

불포화 사면의 포화 부근 침투 특성을 고려한 수리전도도 모델

A Hydraulic Conductivity Model Considering the Infiltration Characteristics Near Saturation in Unsaturated Slopes

오 세 봉¹ Oh, Se-Boong
박 기 훈² Park, Ki-Hun
김 준 우³ Kim, Jun-Woo

Abstract

Unsaturated hydraulic conductivity (HC) is integrated theoretically from soil water retention curves (SWRC) by Mualem capillary model, but the prediction of HC is extremely sensitive to small variation of matric suction near saturation. Near saturation, the Mualem HC based on smooth SWRC decreases abruptly and has problems in the reliability of hydraulic behavior and the stability of numerical solutions. To improve van Genuchten-Mualem (VGM) HC, the van Genuchten SWRC model is modified within range of low matric suction (arbitrary air entry pressure). At an arbitrary air entry pressure, the VG SWRC is linearized in log scale until full saturation. The modified VG SWRC does not affect the fit of actual retention behavior and either the parameters of original VG SWRC fit. Using the modified VG SWRC, the VGM HC is modified to integrate for each interval decomposed by arbitrary air entry pressure. An analytical solution on modified VGM HC is proposed each interval, to protect the rapid change in HC near saturation. For silty soils, VGM models of HC function underestimate the unsaturated permeability characteristics and especially show rapid reduction near saturation. The modified VGM model predicts more accurate HC functions for Korean weathered soils. Furthermore, near saturation, the saturated HC is conserved by the modified VGM model. After 2-D infiltration analysis of an actual slope, the hydraulic behaviors are compared for VGM and the modified models. The prediction by the proposed model conserved the convergence of solutions on various rainfall conditions. However, the solution by VGM model did not converge since the conductivity near saturation reduced abruptly for heavy rainfall condition. Using VGM model, the factor of safety is overestimated in both initial and final stage during heavy rainfall. Stability analysis based on infiltration analysis could simulate the actual slope failure by the proposed model on HC.

요 지

불포화 수리전도도는 Mualem 모세관 모델에 의하여 이론적으로 함수특성곡선으로부터 적분된다. 하지만 예측된 수리전도도는 포화 부근에서 모관흡수력의 미소한 변화에도 극도로 민감하다. 원활한 형태의 함수특성곡선에 의한 Mualem 수리전도도는 포화 부근에서 급격하게 감소하며, 수리적 거동을 신뢰할 수 있게 모델하지 못하거나 수치

1 정회원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., Tel: +82-53-810-3512, Fax: +82-53-810-4622, sebungoh@yu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 도담엔지니어링 (Dodam Engrg.)

3 비회원, 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

해의 안정성을 저해한다. van Genuchten- Mualem(VGM) 수리전도도를 개선하기 위하여, 낮은 모관흡수력 수준에 있는 임의의 공기함입치이내에서 van Genuchten 함수특성곡선을 수정하였다. 수정 VG 곡선은 대수축에서 임의의 공기함입치에서 포화상태까지 선형화된다. 수정 VG 함수특성곡선은 실제 함수특성거동의 회귀분석에 영향을 끼치지 않으며 원래의 VG 함수특성곡선의 계수를 그대로 사용한다. 수정 VG 곡선을 이용하여, VGM 수리전도도는 임의의 공기함입치를 기준으로 구간별 적분하여 수정되었다. 수정 VGM 수리전도도가 해석적 해로 제안되었으며, 포화부근 영역에서 수리전도도가 급격하게 감소하는 현상이 제거되었다. 실제 사면의 2차원 침투해석을 통하여 VGM 수리전도도와 제안된 모델에 따른 수리거동을 비교하였다. 제안된 모델은 여러 강우조건에 따른 해의 수렴성을 확보하였지만, VGM 수리전도도를 적용하면, 포화부근의 수리전도도가 급격하게 감소하여 강우량이 많은 경우 해가 수렴하지 않았다. 특히 선행강우에 의한 초기 안전율과 집중강우 후 최종 안전율을 크게 평가할 수 있었다. 제안된 수리전도도 모델은 침투해석과 안정해석을 통하여 실제 사면의 붕괴를 재현할 수 있었다.

Keywords : Soil water retention curves, Hydraulic conductivity, Unsaturated soils

1. 서론

불포화토의 수리전도도 (hydraulic conductivity)는 지하수위 위에 존재하는 불포화 사면에서 지반의 수리 특성을 파악하는데 중요한 지반특성이다. 실험적으로 대상지층마다 침투속도 특성을 파악하는 것이 필요하지만 시간이 많이 소요되고 특수 제작된 시험장비를 필요로 한다. 이러한 이유로 지반 내 수분특성을 표현하는 함수특성곡선으로부터 불포화 수리전도도 함수를 추정하는 연구가 많이 진행되어 왔다(Kunze et al., 1968; Campbell, 1973; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Fredlund et al., 1994). 특히 van Genuchten 함수특성 모델의 경우, 함수특성곡선의 계수로부터 직접적으로 수리전도도 함수를 얻을 수 있어 많이 적용되어 왔다.

하지만 Vogel et al.(2001)에 의하면, van Genuchten 모델로부터 추정된 수리전도도는 낮은 모관흡수력 범위에서 포화도 변화가 과다하게 발생한다. 이로 인하여, 포화도 높은 상태에서 침투해석시에는 수치적인 불안정성을 야기하고 해가 수렴하지 않거나 해의 불규칙적인 진동이 일어난다. 또한 국내 풍화토에 대한 비교에서도 van Genuchten 모델을 비롯한 대부분의 함수특성곡선으로부터 추정한 수리전도도 모델이 실험값보다 과소하게 나타났다(Kim, 2009).

본 연구에서는 비교적 함수비 변화가 크지 않은 낮은 모관흡수력 범위의 van Genuchten 함수특성곡선을 영역별로 세분화하여 수정 모델을 제시한다. 이를 통하여, 추정된 불포화 수리전도도가 낮은 모관흡수력 범위에서 과다하게 과소평가되는 것을 개선하고자 하였다. 특

히 불포화 사면의 침투를 고려한 안정성 해석시에, 지층의 수리특성이 해석결과에 끼치는 효과를 분석하였다.

2. 함수특성곡선과 수리전도도

2.1 van Genuchten-Mualem 모델

함수특성곡선(Soil water retention curve, SWRC)은 흙 조직에 존재하는 간극수의 부피와 모관흡수력의 관계로 정의된다. 이 때 간극수의 부피는 체적함수비 θ 또는 유효 포화도 θ 를 변수로 나타내며, 유효 포화도는 다음과 같이 정의된다:

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

여기서 θ_s 는 포화 함수비이고 θ_r 는 잔류 함수비이다. 사질토와 같이, θ_r 이 0인 경우에 θ 는 포화도와 동일하다.

van Genuchten(VG) 모델(1980)에 의한 SWRC는 θ 와 모관흡수력 p 간에 다음과 같은 관계를 나타낸다:

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + \{\alpha p\}^n} \right]^m \quad (2a)$$

$$p = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{\theta^{1/m}} - 1 \right]^{1/n} \quad (2b)$$

여기서 α 는 공기 함입치 p_b 의 역수이며, n 은 간극크기 스펙트럼 계수이고 $m=1-1/n$ 이다. p 는 간극공기압과 간

극수압의 차로 정의되며, 대기압 하에서는 수압의 -1배에 해당한다.

Mualem(1976)에 의하면, 상대 수리전도도 K_r 은 함수 특성곡선의 관계로부터 다음과 같이 예측할 수 있다:

$$K_r(\theta) = \theta^l \left(\int_0^\theta \frac{d\theta}{p} \right)^2 / \left(\int_0^1 \frac{d\theta}{p} \right)^2 \quad (3a)$$

$$K_r(\theta) = K_s K_r(\theta) \quad (3b)$$

여기서 K_s 는 포화 수리전도도이며, 식 (4b)로부터 불포화토의 수리전도도 K 를 계산할 수 있다. l 은 간극 연결성 계수로 통상 0.5로 가정한다(Mualem, 1976).

식 (3a)에 피적분 함수는 함수특성곡선으로부터 구한다. 즉 식 (2b)를 식 (3a)에 대입하면 다음과 같이 상대 투수계수를 예측할 수 있다(VGM 모델):

$$K_r(\theta) = \theta^{l/2} \int (\theta)^2 / f(1)^2 \quad (4a)$$

$$f(\theta) = \alpha \{1 - (1 - \theta^{1/m})\}^m \quad (4b)$$

여기서

$$f(\theta) \equiv \int_0^\theta \frac{d\theta}{p} = \int_0^\theta \alpha \left(\frac{\theta^{1/m}}{1 - \theta^{1/m}} \right)^{1/n} d\theta \quad (4c)$$

Fig. 1에서는 특정한 SWRC($p_b = 27.1\text{kPa}$, $n=1.1$)에 대한 불포화토의 수리특성을 보여준다. Fig. 1(a)에서 보여지듯이, SWRC에서는 모관흡수력이 p_s 미만의 수준에서는 거의 포화상태이고 함수특성에는 거의 영향을 끼치지 않는 구간이다. 하지만, 식 (4)에 의하여 불포화 수리전도도를 예측할 때에는 이 부분의 형태가 큰 영향을 끼친다. Fig. 1(b)에서 θ 가 1일 때 $1/p$ 은 무한대로 접근하므로, 식 (4)의 VGM 모델에서 K_r 은 급격하게 떨어진다. 특히 n 이 1.5보다 작을 때에는 Fig. 1(c)에서 보여지듯이, VGM 모델은 모관흡수력이 매우 낮은 포화상태 부근에서 K_r 은 급격하게 감소한다(Vogel et al., 2001). 이로 인하여 VGM모델은 모관흡수력의 전반적인 범위에서 수리전도도를 매우 과소평가하는 경향이 나타난다.

특히 VGM모델은 포화상태 부근에서 수리전도도의 급격한 변화를 나타내므로, 비선형 침투해석시에 수치

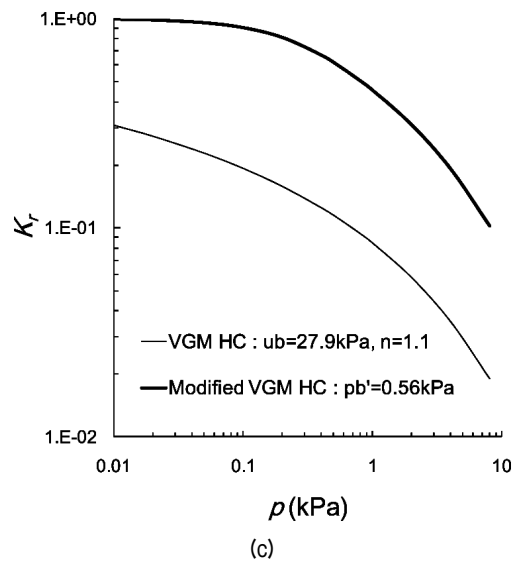
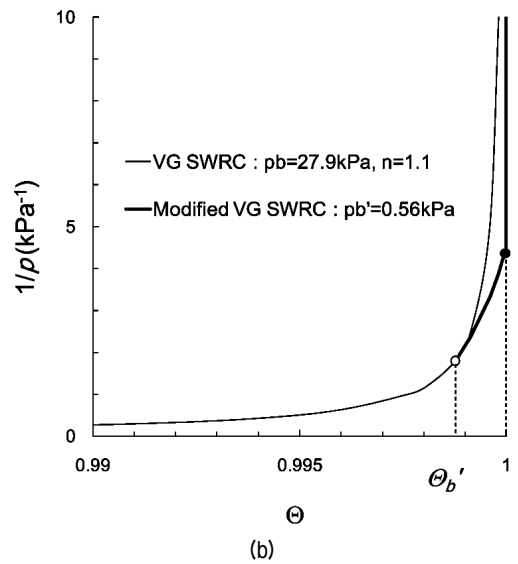
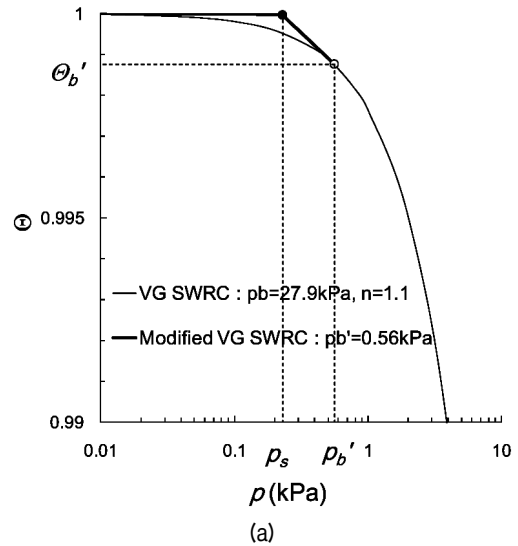


Fig. 1. Conceptual illustration on the relation between (a) soil water retention curve, (b) integrand in Mualem theory and (c) hydraulic conductivity in both VGM model and modified model

적인 불안정성을 야기한다. 이로 인하여 해가 수렴하지 않거나 해의 불규칙적인 진동(oscillation)이 일어난다.

이를 보완하기 위하여 Vogel et al.(2001)은 Brooks and Corey 모델(1964) 형태의 함수특성곡선으로 수정하였으며, SWRC의 비선형성을 유지하기 위하여 최소 공기함입치를 정의하였다. 하지만 최소 공기함입치를 설정하는 것이 애매하고, SWRC를 VG모델과 상이하게 다시 회귀분석해야 한다. 따라서 VG 모델을 이용하여 편리하게 수리전도도를 수정하는 방법을 찾을 필요가 있다.

2.2 수정 수리전도도 모델

Fig. 1(a)에서, p_b' 은 비선형적인 SWRC의 가상적인 공기함입치로서, 식 (2)에 나타난 VG 곡선의 공기함입치 p_b 와 같거나 낮은 값을 가진다. θ_b' 은 p_b' 에 상응하는 유효 포화도이다. VG 곡선을 p_b' 로부터 접선방향으로 대수축에서 선형화하면, 유효 포화도가 1일 때 p_s 를 정의할 수 있으며, Brooks and Corey 모델(1964)과 유사한 형태로 수정 모델을 구축할 수 있다. 수정 SWRC 모델에서, p 가 p_s 보다 작은 경우에는 $\theta=1$ 이고 p 가 p_b' 보다 큰 경우에는 식 (3)의 VG 모델과 동일하다.

Fig. 1(a)에서 보여진 수정 VG 모델에 따른 SWRC곡선은 다음과 같이 나타난다:

$$p = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{\theta^{1/m}} - 1 \right]^{1/n}, \quad \theta < \theta_b' \quad (5a)$$

$$p = p_b' \exp\{a(\theta - \theta_b')\}, \quad \theta_b' \leq \theta < 1 \quad (5b)$$

$$0 \leq p < p_s, \quad \theta = 1 \quad (5c)$$

이 때

$$p_s = p_b' \exp\{a(1 - \theta_b')\} \quad (5d)$$

이다. Fig. 1(a)의 $p-\theta$ 면에서, p_b' 에서 VG 곡선의 접선 기울기는 다음과 같이 유도된다:

$$a \equiv \left. \frac{d \ln p}{d \theta} \right|_{\theta = \theta_b'} \quad (6a)$$

$$a = \frac{\{1 + (\alpha p_b')^n\}^{m+1}}{-mn(\alpha p_b')^n} \quad (6b)$$

Mualem 이론에 의한 수리전도도는 각 구간에서 상응하는 함수특성곡선 함수를 다음과 같이 적분한다:

$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} \frac{\left(\int_0^{\theta_b'} \frac{d\theta}{p} + \int_{\theta_b'}^{\theta} \frac{d\theta}{p} \right)^2}{\left(\int_0^{\theta_b'} \frac{d\theta}{p} + \int_{\theta_b'}^1 \frac{d\theta}{p} \right)^2} \quad (7)$$

식 (5)를 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 상대투수계수를 수정할 수 있다.

$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} \frac{\{f(\theta)\}^2}{\{f(\theta_b') + g(1)\}^2}, \quad \theta < \theta_b' \quad (8a)$$

$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} \frac{\{f(\theta_b') + g(\theta)\}^2}{\{f(\theta_b') + g(1)\}^2}, \quad \theta_b' \leq \theta < 1 \quad (8b)$$

$$K_r(\theta) = 1, \quad \theta = 1 \quad (8c)$$

여기서 함수 $f(\theta)$ 는 VG 함수특성곡선(식 (5a))을 이용하여 적분한 함수이며, 함수 $g(\theta)$ 는 수정 VG 곡선(식 (5b))을 이용하여 적분한 함수이다. $\theta \leq \theta_b'$ 인 경우, $f(\theta)$ 는 식 (4b)와 같으며, $\theta = \theta_b'$ 인 경우에는 다음과 같다.

$$f(\theta_b') = \alpha \{1 - (1 - \theta_b'^{1/m})^m\} \quad (9)$$

$\theta_b' \leq \theta < 1$ 인 경우, $g(\theta)$ 는 식 (5b)를 대입하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$g(\theta) \equiv \int_{\theta_b'}^{\theta} \frac{d\theta}{p} = \int_{\theta_b'}^{\theta} \frac{d\theta}{p_b' \exp\{a(\theta - \theta_b')\}} \quad (10a)$$

$$g(\theta) = -\frac{1}{a} (1/p(\theta) - 1/p_b') \quad (10b)$$

여기서 $\theta = 1$ 인 경우에는,

$$g(1) = -\frac{1}{a} (1/p_s - 1/p_b') \quad (10c)$$

식 (4c), (9)와 (10c)를 대입하면, 식 (8a)가 구해진다. 그리고 식 (9), (10b)와 (10c)를 대입하면, 식 (8b)가 완성된다. 포화시 $\theta=1$ 인 경우에는 수리전도도의 정의에 따라 식 (3a) 또는 식 (7)에 의하여 K_r 은 1이다.

Fig. 1(b)에서 보여지듯이 수정된 SWRC는 포화시에 $1/p$ 가 유한한 값이 되며, 이를 식 (7)에 의하여 구간별로 적분하면 Fig. 1(c)와 같이 나타난다. 모관흡수력이 낮을 때 수정 곡선은 급격한 감소가 일어나지 않고 K_r 이 서서히 변화하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 VG 모델에 비하여 수치적인 안정성을 개선할 수 있다. 그리고, SWRC가 미세한 차이를 보이지만, K_r 은 VGM 모델에 비하여 매우 증가하고 있음을 알 수 있다. 수정 K_r 은 VG 모델로 SWRC를 회귀분석하면 식 (8)에 의하여 간편하게 구할 수 있었다.

Fig. 2에서는 p_b '이 SWRC와 K_r 에 끼치는 영향을 보여주고 있다($p_b = 27.9\text{kPa}$, $n=1.1$). p_b '는 VG 모델을 수정하며 실제 실험치를 적절하게 회귀분석하여야 한다. Fig. 2(a)에서는 p_b '이 식 (2a)에서 구한 VG 곡선의 p_b 와 같은 경우와 $p_b/50$ 인 경우를 비교하였다. p 축은 p_b 까지 나타내서 p_b '이 27.9kPa 와 같은 경우에 VG 곡선과 차이가 뚜렷하게 나타나 보인다. 이와 같은 범위에서 p_b '이 0.56kPa 인 경우에는 비선형적인 VG 곡선과 거의 일치하는 것으로 나타난다. 두 경우 모두 전반적인 p 축 범위에서는 함수특성에 대하여 VG 곡선과 큰 차이를 나타내지 않는다고 볼 수 있다. p_b '이 너무 작은 경우에는 K_r 이 VGM 모델과 같이 해의 수렴성을 해칠 우려가 있다. 따라서 p_b '이 가능한 범위를 $p_b/50 \sim p_b$ 로 설정하였다.

정하였다.

Fig. 2(b)에서 보여지듯이, VGM 모델의 경우에 K_r 은 포화상태 부근에서 급격하게 감소하고 전반적인 값이 가장 낮게 나타나고 있다. 반면 수정 VGM 모델은 K_r 이 VGM 모델보다 크게 나타나고 포화시에 1의 값을 유지하고 있다. p_b '이 27.9kPa 인 경우에는 0.56kPa 인 경우보다 K_r 이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 실제 SWRC에 대한 VG 모델을 근사화하기 위하여, $p_b/50$ 인 경우가 더 합리적이라고 판단할 수 있다.

2.3 불포화토의 유효응력에 따른 사면안정해석

유효응력 가설에 의하여 변포화토(variably-saturated soils)의 파괴규준은 유일하게 정의되며(Khalili et al., 2004; Lu and Likos, 2006, Oh et al., 2012), Mohr-Coulomb 규준에 의거하여 다음과 같이 기술된다:

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (11)$$

여기서 τ_f 와 σ'_f 는 파괴시 파괴면에서의 전단응력 및 유효 수직응력이며, c' 는 포화시 점착력이고 ϕ' 는 포화시 마찰각이다. 변포화토의 유효응력은 흡수응력 σ^s 개념에 의거하여 다음과 같이 일반화할 수 있다(Lu and Likos, 2006):

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (12)$$

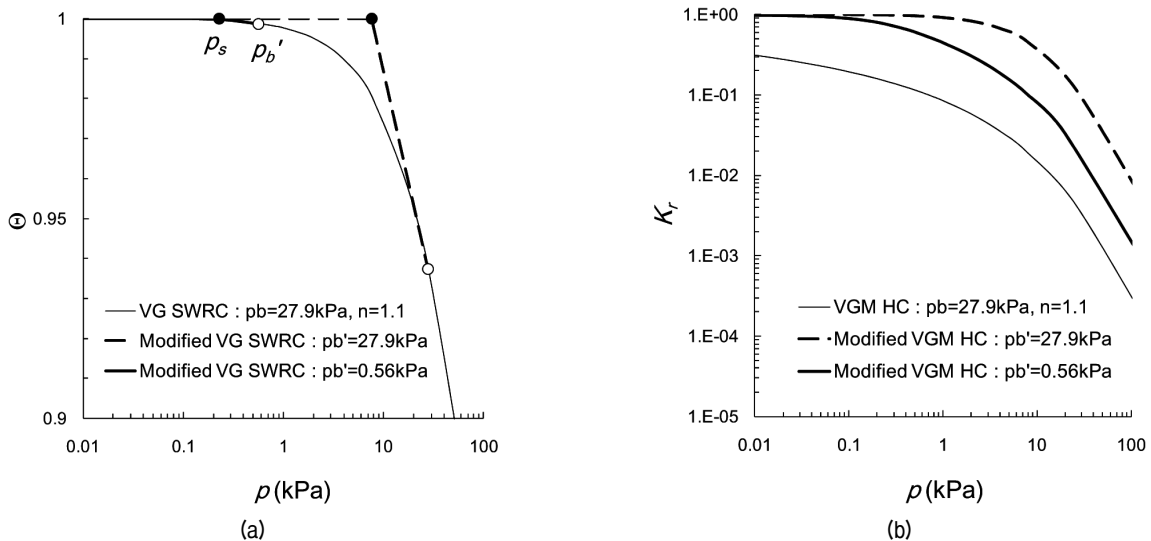


Fig. 2. The effect of p_b ' on (a) soil water retention curve and (b) hydraulic conductivity in both VGM model and modified model

흡수응력은 모관흡수력의 함수로 나타나며, 이를 흡수응력 특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)이라고 한다. 대기압하 ($u_a=0$)에서, 유효응력은 전응력과 흡수응력의 차($\sigma-\sigma^s$)에 의하여 정의된다. 흡수응력은 닫힌 형식 방정식으로 유도된다(Lu et al., 2010):

$$\sigma^s = -p \left[\frac{1}{1 + (\alpha p)^n} \right]^{1-1/n} \quad (13)$$

사면안정해석과 같은 한계해석 이론(limit analysis theory)도 포화시에 적용된 것과 마찬가지로 불포화 조건에서도 적용될 수 있다(Lu et al., 2013). 사면에서는 강우에 의하여 불포화층에서 침투가 일어나고 습윤화되어 포화되면 흡수응력은 증가하여 0에 도달한다. 불포화 유동시 간극수압의 변화를 포착하면, 흡수응력은 용이하게 결정된다. 따라서 전응력 분포를 평가한 후 유효응력을 계산할 수 있다. 그리고 활동면에서 작용하는 전단응력과 유효응력에 의한 전단강도를 비교하여 안정성을 평가할 수 있다. 안전율은 한계평형법에 의하여 평가한다. 간극수압과 체적함수비는 부정류 해석에 의하여 계산되며 각 적분점에서 구한 상태변수는 절점으로 투영된다. 그리고 각 요소의 평균값으로부터 절편 저면의 중심부에서 나타나는 모관흡수력을 평가한다. 흡수응력은 식 (13)에 의하여 계산되며, 전단강도는 식 (11)에 의하

여 흡수응력에 근거한 유효수직응력으로부터 계산할 수 있다.

해석 절차는 불포화 침투해석과 안정해석을 단계적으로 수행하며(Oh et al., 2012), Geostudio 2007(Geo-slope, 2007) 코드를 이용하여 수행하였다. 강우조건에 대한 부정류 유한요소해석을 수행하여 사면 지층의 간극수압을 구한다. 그리고 한계평형해석시 시간에 따른 안전율을 평가하기 위하여, 현장 파괴면 및 예비해석을 통하여 활동면을 설정하였다. 주어진 활동면에 대하여 작용응력 및 유효응력에 기반한 전단강도를 구한다.

3. 강우 침투를 고려한 안정해석

3.1 수리전도도가 침투해석에 미치는 효과

VGM 모델에 의한 수리전도도가 침투해석에 미치는 효과를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같은 대상사면을 설정하였다. 지층은 이암을 모암으로 하는 잔류토층으로 이루어져 있고 경사는 1:1.2이다. 대상사면은 포항지역 도로현장의 절토사면으로서, 2010년 10월말에 절토를 완료하였고 2011년 6월 27일에 붕괴하였다. 붕괴시 일강우량 100mm 이상의 집중강우(3개월간 누적 강우량: 600mm 이상)가 발생하였다. 사면 붕괴시 5일간 강우량은 Table 1과 같다. Table 1에서는 각각의 일 강우기록

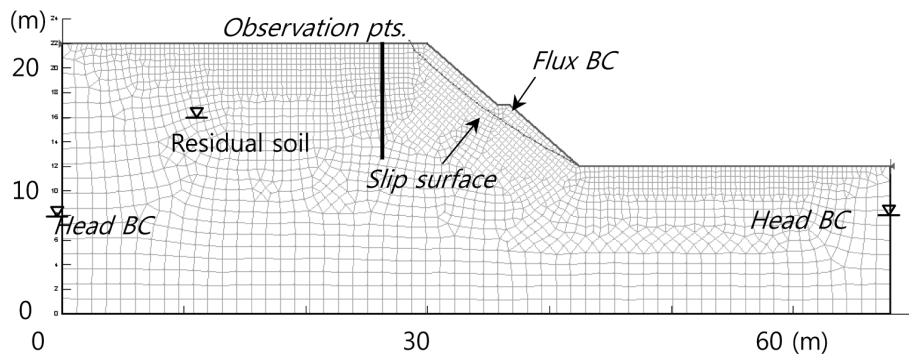


Fig. 3. Mesh for infiltration analysis

Table 1. Rainfall records in the slope site

Date	Rainfall (mm)	Intensity, I (m/s)	I/k _s (daily)	I/k _s (3days)	I/s (5days)
2011-06-22	2.5	2.89E-08	0.017	0.338	0.207
2011-06-23	3	5.79E-09	0.003		
2011-06-24	3.1	1.16E-09	0.001		
2011-06-25	55.1	6.02E-07	0.348		
2011-06-26	154.1	1.15E-06	0.665		

에 대하여 24시간 평균 강우강도를 계산하고 포화투수 계수와 비율을 나타내고 있다.

Fig. 3에서 보여지듯이, 요소망의 양측면에서는 수두 경계조건을 지하수위에 맞추어 설정하였고 하부면에는 유량을 0으로 설정하였다. 지표면에는 유량경계조건을 강우강도에 따라 설정하였다. 활동면은 시간에 따른 안전율 변화를 분석하기 위하여, 현장에서 관찰한 실제 활동면을 기준으로 예비해석을 통하여 미리 결정하였다.

대상 현장에서 불교란시료 및 교란시료를 채취하여 실내시험을 수행하였으나, 함수특성과 전단강도 시험에서 불교란시료를 이용한 결과를 일관되게 획득하기는 어려웠다. 불가피하게 현장 함수비 및 밀도하에서 정적 다짐으로 교란시료를 재성형하여 시험을 수행하였다. 압력관추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 van Genuchten 모델로 회귀분석을 하였다(van Genuchten et al., 1991). 공기함입치 p_b 와 계수 n , 포화 체적함수비 θ_s , 잔류함수비 θ_r 은 Table 2에 정리되었다. Fig. 1에서는 이 계수에 따른 함수특성곡선과 수리전도도를 보여준다. 예비 해석과정에서 선행적으로 계수 연구를 통하여 포화투수계수를 설정하였다. 전단강도를 산정하기 위하여 포화조건에서 직접전단시험을 수행하였고, 불포화조건에서는 모관흡수력을 조절하여 삼축시험을 수행하였다.

본 연구에서는 동일한 초기조건에서 부정류 침투효과를 비교하기 위하여 정수압 분포를 설정하였다. Fig.

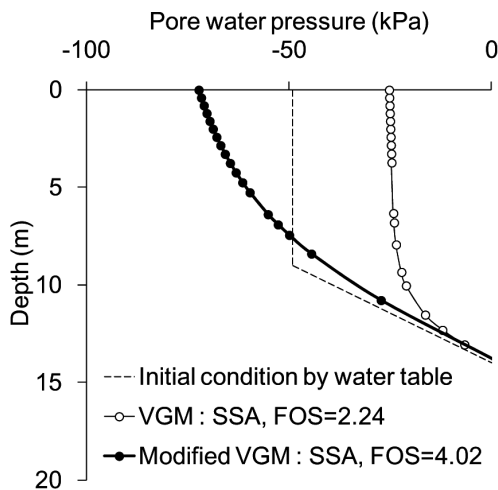


Fig. 4. Initial pore water pressure distribution with depth

4에서는 초기조건시 관찰 지점(observation points, Fig. 3)에서 깊이에 따른 수압분포를 보여준다. 초기조건은 지하수위(깊이 14m)에 의하여 정수압분포를 이루며, 과소한 수압분포를 제한하기 위하여 최소수두 -5m(-49kPa)를 설정하였다.

선행강우로 인하여 발생하는 간극수압이나 포화도는 정상류해석을 통하여 구할 수 있다. Fig. 1(c)에 나타난 두 가지 수리전도도에 대하여 유량 $5.60e-9m/s$ (1달간 45mm)이 발생하였을 때 정상류해석을 수행하였다.

Fig. 4에서 보여지듯이, 제안된 수정VGM 모델의 경우 간극수압은 지표에서는 -72kPa로 깊이가 깊어지면서 서서히 증가하여 정수압 분포에 수렴하면서 지하수위에 도달하면 0kPa가 된다. VGM 모델에서는 지표부근에서는 -25kPa로 거의 일정하지만 지하수위 부근에서 정수압분포에 접하는 양상으로 나타난다.

Fig. 1(c)에서 보여지듯이 VGM 모델은 모관흡수력 0.01kPa에서 포화 전도도 ($K_r=1.0$)보다 80% 감소한다. 그리고 Fig. 2(b)에서 보여지듯이 100kPa까지 전 범위에 대하여 수리전도도를 매우 과소평가한다. 이로 인하여 작은 선행강우에 대하여 지층내로 침투속도가 느려서 포화도가 크게 발생하므로, 수정 모델에 비하여 간극수압을 3배 정도 과대평가하였다. 이러한 결과는 추후 안전해석에도 큰 영향을 끼친다.

정상류해석에 따른 간극수압 분포는 정수압 분포에 비하여 낮은 수압분포를 나타낸다. 그러나 Fig. 4에 나타난 정수압 변화 양상은 최소 정수압을 -49kPa로 설정하여서 VGM 및 수정 VGM수리전도도에 대한 정상류해석 결과와 유사하며, 그 값은 두 정상류해석의 중간 정도로 나타났다. 결국 VGM 모델에 따른 수압분포는 사면의 초기 안전율을 가장 크게 평가할 것이다.

지하수위에 의한 정수압 분포(Fig. 4)를 초기조건으로 설정하고 부정류 침투해석을 수행하였다. 지표로부터 하부 9m 깊이까지는 최소수압 -49kPa를 설정하여서 포화도 93%로 일정한 상태이다. Fig. 5(a)에서는 상대적으로 낮은 강우강도 0.1k에 대하여 1일 지속하였을 때, 지표 부근을 중심으로 시간에 따른 간극수압의 변동을 보여준다. VGM 모델에 의한 수리전도도를 이용한 해석 결과, 지표에서는 포화도가 증가하여 1일 후 간극수압

Table 2. Geotechnical and hydromechanical properties of the three cut slope materials

c' (kPa)	ϕ' (°)	γ_t (kN/m ³)	k_s (m/s)	θ_s	θ_r	p_b (kPa)	n
0	31.6	18.4	3.46×10^{-6}	0.398	0.12	27.93	1.1

이 거의 0kPa(포화도 100%)에 도달한다. 그리고 깊이 1.2m 위치에서는 수리전도도가 낮아서 침투수가 도달하지 않으므로 간극수압이 거의 변화하지 않고 있다. 반면 제안된 수정 VGM 모델에 의하면, 지표(0m)에서는 시간이 지남에 따라 간극수압이 증가하여 포화도가 97%까지 증가하고 간극수압이 최대 -15kPa까지 증가하였다. 또한 1.2m 깊이에서는 초기 1/4일(6시간)까지는 간극수압이 변하지 않지만 서서히 증가하여 -38kPa까지 증가하였다.

Fig. 5(b)에서는 0.1 k_s 에 대하여 1일 후 깊이에 따른 간극수압 분포를 보여준다. VGM 모델은 제안된 모델보다 수리전도도가 낮아서 침투속도가 느리고 얕은 깊

이에서만 침투가 발생하였다. 이로 인하여 지표부근에서는 포화도와 간극수압이 급격하게 증가하고 1.2m 이하에서는 간극수압이 초기상태로 남아있다. 반면, 제안된 모델은 침투가 원활하게 이루어지고 2.5m 깊이까지 침투수가 도달하였다. VGM 모델은 낮은 모관흡수력 수준에서 수리전도도를 낮게 평가하므로 간극수의 침투속도를 낮게 평가한다. 따라서 강우강도가 큰 경우(예를 들어 포화 수리전도도 k_s 와 유사한 수준인 경우), 지표부근 지층은 포화되고 지층내로의 침투속도는 강우강도에 비하여 매우 더디어서 지층 내로 침투가 발생하지 않고 지표수로 유출되거나 지표에 저수되도록 시뮬레이션할 수 있다.

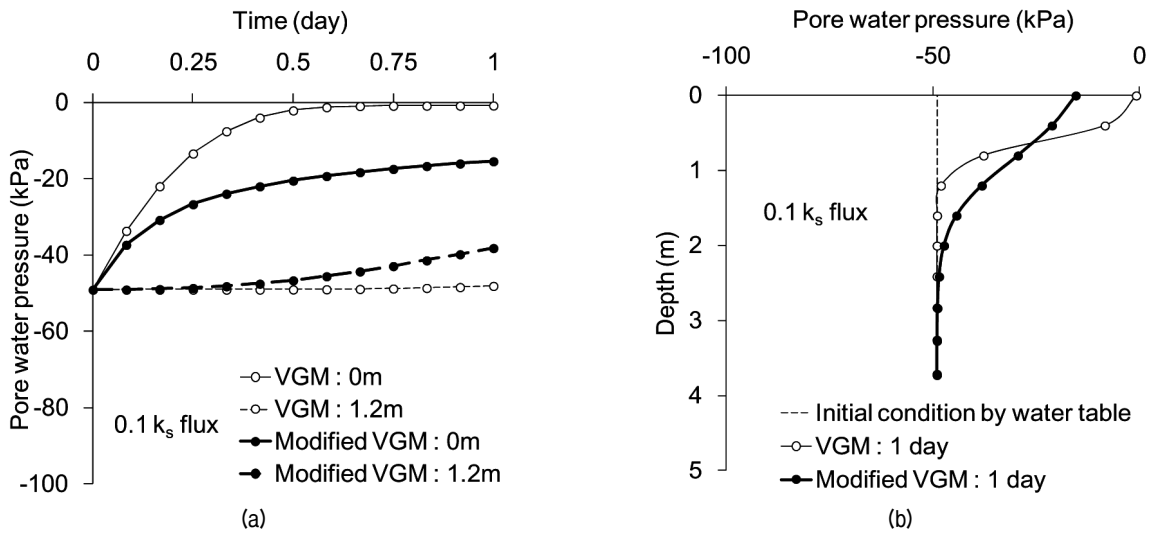


Fig. 5. The variation of pore water pressure in transient analysis by both VGM and modified VGM models: (a) pore water pressure vs. time in depths of 0 and 1.2m and (b) pore water pressure vs. depth at 1 day

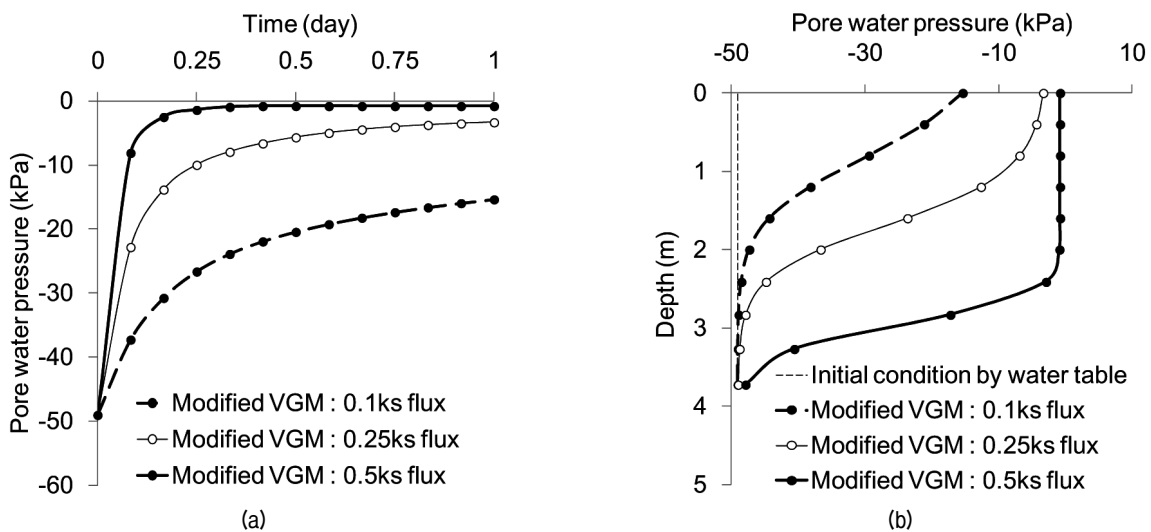


Fig. 6. The variation of pore water pressure in transient analysis by modified VGM model: (a) pore water pressure vs. time in surface and (b) pore water pressure vs. depth at 1 day

지속기간 24시간에 대하여 강우강도 $0.5k_s$ 인 경우에 대한 침투해석을 수행하였다. VGM 모델은 강우강도 $0.5k_s$ 인 경우에 해가 수렴하지 않았다. 이러한 경우는 VGM 모델을 적용한 비선형 침투해석시, 포화상태 부근에서 K_r 은 급격하게 감소하기 때문에 나타나는 결과이다 (Vogel et al. 2001). 반면 제안된 모델은 대하여 강우강도가 $0.5k_s$ 뿐 아니라 k_s 인 경우에도 해가 수렴하였다.

제안된 수리전도도 모델에서는 VG 함수특성을 유지하며 VGM 모델의 침투 해 수렴성을 개선하였다. 수정 VGM 모델을 적용한 침투해석 시에는 포화도가 큰 지층에서 해를 구할 수 있었다. Fig. 6에서는 강우강도 $0.1k_s$, $0.25k_s$, $0.5k_s$ 인 경우의 침투해석 결과를 보여준다. 강우강도가 증가할수록 간극수압은 증가하여 강우강도 $0.5k_s$ 인 경우에는 6시간 경과 후 간극수압이 거의 0에 도달하였고(Fig. 6(a)), 24시간 경과 후 2.5m 깊이까지 포화되었다(Fig. 6(b)). 하지만 강우강도 $0.25k_s$ 인 경우에는 24시간 경과 후에도 완전 포화되지 않고 간극수압이 깊이 따라 $-3 \sim -49kPa$ 으로 분포한다(Fig. 6(b)).

3.2 수리전도도가 사면안정해석에 미치는 효과

침투해석 결과로부터 불포화 유효응력을 고려하여 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 7에서는 부정류 침투에 따른 간극수압의 변동을 고려한 안전율을 보여준다. 강우강도 $0.1k_s$ 인 경우에, VGM 모델은 안전율이 초기 3.7에서 3.0으로 감소하였고 제안된 모델은 2.7로 감소하여 10% 정도의 차이를 나타낸다. 강우강도 $0.5k_s$ 인 경우에,

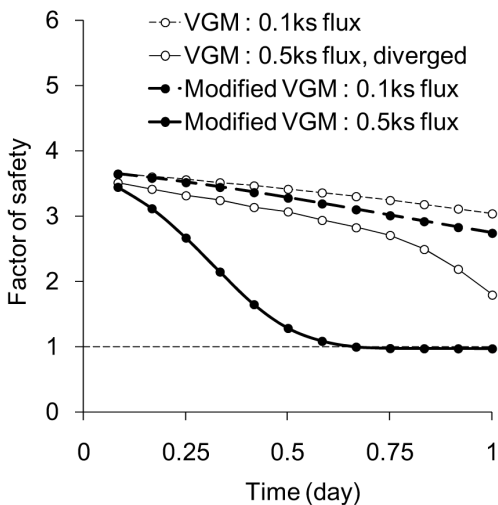


Fig. 7. Factor of safety with respect to time by rainfall infiltration using VGM model and modified VGM model

VGM 모델은 침투해석시 해가 발산하였지만 안전율이 초기 3.7에서 1.8로 감소하였다. 반면 제안된 모델은 1.0으로 감소하여 사면의 붕괴를 예측할 수 있었다.

앞서 기술하였듯이, 대상사면은 실제 강우에 의하여 붕괴한 사면으로 Table 1과 같이 2011년 6월 26일 $0.67k_s$ 의 일 강우가 발생한 후 붕괴하였다. Fig. 6에서 나타난 제안된 수리전도도 모델에 의한 안정해석에서는 일 강우량 $0.5k_s$ 이 1일 지속된 경우에 안전율이 1.0에 도달한다. 6월 25일 발생한 일 강우량 $0.35k_s$ 보다 크고 6월 26일 $0.67k_s$ 보다 작은 강우조건에서 사면의 붕괴를 정확하게 시뮬레이션 할 수 있었다.

불포화 사면의 설계조건에서는 100년 빈도 수준의 매우 큰 확률 강우강도를 요구하고 있다. 또한, 통상적인 소프트웨어에서는 사면안정해석 시에 발산한 침투 해에 대하여 안전율을 도출한다. VGM 모델은 $0.1k_s$ 보다 큰 강우조건에서는 침투해석 해가 수렴하지 않았고, 발산 해에서는 안전율은 과다하게 평가하였다. 이러한 경우에 설계 과정에서 침투해석시 해를 구하지 못하고 안전율을 과대평가하는 오류를 범할 우려가 있다. 또한 VGM 모델은 침투해석시 해가 수렴할지라도, Fig. 4에서 나타난 바와 같이, 정상류 해석을 통하여 초기조건을 설정하는 경우에는 안전율을 더욱 크게 평가하고 Fig. 5의 부정류 해석절차에서는 안전율의 변화가 별로 나타나지 않게 된다.

VGM 수리전도도를 적용하면, 포화부근의 수리전도도가 급격하게 감소하여 강우량이 많은 경우 해가 수렴하지 않았다. 특히 선행강우에 의한 안전율을 과대평가하고 집중강우시 안전율의 변화를 작게 평가할 수 있었다. 이로 인하여 최종안전율을 과대평가하는 경향이 있다. 반면 제안된 수리전도도 모델은 침투해석과 안정해석을 통하여 실제 사면의 붕괴를 적절하게 재현할 수 있었다.

Fig. 8에서는 수정 VGM 모델을 이용한 침투해석(Fig. 6)에 대한 안정해석 결과를 보여준다. 강우강도 $0.25k_s$ 인 경우에는 24시간 후 안전율이 1.5에 도달하였고 강우강도 $0.5k_s$ 인 경우에는 1.0에 도달하였다. Table 1에서 보여지듯이 사면 붕괴이전 3일 평균강우량과 5일 평균강우량은 각각 $0.34k_s$, $0.21k_s$ 였다. 3일 및 5일 평균 강우량, 6월 25일 발생한 일 강우량 $0.35k_s$ 로는 사면이 붕괴가 일어나지 않는 것을 예측한다. 하지만 6월 26일 $0.67k_s$ 로 인하여 안전율이 1미만으로 감소하고 다음날 발생한 붕괴를 정확하게 시뮬레이션 할 수 있었다.

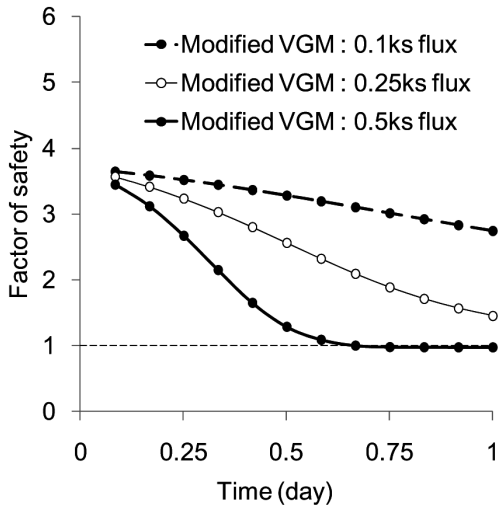


Fig. 8. Factor of safety with respect to time by rainfall infiltration using modified VGM model

불포화 사면의 안정성 해석시에는 비선형 침투해석의 수렴성이 중요한 영향을 끼친다. VGM 수리전도도는 n 이 1.5보다 작은 경우에 포화 부근에서 해의 발산이 일어날 수 있다. 국내 풍화토나 실트질 흙의 우에는 n 이 1.5보다 작아서 해가 수렴하지 않는 경우가 빈번하게 일어난다. 제안된 모델은 VG 함수특성곡선의 계수 p_b 와 n 을 이용하여 해의 수렴성을 확보할 수 있는 수리전도도를 제안하였다. p_b 만 $p_b/50$ 에서 설정하면 추가적인 입력치가 필요하지 않아서 매우 간편하고 실용적이다.

그런데 국내 풍화토에 대한 실내시험 결과에서는 van Genuchten 모델을 비롯한 대부분의 함수특성곡선으로부터 추정된 수리전도도 모델이 실험값보다 과소하게 나타났다(Kim, 2009; Oh and Kim, 2014). 이러한 원인 중의 하나는 식 (3a)에 나타난 간극 연결성 계수 l 을 0.5로 가정하였기 때문이다. 간극 연결성 계수 l 은 실험적인 계수로서 (Mualem, 1976) 국내 풍화토에 적합한 값을 적용해야 한다. 따라서 식 (8)의 상대투수계수는 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$K_r(\theta) = \theta' \frac{\{f(\theta)\}^2}{\{f(\theta_b') + g(1)\}^2}, \quad \theta < \theta_b' \quad (14a)$$

$$K_r(\theta) = \theta' \frac{\{f(\theta_b') + g(\theta)\}^2}{\{f(\theta_b') + g(1)\}^2}, \quad \theta_b' \leq \theta < 1 \quad (14b)$$

$$K_r(\theta) = 1, \quad \theta = 1 \quad (14c)$$

Oh와 Kim(2014)에 의하면 국내풍화토에 대하여, 수정 VGM 모델에서 p_b 가 $p_b/50$ 이고 간극 연결성 계수 l 은 -2.5를 사용하면 실제 수리전도도를 합리적으로 예측할 수 있었다.

4. 결론

국내 풍화토의 경우에 van Genuchten 함수특성곡선을 Mualem 이론으로 수리전도도를 구하면, 포화부근에서 수치적인 해가 수렴하지 않는 경우가 빈번하게 일어난다. 본 연구에서는 포화도가 매우 높은 영역에서 van Genuchten 함수특성곡선을 일부 수정하여 새로운 VGM 수리전도도를 제안하였다. 제안된 모델은 van Genuchten 함수특성곡선의 계수를 그대로 사용하며, 수리전도도에 대한 해석적 해를 구할 수 있다. 이를 적용하여 2차원 침투해석과 사면안정해석을 순차적으로 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 정상류 침투해석을 통하여 선행강우효과를 시뮬레이션 하였다. VGM 수리전도도는 초기의 모관흡수력을 과대평가하고 포화도를 과소평가하여 선행강우에 의한 안전율을 수정 모델에 비하여 과대 평가할 수 있다. VGM 수리전도도는 n 이 1.5보다 작은 경우에 지표부근 포화도가 높은 지역을 중심으로 급격하게 감소하여 지층내로의 침투가 더디게 일어난다.
- (2) 부정류 침투해석을 통하여 제안된 모델은 심한 강우조건에도 수치 해의 수렴성을 확보할 수 있었다. 하지만 VGM 수리전도도를 적용하면 강우강도가 큰 경우에는 수치 해가 발산하였다. 확률 강우강도를 적용한 설계시에는 침투해석 해의 수렴성을 확보하기가 곤란하다.
- (3) 안정성 해석 결과, 제안된 모델은 침투해석시 구한 간극수압 분포를 고려하여 실제 사면의 붕괴를 시뮬레이션할 수 있었다. 반면 VGM 모델은 침투해석시 해가 수렴하지 않아서 안전율을 계산할 수 없었다. 그리고 VGM 모델은 선행강우에 의한 초기 안전율과 집중강우시 최종안전율을 과대평가하였다.

감사의 글

이 연구는 부분적으로 한국건설교통기술평가원(과제번호

11-RTIP-D04)과 한국연구재단(과제번호: 2012R1A1A2001001)의 연구비 지원에 의한 성과임.

참고문헌 (References)

1. Kim, Y. K. (2009), Soil slope design and stability evaluation methodology considering hydraulic conductivity and rainfall characteristics, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., KAIST.
2. Oh, S., Lu, N., Park, Y. M., and Lee, J. (2012), "Analysis of an Actual Slope Failure in the Residual Soil", *J. of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32(3C), pp.113-120.
3. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University Hydrology Paper, Fort Collins, No.3.
4. Campbell, J. D. (1973), *Pore pressures and volume changes in unsaturated soils*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL.
5. 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, No.3, pp.533-546.
6. Kunze, R. J., Uehara, G., and Graham, K. (1968), "Factors Important in the Calculation of Hydraulic Conductivity", *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.32, pp.760-765.
7. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.12, pp.593-622.
8. Khalili, N., Geiser, F., and Blight, G. E. (2004), "Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence", *Int. J. Geomech.*, 4(2), 115-126.
9. Lu, N. and Likos, W. J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 131-142.
10. Lu, N., Godt, J., and Wu, D. T. (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, 46, doi:10.1029/2009WR008646.
11. Lu, N., Oh, S., and Wayllace, A. (2013), "Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA", *Engineering Geology*, 162, 22-32.
12. Oh, S. and Kim, Y.K. (2014), "A modification of van Genuchten-Mualem model on the hydraulic conductivity to account for numerical stability and empirical connectivity in Korean residual soils", submitted to *Unsaturated 2014-The 6th International Conference on Unsaturated Soils*, Sydney, Australia.
13. Oh, S., Lu, N., Y. K. Kim, S. J. Lee, and Lee, S. R. (2012), "Relation between the soil water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from tests on residual soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(1), 47-57.
14. GEO-SLOPE International, Ltd, *GeoStudio 2007*, Calgary, Alberta, Canada.
15. van Genuchten, M. T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, 892-898.
16. van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991), *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*, EPA 600/2-91/065.
17. Vogel, T., van Genuchten, M. T., and Cislserova, M. (2001), "Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions," *Advances in Water Resources*, Vol.24, pp.133-144.

Received : October 8th, 2013

Revised : December 19th, 2013

Accepted : December 20th, 2013