침윤전선에서 모관 흡수력과 침윤전선 윗부분 또는 아랫부분에서의 함수량 결손 및 투수계수는 일정하다고 가정하였다. 본 연구에 적용한

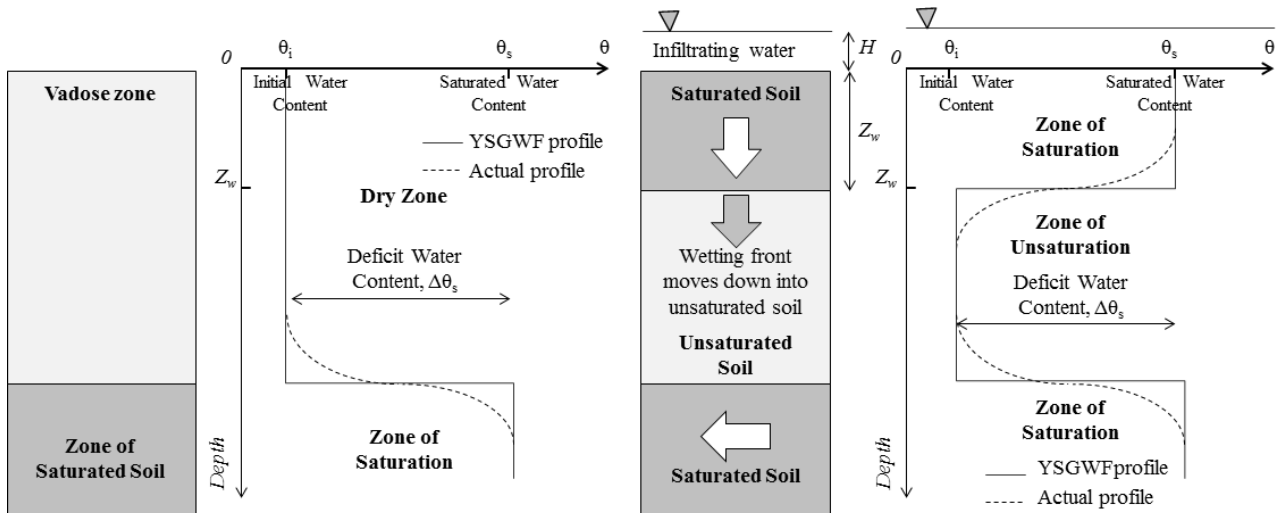


Fig. 4. Water contents profile of YSGWF Model

지하수의 분포와 모관흡수력의 분포를 정리하여 Fig. 4에 나타내었다.

기존 연구에서 Sangrey 등(1984)은 강우량과 강우지속시간에 따른 지하수위의 변화를 예측하기 위하여, 지하수위 예측모델을 제안하였다. 이 모델은 대수층은 균질하고, 지하수 공급의 증가는 시간에 따라 일정하게 변화하며, 유출량은 상수의 값을 갖는다고 가정하였다. 유입량과 유출량이 동일하다는 조건하에 유역 전체를 하나의 모의 요소로 고려하는 집중형 모델(lumped model)을 이용하고 있어 유역에 대한 정확한 물리적 요소를 고려하지 못하는 단점이 있다. 산사태 해석 모형인 SINMAP은 지하수의 흐름은 사면의 경사를 따른다는 기본 가정과 TOPMODEL의 상부 지형의 지하수 기여면적 개념(Beven et al., 1979, 1995)을 일부 차용하여 지하수를 예측하는 수문 모형을 이루고 있다(Pack et al., 1998). 입력변수는 정상상태 강우강도와 투수량계수가 있다. 이 모델에서의 지하수위는 지형학적인 조건에 의해 지배되며, 흐름시간을 고려하지 못하므로 유출지점 산정에는 유효하나, 지하수 예측에 있어 물리적인 요소를 고려하지 못하는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존 방법들의 단점을 보완하기 위하여 GIS의 래스트 모델과 Darcy의 법칙을 이용하여, 2차원적인 흐름과 수직방향 지하수위의 변화량을 산정하여, 지하수의 변화량을 예측하는 기법인 YSGWF 모델을 개발하였다. YSGWF 모델은 산사태해석을 위한 GIS기반의 지하수 예측기법으로 다음과 같은 가정을 기본으로 개발하였다.

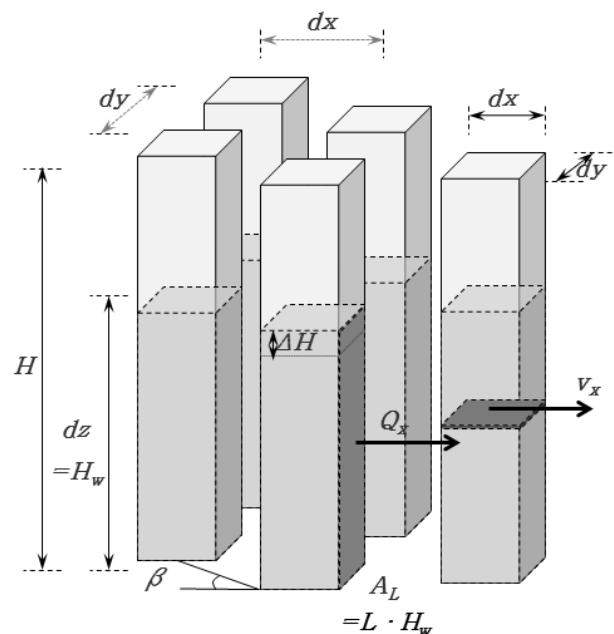
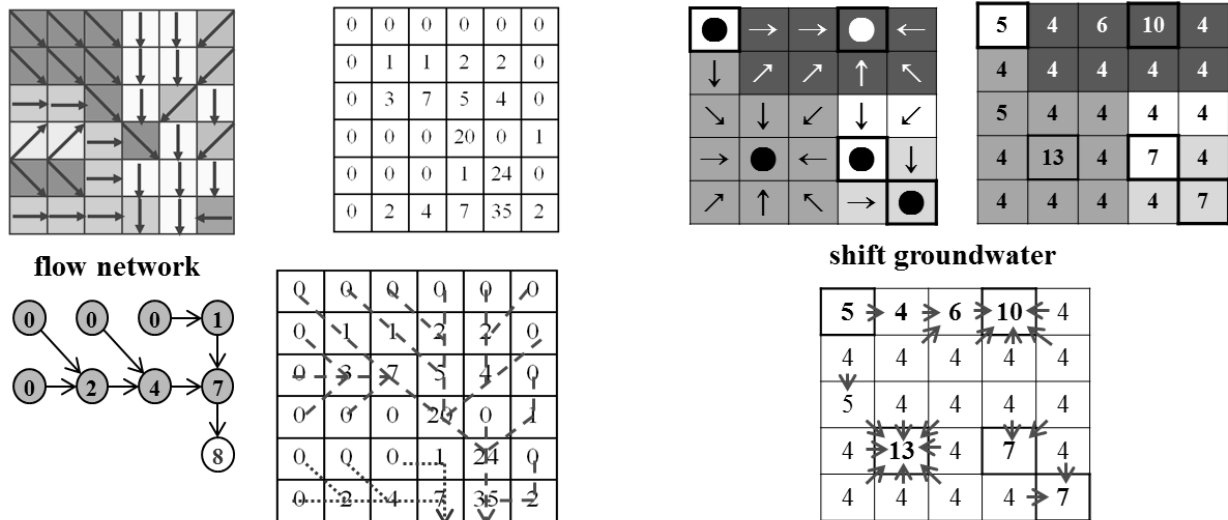


Fig. 5. Groundwater flow for elementary volume

- 1) 대수층은 균질하다.
- 2) 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따른다(Darcy, 1865).
- 3) 물의 흐름에서 운동에너지는 무시한다(Cedergren, 1977).
- 4) 지하수는 셀 단위로 계산하며, 셀 내의 지하수 흐름은 무시한다.
- 5) 불포화투수층에서는 연직흐름을, 지하수층에서는 수평흐름을 고려한다.

이와 같은 가정에 의해 Fig. 6에 나타난 x방향 지하수의 흐름에 대하여, x방향의 유속은 Darcy의 법칙을 이용



(a) Flow accumulation method in SINMAP

(b) Flow method in YSGWF

Fig. 6. Methods of groundwater flow determination

하여 식 (10)과 같이 표현할 수 있으며, 운동에너지를 무시한 지하수의 수두는 식 (11)과 같다.

$$v_x = k_x \cdot i = k_s \cdot \frac{dh}{dx} \quad (10)$$

$$h = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \frac{p}{\rho g} + z \quad (11)$$

식 (12)와 같이 미소크기에서 간극수압의 변화가 없다는 가정하에, 시간  $\Delta t$ 에 대한  $x$ 방향에서 흐름량을 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} = p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \quad (12)$$

$$Q_x = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot dx) \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (13)$$

$$= k_x \cdot \sin \beta \cdot dy \cdot dz \cdot dt$$

래스트 모델에서의 계산을 위하여 셀에서의 유출량  $Q_x$ 를 높이의 변화량  $\Delta H$ 로 변환하면, 투수계수가 등방성 가진다고 가정으로부터 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.  $y$ 방향에 대해서도 같은 방법을 적용하여 각 셀에서의 유출량을 구할 수 있다.

$$\Delta H = k_s \cdot \sin \beta \cdot H_w \cdot \frac{dt}{s} \cdot \frac{1}{\theta_s} \quad (14)$$

여기서,  $s$  : 셀의 크기( $=dx=dy$ ),

$H_w$  : 셀에서 지하수 높이( $=dz$ )

물의 흐름 방향과 유출입량의 결정은 GIS의 래스터 모델을 이용하였다. 기존의 연구에서는 흐름방향과 누적흐름량 계산 기법을 사용해 왔으며, 이는 유역단위별 흐름의 경로를 고려하여 유출량을 산정하는 방법이다 (Jenson and Domingue, 1988). 래스터 모델의 경사 데이터와 유역과 흐름의 벡터데이터를 이중적인 방법을 사용하므로, 유역 경계에서 자료의 왜곡과 데이터 변화에 의한 계산 한계 등의 단점이 있다. 본 연구에서 흙 속의 물의 흐름에서 운동에너지를 무시하는 것으로 가정하였으며, 따라서 각 물의 흐름은 이웃하지 않는 셀의 흐름 영향을 받지 않는다. 따라서, 유역과 흐름 경로의 벡터데이터가 필요하지 않으며, Fig. 6에 나타난 것처럼 지하수의 흐름은 중심 셀의 유출량을 이웃하는 셀로 이동시키는 것으로 구할 수 있다.

본 연구에서는 지하수의 흐름 방향을 계산하기 위하여 Mark(1984)가 제안한 D8 방식을 사용하였으며, 중심 셀과 중심 셀을 상하, 좌우, 대각선 방향으로 둘러싼 8개의 주변 셀 사이의 기울기를 계산하여, 중심 셀로부터 가장 큰 기울기를 가지는 방향으로 지하수의 흐름이 발생하도록 계산하였다. 각 셀에서 흐르는 물의 양은 식 (14)를 이용하여 계산할 수 있으며, 지하수위는 흐름방향으로 각 셀의 수위 변화량을 밀어주는 방식으로 계산한다. 지하수 흐름 방향과 지하수위의 변화를 계산하는

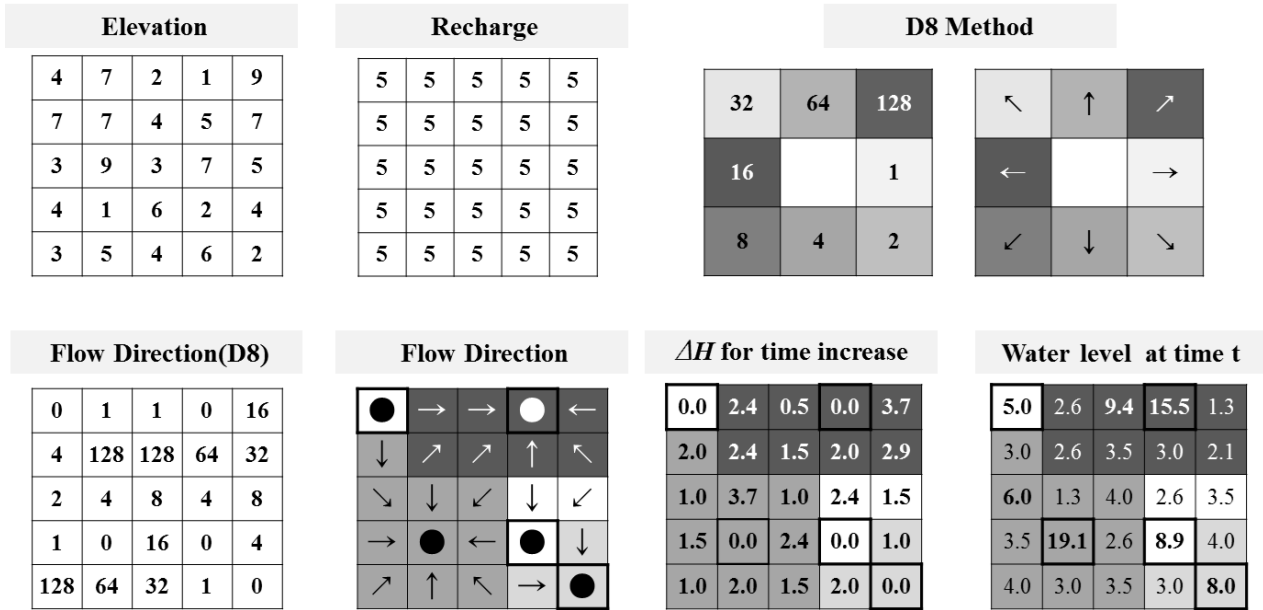


Fig. 7. General strategy of flow water determination in YSGWF

과정을 Fig. 7에 나타내었으며, 각 셀의 시간t에서 지하수 변화량과 지하수위는 식 (15), (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta H_{ijk} = k_s \cdot \sin\beta_{ij} \cdot H_{ijk} \cdot \frac{dt}{s} \cdot \frac{1}{\theta_s} \quad (15)$$

$$k = t, (initial H_{ijt} = H_{ij(t-1)}) \quad (16)$$

$$i = 2, j = 2, H_{22t} = H_{22t} - \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 1, H_{23t} = H_{23t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 2, H_{33t} = H_{33t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 4, H_{32t} = H_{32t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 8, H_{31t} = H_{31t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 16, H_{21t} = H_{21t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 32, H_{11t} = H_{11t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 64, H_{12t} = H_{12t} + \Delta H_{22t}$$

$$D8 = 128, H_{13t} = H_{13t} + \Delta H_{22t}$$

### 2.3.3 YSGWF 모델

YSGWF 모델은 산사태 해석을 위한 산지사면의 지하수 흐름을 계산하는 GIS 기반의 지하수 예측 모델이다. 식 (6)의 수문기상 모델로부터 지하수로 유입되는  $I_R$ 은 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다. 지하수까지 함양되는 데 소요되는 시간과 흙이 완전히 포화되기 전 불포화 상태의 저류시간을 고려하여 식 (16)은 식 (6), (8)로부터 식 (17)과 같이 다시 나타낼 수 있다. YSGWF의 해석 흐름을 정리하면 Fig. 8과 같다.

$$k = t, \quad initial H_{ijt} = H_{ij(t-1)} + I_{R,ij(t-t_s)} \quad (17)$$

$$t_s = (H - H_{ijt}) \times K_s$$

$$H_{ijt} = H_{ij(t-1)} - \Delta H_{ijt} \dots$$

## 3. 해석기법의 검증 및 적용(지하수 예측에 따른 산사태 영향 분석)

### 3.1 YS-SLOPE 모형

본 연구에서는 산사태 해석에서 시간에 따른 지하수의 다양한 분포를 고려하기 위하여 YSGWF 모델을 개발하였고, 무한사면파괴 모델을 결합하여 YS-Slope 모형(Kim et al., 2012)을 개선하여 해석기법의 검증에 사용하였다. YS-Slope(YonSei-Slope) 모형은 상용 프로그램인 SINMAP, TRIGRS 모형 등과 같이 역학적 기법을 사용한 산사태 해석 모형으로, 기존 프로그램들의 수문 모형과 파괴 모형을 개선한 모형이다. YS-Slope 모형은 국내의 전형적인 사면파괴 유형인 강우에 의한 불포화 토사사면의 파괴를 해석할 수 있도록 개발되었다. YS-Slope 모형에서는 지반의 강도 특성과 수리특성, 식생 영향 및 토심 등의 기하학적 특성을 공간적 데이터로 구성하고, 지형데이터와 결합하여 GIS기반의 산사태 해석이 가능하도록 하였다. YS-Slope과 기존의 역학적 기법에 의한 모델 및 국내에서 많이 사용되고 있는 통계학적 모델들의 특징을 요약하면 다음 Table 1과 같다.



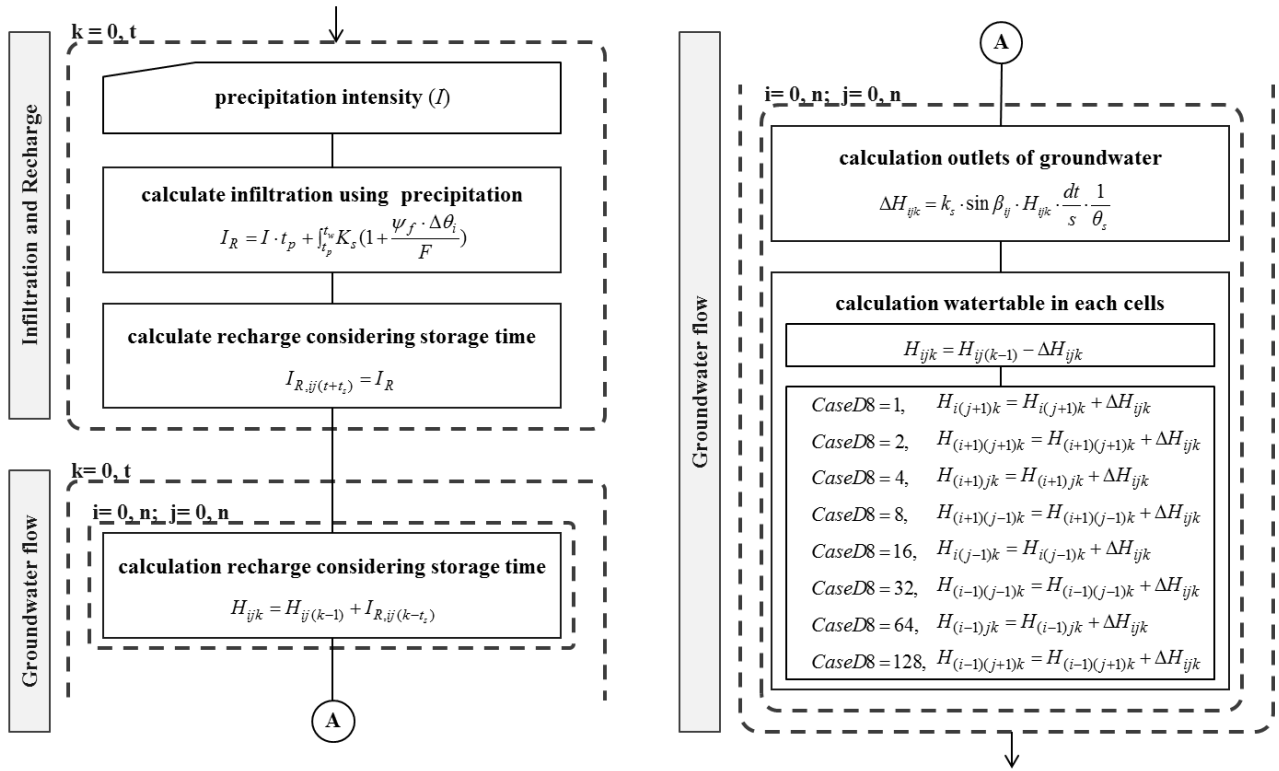


Fig. 8. Flow chart of YSGWF

Table 1. The models for a prediction of landslide

| Items                           | KFS         | KWU         | SINMAP         | TRIGRS         | YS-Slope       |
|---------------------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|
| Method                          | Statistical | Statistical | Physical       | Physical       | Physical       |
| Failure model                   | ×           | ×           | Infinite slope | Infinite slope | Infinite slope |
| Hydrology model                 | ×           | ×           | Topmodel       | Richardson     | Green-Ampt     |
| Rainfall intensity              | ○           | ○           | ○              | ○              | ○              |
| Rainfall duration               | ×           | △           | ×              | ○              | ○              |
| Unsaturated soil characteristic | ×           | ×           | ×              | ×              | ○              |
| Wetting band depth              | ×           | ×           | ×              | ○              | ○              |
| Groundwater table               | ×           | ×           | ○              | ×              | ○              |
| Time dependent analysis         | ×           | ×           | ×              | ×              | ○              |

YS-Slope 모형에서 사용하는 무한사면파괴 모델은 활동면을 지표면과 평행한 직선으로 가정한 계산법이다. 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면의 안정에 사용되어지는 모델이며, 지하수가 상승하는 경우와 습윤대가 내려가는 경우는 활동면과 경계 조건이 서로 상이하다. Pradel과 Raad(1993)는 강우 침투로 습윤대 부근에서 사면 파괴가 일어나는 무한사면 파괴모델을 제안하였다. Fredlund(1978)은 간극공기압과 간극수압을 고려하여 식 (18)과 같이 Mohr-Coulomb의 전단강도식을 개량하였고, 포화에 가까운 작은 범위의 모관흡수력에 대해서는  $\phi'$ 와  $\phi^b$ 의 차이가 크지 않음

므로  $\phi' = \phi^b$ 로 가정할 수 있다. Hammond(1992)는 식생의 하중과 점착력으로 환산한 뿌리의 지반보강 효과를 고려하는 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 이러한 연구들을 바탕으로 지하수와 일시지하수가 같이 분포하는 경우에 대한 불포화 토사 사면의 안정 해석이 가능하도록 무한사면파괴 모델을 개선하였다. Fig. 9와 같이 경사가  $\beta$ 인 반무한 사면에서 가상의 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이  $H$ 에서의 안전율은 식 (19)와 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (18)$$

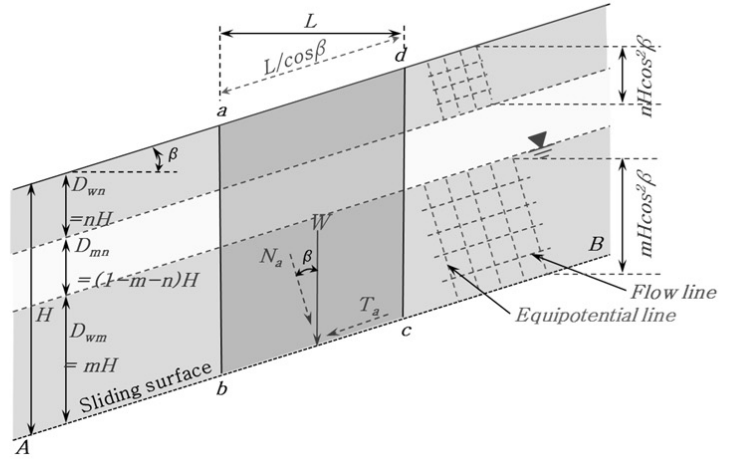
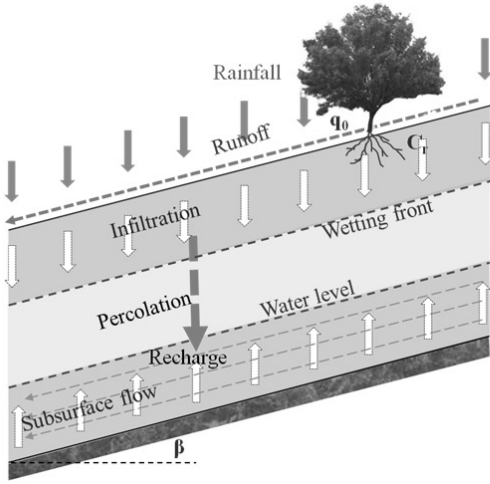


Fig. 9. Infinite slope model of YS-Slope

여기서,  $(u_a - u_w)$  : 모관흡수력,  $\phi'$  : 흙의 내부마찰각,  
 $\phi^b$  : 불포화 상태의 흙의 내부마찰각

$$FS = \frac{(c_s' + c_r') + (\gamma_t \cdot D_s + q_0 + (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot D_w) \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{(\gamma_t \cdot D_s + \gamma_{sat} \cdot D_w + q_0) \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (19)$$

여기서,  $c_s'$  : 흙의 점착력,  $c_r'$  : 뿌리에 의한 전단강도 증가를 고려하기 위한 상수,  $q_0$  : 식생 하중,  
 $D_w$  : 습윤대 두께(= $D_{wm} + D_{wn}$ ),  
 $D_s$  : 불포화층의 두께(= $D_{mn}$ ),  $\beta$  : 사면의 경사각

강우의 침투에 의한 일시 지하수위만 있는 경우 식 (19)에서 습윤대 깊이  $Z_w$ 에서의 안전율은 다음 식 (20)와 같이 계산할 수 있다.

$$FS = \frac{(c_s' + c_r') + (\gamma_{sat} \cdot Z_w + q_0) - \gamma_w \cdot Z_w \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{(\gamma_{sat} \cdot Z_w + q_0) \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (20)$$

여기서,  $c_s'$  : 흙의 점착력,  $c_r'$  : 뿌리에 의한 전단강도 증가를 고려하기 위한 상수,  $q_0$  : 식생 하중,  
 $Z_w$  : 습윤대 두께(= $D_{wn}$ ),  $\beta$  : 사면의 경사각

### 3.2 기존해석 기법과의 비교

본 해석 기법의 검증을 위하여 기존 해석기법인 SINMAP (Stability INDEX MAPping) 프로그램과 비교·분석을 수행하였다. SINMAP은 Pack 등(2008)이 개발한 산사태

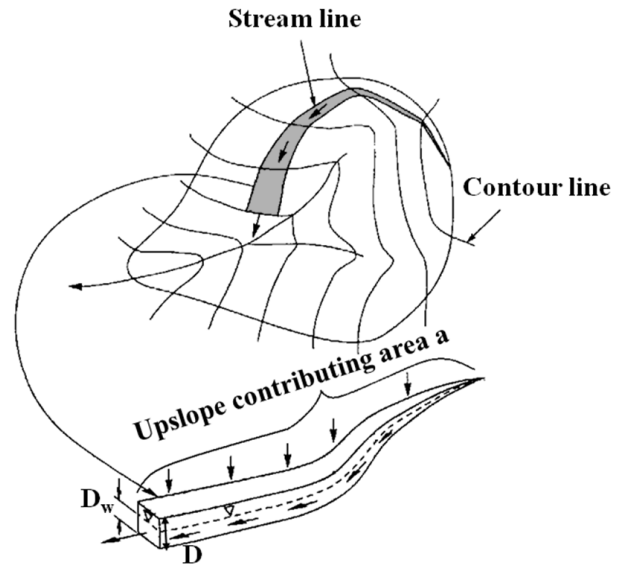


Fig. 10. SINMAP for determination of flow directions and contributing areas in GIS

해석기법으로 지하수는 사면의 경사를 따른다는 기본 가정과 TOPMODEL(Benven 등, 1979, 1995)의 지형학적 기여면적(Fig. 10)을 이용한 습윤지수( $w$ , 식 (21))를 이용한다. 그러나, 시간에 따른 지하수 변화를 고려하지 못하고 사면의 경사각과 지형에만 의존하는 한계가 있다.

$$w = \frac{R \cdot a}{T \cdot \sin \beta} \quad (w \leq 1) \quad (21)$$

여기서,  $w$  : 습윤지수,  $R$  : 단위 기여면적에 대한 정상상태의 함양률,  $T$  : 투수량계수

YSGWF에서 강우는 시간당 실제 강우 자료를, SINMAP에서 함양량은 같은 기간의 강우강도와 강우지속시간을 모델링에 사용하였다. SINMAP 해석에 의한 습윤대 분포와, YSGWF 모형으로 계산한 시간에 따른 지하수 변화를 Fig. 11에 나타내었다. SINMAP의 경우 지하수는 계곡부에만 집중적으로 나타나는데 이는 SINMAP에서 사용하고 있는 수문모형이 배수와 집수에 사용되는 알고리즘을 이용하고 있기 때문으로 분석된다. YSGWF의 경우 SINMAP에 비해 계곡부의 집수가 뚜렷하게 나타나지는 않으나, 경사가 완만해지는 부분인 상류부와 중류부에서 저류에 의한 지하수가 비교적 높게 상승하는 것으로 나타났다. SINMAP의 경우 지표면의 경사를 지하수 흐름방향으로 가정하고 지표유출해석에 사용되는 수문 모델을 지하수해석에 적용함에 지표유출 지점은 명확하게 나타나지만 시간에 따른 지하수 분포를 알 수 없으며, YSGWF의 경우 기반암의 경사로 지하수 흐름

을 결정하고 시간에 따른 지하수의 흐름을 계산하므로, 강우 침투와 지하수 흐름에 의해 시간에 따라 지하수의 분포가 변화하는 것으로 나타났다.

### 3.3 산사태 사례 비교

개발된 YSGWF를 검증하기 위해 본 검증을 위해 개선한 YS-Slope 모형과 기존의 해석기법(TRIGRS), 그리고 실제 산사태 발생 사례를 비교하였다. 실제 산사태가 발생한 지역에 대해 YS-Slope으로 해석한 결과와 실제 산사태 발생 지점을 비교하여 예측의 정확성을 판단하고, 실제 산지에 대한 산사태 예측에 적용 가능한 지를 확인하였다. 해석 기법의 검증을 위하여 기존 해석기법인 TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability analysis) 프로그램과 비교·분석을 수행하였다. TRIGRS 프로그램은 Baum(2008)이 개

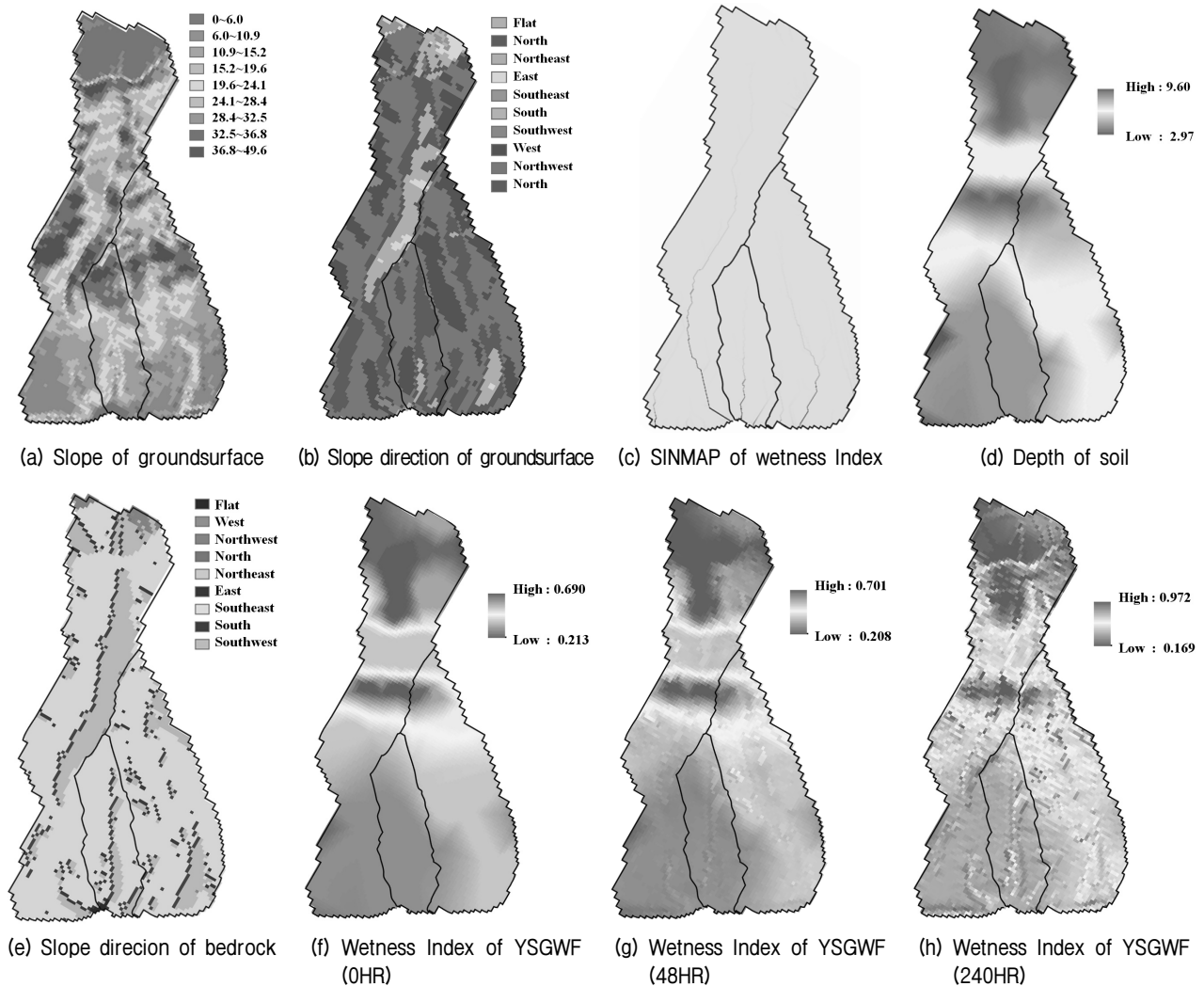


Fig. 11. Prediction of groundwater flow using YSGWF and SINMAP

발한 산사태 해석기법으로 Richards(1931)의 방정식을 이용한 침투모형과 무한사면 파괴모형을 이용한다. 그러나 포화투수 계수, 수리학적 확산 계수를 이용한 간극 수압을 이용한 상부 습윤대 해석으로 산사태 해석유형에 제한이 있으며, 흙의 불포화 특성 및 토심 등을 고려하지 못하는 한계가 있다.

### 3.3.1 연구 지역

연구지역은 서울·경기 지역에 위치한 ○○산이다. 이 지역은 2010년과 2011년에 산사태가 발생하여 주택 및 농지 등이 매몰되는 등 많은 인명 및 재산피해가 발생하였다. 이 지역은 화강암질호상편마암이 주를 이루는 기반암 위로 2~10m의 두꺼운 퇴적층 및 붕적층이 덮고 있다(Fig. 12). 본 연구에서는 이 지역의 ○○○유역(이하 Site-1이라고 함)에 대해 검증을 수행하였으며, Site-1의 경우 유역면적 약 90,000m<sup>2</sup>, 625m의 유하부 길이를

가지고 있는 지역이다. 2011년 Site-1은 총 5개 지점에서 산사태가 발생하였으며, 유역의 정상부 1개소, 중·하부 좌측 1개소, 우측 3개소에서 발생하였다.

### 3.3.2 지반 특성

○○산은 국내의 다른 산들과 비교하여 토층이 두꺼운 특징을 가지고 있다. 시추조사와 탄성파탐사에 의해 측정된 결과 Site-1은 2.1~7.5m의 토심이 하부로 내려가면서 점차 깊어지는 경향을 보이고 있다. Site-1의 퇴적층은 실트질 모래(SM)로 분류되며 조밀~매우 조밀한 상태를 나타내고 있다. 실내 및 현장 시험을 통해 흙의 포화 투수계수  $8 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ , 체적함수비 변화량 0.28, 점착력 11.0kPa, 내부마찰각 26.5°를 산정하였다. 지반 조사를 통해 산정한 연구지역의 주요 지반정수를 요약하면 아래 Table 2와 같다. 이 지역의 식생 분포를 조사한 결과 대표수종은 신갈나무와 리기다 소나무이며, 입

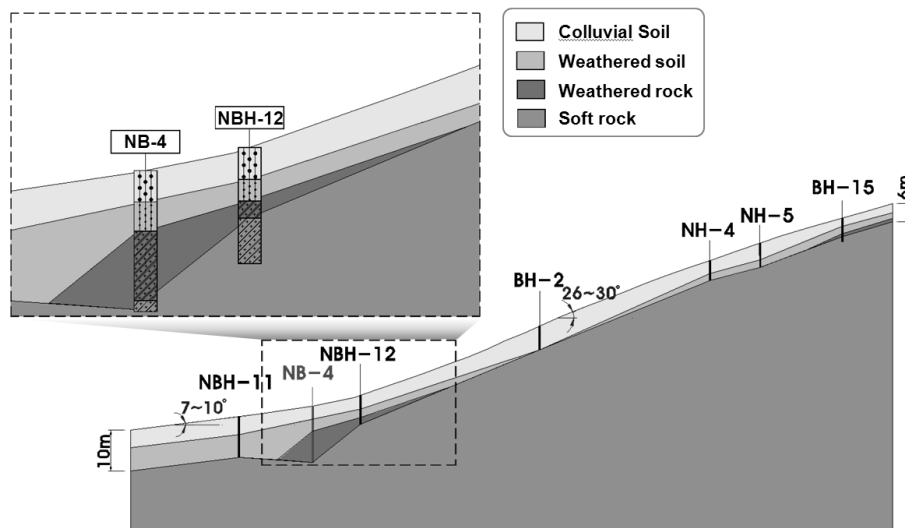


Fig. 12. Typical soil profile of ○○san (Mt.)

Table 2. Geotechnical and hydraulic properties of the soil used in this study

| Parameters                                         | Values                                        | Remarks          |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------|
| Hydraulic conductivity, $k_s$                      | $8 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ (28.8 mm/h) | YS-Slope, TRIGRS |
| Initial water contents, $\theta_i$                 | 18.0~18.4 (18.0)%                             | YS-Slope         |
| Water-content deficit, $\Delta\theta$              | 0.28                                          | YS-Slope         |
| Wetting front suction head, $\psi_f$               | 830mm                                         | YS-Slope         |
| Infiltration rate, $I_z$                           | $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$                | TRIGRS           |
| Hydraulic diffusivity, $D_0$ (m <sup>2</sup> /sec) | $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$       | TRIGRS           |
| Soil cohesion, $c'$                                | 10.2~12.8 (11.0) kPa                          | YS-Slope, TRIGRS |
| Soil friction angle, $\phi'$                       | 22.4~26.6 (26.5)°                             | YS-Slope, TRIGRS |
| Unit weight, $\gamma_t$                            | 17.0~18.5 (18.0) kN/m <sup>3</sup>            | YS-Slope, TRIGRS |

( ) is Number of average

목밀도 700~800본/Ha로 분포하고 있었다. Biomass 추  
정식과 기존 연구값 등을 이용하여 식생하중 0.253kPa,  
뿌리의 전단강도 증가량 1kPa를 해석에 적용하였다.

### 3.3.3 산사태 해석 결과 분석

Site-1의 2011년도 LiDAR 측량 결과를 5m×5m격자  
의 수치표고 데이터로 변환하고, 이 지역에 대한 시추조  
사 및 탄성과 탐사 결과를 이용하여 기반암 심도를 수치  
표고 데이터로 변환하여 이에 대한 경사와 경사방향을  
분석하였다. 사면의 경사는 평균 35도를 이루고 있으며,  
상부와 중·하부의 좌·우측에서 비교적 높은 경사를 나  
타내고 있다. 경사는 전체적으로 북쪽방향이 우세하며,  
유역의 가운데 축을 따라 좌·우측에서 각각 북서와 북  
동 방향의 향을 보이며 계곡 지형을 형성하고 있다. 산  
사태 해석시 강우는 기상청(2011)의 지역별상세관측자  
료(AWS)로부터 산사태 발생시의 연속강우에 대한 시  
간 강우자료를 사용하였다. 5m×5m격자의 각 셀에서 지  
반 강도, 불포화 투수특성, 토심, 식생 관련 입력변수 등  
을 이용하여 YS-Slope 모형으로 산사태 해석을 수행하  
였으며, 강우강도와 지반 강도, 포화 투수특성, 식생 입  
력변수 등을 이용한 TRIGRS 모형을 이용하여 비교·검  
증하였다. 실제 Site-1에서는 정상부 1개소, 중·하부 좌  
측 1개소, 우측 3개소에서 산사태가 발생하였으며, 이  
지점들은 모두 YS-Slope 모형 해석 결과에서 0.8이하의  
낮은 안전율을 나타내고 있는 위치들이다. TRIGRS 모  
형은 발생 지점 중 우측 하단 1개소의 산사태 발생을  
예측하지 못하였으나, YS-Slope 모형의 경우 발생 지점  
5개소를 모두 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 분석

결과 YSGWF를 이용한 YS-Slope 모형이 Fig. 13에 나타  
난 바와 같이 산사태 발생 지점을 전반적으로 더 정확하  
게 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 두 모형 모두 시간  
강우자료를 사용하지만 침투해석에 대한 수문모형에 따  
른 계산 방법이 상이하고, TRIGRS와 달리 YS-Slope의  
경우 지하수의 흐름과 습윤대를 동시에 고려하고 있으  
며, 이러한 두 모형의 관계에 의해 부분적으로 서로 다  
른 결과가 나타난 것으로 분석되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 산사태 해석에서 시간에 따라 변화하  
는 지하수의 분포를 예측할 수 있는 GIS 기반의 지하수  
예측 기법(YSGWF)을 개발하였다. 개발된 YSGWF 모  
델을 무한사면 파괴모델과 결합하여 산사태 예측 기법  
인 YS-Slope(Kim 등, 2012)을 개선하였다. 제안된 해석  
기법의 검증에 위하여 기존 산사태 해석 기법 및 실제  
사례와 비교하였으며, 실제 산지의 산사태 예측에 대한  
적용 가능성을 확인하고자 하였다. 연구 결과를 요약하  
면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안한 해석기법은 기존의 해석기법과  
는 달리 강우침투와 지하수의 흐름을 모두 고려할  
수 있다. 토심이 얇은 경우나 기반암 지형 등에 의해  
지하수가 상승되는 효과와 시간에 따른 강우침투와  
지하수의 분포를 모두 고려할 수 있으므로, 산사태  
해석 시 파괴 유형 및 사전 강우 효과 등을 고려할  
수 있다.

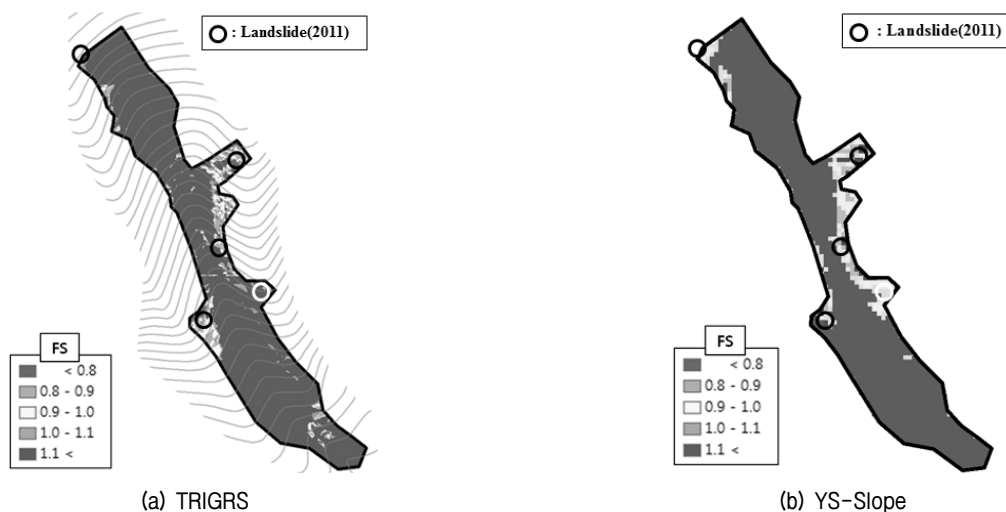


Fig. 13. Landslide case in OOsan (Mt.) and results of landslide analysis using the models

- (2) 본 해석기법은 1차원 침투 모델과 2차원 지하수 흐름 모델을 결합하여 3차원적인 문제를 근사화한 간편 해석기법으로, 지표면과 기반암의 DEM 및 실시간 강우 자료를 이용하여 실제 산지 규모에서 산사태를 해석에 필요한 수문해석을 수행할 수 있다.
- (3) 또한, 시간에 따른 3차원 지하수 해석에서, 흙의 불포화 특성, 강우강도 및 지속시간, 저류시간, 시간에 따른 유입·유출량의 변화 등을 고려할 수 있으며, 경계조건 및 데이터 형식의 변환을 최소화하여 입력과 계산이 용이하다.
- (4) 서울·경기 지역에 위치한 ○○산 산사태 사례를 TRIGRS 해석 결과와 YSGWF 모델을 이용한 YS-Slope 모형의 해석결과를 비교하였다. 비교 결과 YS-Slope 모형이 비교적 산사태 발생 지역을 보다 더 정확히 예측하는 것으로 나타났으며, 이러한 검증은 토대로 실제 산지에 대한 산사태 예측에 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030842)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Korean Meteorological Administration (2011), <http://www.kma.go.kr>, *Auto Weather System (AWS)*.
2. Baum, R.L., Savage, W.Z., and Godt, J.W. (2008), "TRIGRS-A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0", *U.S. Geological Survey, Open-File Report 2008-1159*.
3. Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979), "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Sciences*, Vol.24, pp.43-69.
4. Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J. (1995), "TOPMODEL, Chapter 18 in Computer Models of Watershed Hydrology", Edited by V. P. Singh, *Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado*, pp.627-668.
5. 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*, Vol.268, pp.56-71.
6. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, A. (1978), "Shear strength of unsaturated soils", *Journal of Canadian Geotech*, Vol.15, pp.313-321.
7. Goldschmidt (1960), "Hydrometeorological methods of quantitative estimation of annual underground water replenishment", *Internat.*

- Assoc. of Sci. Hydrology*, No.52, pp.272-278.
8. Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911), "Studies on soil physics I-the flow of air and water through soils", *Journal of Agriculture Science*, Vol.4, No.1, pp.1-24.
9. Hammond, C., D. Miller, H.S., and Swetik, P. (1992), "Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0", *USDA Forest Service Intermountain Research Station, General Technical Report INT-285*.
10. Iverson, R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration", *Water Resources Research*, Vol.36, No.7, pp.1897-1910.
11. Jenson, S.K. and Dominique, J.O. (1988), "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.54, No.11, pp.1593-1600.
12. Jeong, S.S., Kim, J.H., and Lee, K.H. (2008), "Effect of clay content on well-graded sands due to infiltration", *Engineering Geology*, Vol.102, pp.74-81.
13. Jeong, S.S., Kim, J.H., and Park, S.W. (2004), "Influence of rainfall-induced wetting on unsaturated weathered slopes", *Journal of the KGS*, Vol.20, No.7, pp.159-169.
14. Jeong, S.S., Choi, J.Y., and Lee, J.H. (2009), "Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration", *Journal of KSCE*, Vol.29, No.1C, pp.1-9.
15. Kim, J.H., Jeong, S.S., Park, S.W., and Sharma, J. (2004), "Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in wethered soil", *Engineering Geology*, Vol.75, pp.252-262.
16. 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.
17. Kim, J.H., Kim, Y.M., Lee, K.W., and Jeong, S.S. (2012), "A new prediction model (YS-Slope) for extreme rainfall-induced landslide hazard based on 3D spatial data", *KSCE Civil Expo special session*, pp.9-16.
18. Kim, S.K. (1994), "Instability of Cut slopes due to rainfall", *KGS Geotechnical Conference*, pp.25-47.
19. Mark, D. M. (1984), "Automated detection of drainage networks from digital elevation model", *Cartographica*, Vol.21, No.2, pp.168-177.
20. Mein, R.G. and Larson, C.L. (1973), "Modeling infiltration during a steady rain", *Water Resources Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
21. Motgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1994), "A physically based model for the topographic control on shallow landsliding", *Water Resources Research*, Vol.30, No.4, pp.1153-1171.
22. Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, C.N. (1998), "The SINMAP approach to terrain stability mapping", proceedings, *International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment*, 8th, Vancouver, British Columbia, Canada, pp.1157-1165.
23. Pradel, D. and Raad, G (1993), "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.119, No.2, pp.315-332.
24. Reddi, L.N. and Wu, T.H. (1991), "Probabilistic analysis of ground-water levels in hillside slopes", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.117, No.6, pp.872-890.
25. Sangrey, D.A., Harrop-Willimas, K.O., and Klaiiber, J.A. (1984), "Predicting ground-water response to precipitation", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.110, No.7, pp.957-975.
26. Soller, D.R. et al. (1999), "Proposed guidelines for inclusion of digital

- map products in the National Geologic Map Database”, Digital Mapping Techniques ‘99-Workshop Proceedings, *U.S. Geological Survey Open-File Report 99-386*, pp.35-38.
27. Soller, D.R. and Berg, T.M. (2003), “The National Geologic Map Database Project: Overview and Progress”, Digital Mapping Techniques '03 - Workshop Proceedings, *U.S. Geological Survey Open-File Report 03-471*.
28. Tarboton, D.G. (1997), “A New Method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models”, *Water Resources Research*, Vol.33, No.2, pp.309-312.
29. Topper, R., Spray, K.L., Bellis, W.H., Hamilton, J.L., and Barkmann, P.E. (2003), “Ground water atlas of Colorado”, *Colorado Geological Survey*.
30. Zonghu, L. et al. (2011), “Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)s predictive skill for hurricane-triggered landslide : a case study in Macon Country, North Carolina”, *Natural Hazards*, Vol.58, pp.325-339.

(접수일자 2013. 4. 18, 수정일 2013. 6. 5, 심사완료일 2013. 7. 22)