

비정상강우를 적용한 자연사면에서의 포화깊이 산정 및 사면안정성 평가

Saturation Depth and Slope Stability considering Unsteady Rainfall in Natural Slope

김 상 훈*[†] · 김 성 필** · 손 영 환*** · 허 준**** · 장 병 옥*****

Kim, Sang-hoon · Kim, Seong-pil · Son, Young Hwan · Heo, Joon · Chang, Pyoung-wuck

Abstract

In Korea, most landslides occur during the rainy season and have shallow failure planes parallel to the slope. For these types of rainfall-induced failures, the most important factor triggering slope instability is decrease in the matric suction of unsaturated soils with increasing saturation depth by rainfall infiltration. For this reason, estimation of cumulative infiltration has a significance.

In this study, infiltration rate and cumulative infiltration are estimated by using both Mein & Larson model based on Green-Ampt infiltration model and using modified Mein & Larson model to which unsteady rainfall is applied. According to the results, the modified model is more reasonable than Mein & Larson method itself in estimation of infiltration rate and saturation depth because of considering real ponding condition.

Keywords : Mein & Larson model, Rainfall infiltration, Deteminstic model, Landslide

I. 서 론

국내의 산지는 대부분이 토심 1-2미터 내외의 얇은 사면이다. 일반적으로 얇은 사면에서의 강우

로 인한 사면 파괴는 지하수위가 상승하고 그로인한 지반내의 간극수압의 증가 때문에 유발되는 것으로 알려져 있다. 하지만 최근의 연구에 의하면 강우로 인한 지하수위의 상승은 크지 않으며, 강우의 침투로 습윤전선이 임계 깊이에 도달하는 것이 사면의 안정에 지배적인 영향을 준다고 한다. 즉, 사면의 안정성을 유지하고 있던 지표면에서의 음의 간극수압의 소멸로 인한 강도의 감소가 얇은 사면 파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다(Fredlund 등, 1995; Ng 등, 1998, Kim 등, 2006). 이에 대한 평가를 위해서는 강우 시 침투량의 정량적인 산

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 농업생명과학연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원

**** 서울대학교 대학원

***** 서울대학교 지역시스템공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: agsol@hanmail.net

정이 중요하다.

Green-Ampt 모델에 바탕을 둔 일차원 침투 모델인 Mein & Larson 모델은 지반의 함수특성 이력을 기반으로 하고, 지표의 폰딩(Ponding)을 고려하여 침투량을 모의하는 방법이다. 하지만 지표의 폰딩상태 고려에 있어서 강우강도가 일정한 정상강우(Steady rainfall)를 적용하는 모델로서, 지반침투능과 직접 비교되는 강우강도가 실제 강우강도 분포와는 상이하게 적용된다. 본 연구에서는 지반의 최대침투능에 따른 침투량 및 침투깊이의 산정을 위해 Mein & Larson 모델을 사용했고, 정상강우로 모의하였을 때와 실제 강우강도 분포인 비정상강우(Unsteady rainfall)로 모의했을 때의 비교를 수행하였다. 그것을 통해 보다 합리적인 침투량 산정 결과를 도출하고자 하였고, 이는 강우 침투로 인한 자연사면 파괴의 안정성을 평가하는 데에 중요한 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

II. 배경이론

1. Green-Ampt 침투이론

Green-Ampt는 균질한 흙을 통한 일차원 연직 침투에 대하여 해석적인 방법에 의해 침투능을 구하는 모델을 제안하였다. 이 모델은 습윤전선에서의 일정한 모관흡수력을 가정하였고, 습윤전선 윗부분에서의 수분미흡량(moisture deficit)과 투수계수가 일정하다는 가정을 기반으로 한다. 또한 Darcy의 법칙에 기초하여 간단한 식으로 연직 침투과정의 기본적 특성을 잘 나타냈고 측정 가능한 흙의 물리적 특성들을 변수로 구성하고 있다.

지반내의 임의의 면을 통과하여 침투될 수 있는 최대울을 침투능(infiltration capacity)라 한다. Green-Ampt는 습윤전선을 경계로 불포화도를 두 가지 상으로 구분지어 습윤전선 윗부분은 완전포화 상태이고 습윤전선 아랫부분은 초기상태의 포화도를 유지한다는 가정하에 다음과 같은 침투능 식을

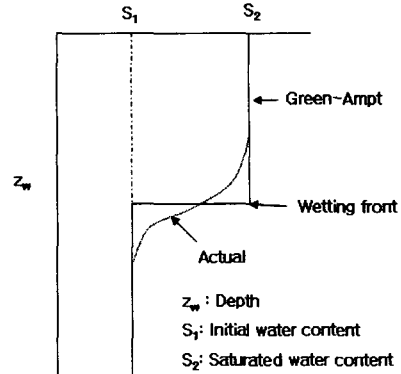


Fig. 1 Water content profile by Green-Ampt

제안하였다.

$$f = K_s \frac{(z_w + \psi_{mf})}{z_w} = \frac{d(z_w \Delta\theta)}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, f 는 침투능, K_s 는 포화투수계수, z_w 는 지표로부터 습윤전선까지의 깊이, ψ_{mf} 는 습윤전선에서의 모관흡수력, $\Delta\theta$ 는 수분미흡량을 나타낸다. 식 (1)은 시간이 흐름에 따라 침투능이 K_s 값에 수렴하게 되는 형태이고, 이때의 누적침투량(F)은 다음과 같다.

$$F = z_w \Delta\theta = K_s t + \Delta\theta \psi_{mf} \ln \left[1 + \frac{F}{\Delta\theta \psi_{mf}} \right] \dots\dots (2)$$

침투능을 누적침투량과의 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$f = K_s \left(\frac{\psi_{mf} \Delta\theta}{F} + 1 \right) = K_s + K_s \frac{\psi_{mf} \Delta\theta}{F} \dots\dots\dots (3)$$

2. Mein & Larson 식

Mein & Larson(1973)은 정상강우 자료를 이용하여 폰딩발생 이전과 폰딩발생 이후의 구분을 통해 Green-Ampt 침투이론을 수정한 침투량 계산법을 제안하였다. 강우의 시작부터 폰딩이 발생하

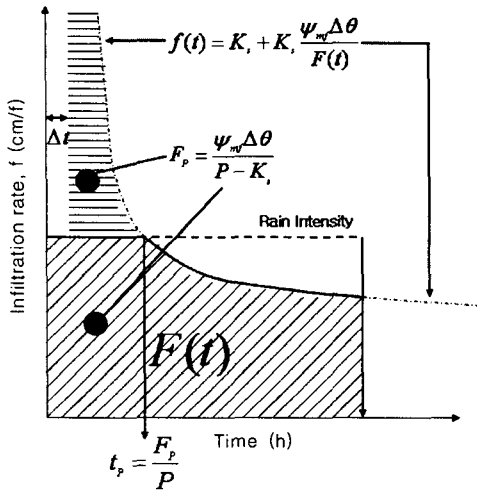


Fig. 2 An identification of the parts of an infiltration-rain intensity analysis with respect to Green-Ampt model

기 전까지의 발생강우는 모두 지반으로 침투될 수 있다. 하지만 폰딩이 발생하는 시간, 즉 지반의 침투능과 강우강도가 같아지는 시간부터는 폰딩에 의하여 지반침투능 만큼만 지반으로 침투된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{t_p} = \frac{K_s \Delta \theta \psi_{mf}}{(i - K_s)} \dots \dots \dots (4)$$

여기서, F_{t_p} 는 폰딩이 발생하는 시간인 t_p 까지의 누적침투량이고, i 는 강우강도이다. 폰딩 전까지의 누적침투량 F_{t_p} 을 구하면 폰딩이 발생하는 시간 t_p 를 구할 수 있다.

$$t_p = \frac{F_{t_p}}{i} \dots \dots \dots (5)$$

폰딩이 발생한 후의 침투능은 식 (3)을 따른다.

3. 비정상강우를 적용한 침투이론

Mein & Larson 모델은 하나의 강우사상에 걸친 시우량 자료의 총합, 즉 총 강우량을 구해 이를 강우지속시간으로 나누어 모든 시간에 대한 강우강도

를 동일하게 적용하는 방법으로 해석을 수행한다. 하지만 이는 실제 강우의 시간별 강우강도 값이 아니며, 특히 짧은 시간동안에 높은 강도의 강우가 집중되는 형태를 보이는 국내의 강우 조건을 해석하기에는 부적합하다.

이에 본 연구에서는 폰딩시간을 기준으로 해석을 한 기존의 모델을 시간의 진행에 따라 순차적으로 해석해 나가는 방법으로 개선하였으며, 이는 식 (6), (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = K_s + K_s \frac{\psi_m \Delta \theta}{F(t)} \dots \dots \dots (6)$$

$$F(t) = F(t') + i_t \quad (f(t) > i_t) \dots \dots \dots (7)$$

$$F(t) = F(t') + f(t) \quad (f(t) \leq i_t) \dots \dots \dots (8)$$

여기서, t' [h]는 이전 해석시간, t [h]는 현재 해석시간, $F(t')$ 는 이전 해석시간까지의 누적침투량, $F(t)$ 는 현재 해석시간까지의 누적침투량, i_t 는 현재 해석시간의 시간강우강도이다. 즉, 이전 해석시간까지 계산된 누적침투량으로 현재 해석시간에 해당되는 지반침투능 $f(t)$ 를 구하고 이를 현재 해석시간의 강우강도와 비교한다. 강우강도가 지반침투능보다 작으면 i_t 모두 누적침투량에 반영되고, 강우강도가 지반침투능보다 크면 $f(t)$ 만큼만 누적침투량에 반영된다.

III. 연구지역 및 방법

1. 연구지역

연구 대상 사면의 위치는 경기도 양주시 장흥면 돌고개이며 선캄브리아기 호상편마암 지대이다. 사면의 평균 경사는 25° 정도이며 사면 길이는 약 70 m이다.

2. 연구방법

본 연구를 수행하기 위한 흐름도는 Fig. 3과 같다.

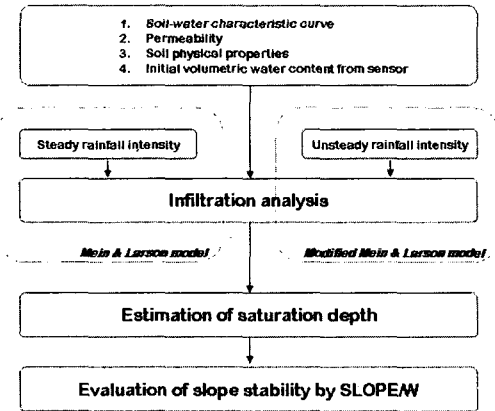


Fig. 3 Flow chart of the study

가. 강우자료

본 연구에서는 TM좌표로는 $x=204092.3649$, $y=471265.4425$ 에 위치하는 의정부 기상관측소의 시우량 자료를 사용하였다. 의정부 기상관측소는 건설교통부 관할관측소로 연구지역 대상사면과의 직선거리가 약 5 km 정도이다. 강우자료는 2006년 여름 집중호우시 내렸던 강우사상 중에 2006년 7월 12일, 15일, 27일에 있었던 세 가지 사상을 선정하여 해석에 적용하였으며, 각각 case 1, 2, 3으로 명기하였다.

나. 모델변수산정

포화체적함수비를 산정하기 위해 현장 밀도 시험을 수행하였고, 포화투수계수를 산정하기 위해 정수두 투수시험을 수행하였다(Table 1). 또한 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정하기 위해 함수특성 시험을 실시하였다(Table 2).

Morel-Seytoux 등(1996)은 van Genuchten(1980)의 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)식의 맞춤변수로부터 습윤전선

Table 1 Physical properties of soil

G_s	USCS	K_s (cm/s)	γ_d (kN/m ³)	void ratio
2.62	SC	1.92×10^{-4}	14.857	0.728

Table 2 Fitting parameters of SWCC and wetting front suction

fitting parameters of Van Genuchten's SWCC			ϕ_{mf} (cm)
a	m	n	
0.02905	0.3426	1.532	81.618

에서의 모관흡수력을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\phi_{mf} = \frac{0.046m + 2.07m^2 + 19.5m^3}{a(1 + 4.7m + 16m^2)} \dots\dots\dots(9)$$

함수특성시험 결과를 이용하여 van Genuchten이 제안한 함수특성곡선식의 맞춤변수를 산정하였고, 식 (9)을 통해 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정하였다.

다. 수정된 침투모델 시뮬레이션

해석을 위해 설정한 모델변수 입력자료는 다음 Table 3.과 같다.

여기서, θ_0 는 초기체적함수비로 체적함수비 센서를 통한 현장계측을 통하여 얻어낸 값이다. 체적함수비 센서는 Decagon사의 ECH₂O-10을 사용하였다. θ_s 는 포화체적함수비로 지반의 공극률이 이에 해당한다.

또한 보다 연속적인 해석결과를 도출해내기 위해

Table 3 Initial conditions of infiltration analysis

θ_0 (%)	θ_s (%)	ϕ_{mf} (cm)	K_s (cm/s)
31.08	42.12	81.618	1.92×10^{-4}

서 기본시간단위를 1시간에서 1분으로 세분화하였는데, 이는 강우강도 자료의 기본시간 단위인 1시간을 60등분한 것으로 시간별 강우강도 값을 선형 보간하는 방법으로 해석에 적용하였다.

라. 사면안정성 평가

수정된 침투모델을 통해 산출된 침투깊이의 증가, 즉 강우로 인한 습윤전선의 하강에 따른 사면의 안전성을 평가하기 위해 연구지역 대상사면에 실험으로 구한 기본 물성치와 지반정수 값을 적용하여 안전율(safety factor)을 계산하였다. 안전율의 계산은 상용프로그램인 SLOPE/W를 이용하였다.

해석에 적용된 사면의 형상은 Fig. 5와 같다. 연구대상지역인 경기도 양주군 장흥면 돌고개 사면에서 EDM 측량을 실시하였으며, 이를 통한 실측 좌표로 해석사면을 설정하였다. 해석사면의 길이는 약 70 m이고, 평균 경사는 25° 이다. 토심은 지반 조사 결과에 따라 상부는 1 m, 하부는 6.5 m로 적용하고, 상부에서 하부로 내려오면서 토심이 일정하게 증가하도록 사면을 설정하였다. 30분 간격으로 침투모델 시뮬레이션 결과를 추출하여 SLOPE/W 해석에 적용하였다.

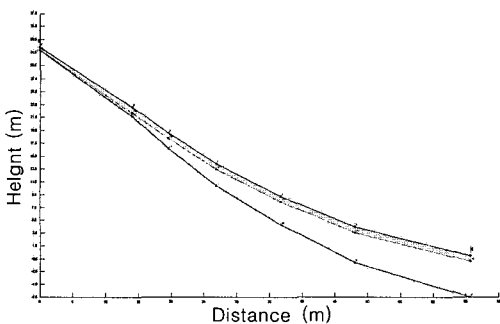


Fig. 4 A slope for Slope/W

Table 4 Initial conditions of SLOPE/W

w (%)	γ_t (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (°)
11	16.493	18.992	9	15.14

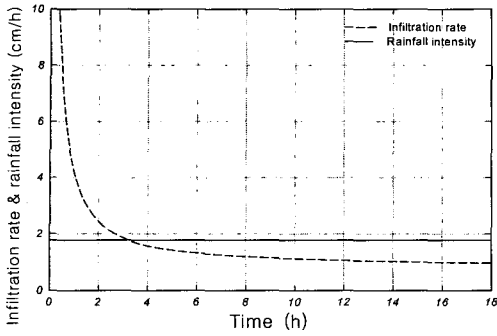
III. 결과 및 고찰

1. Case 1 (2006년 7월 12일)

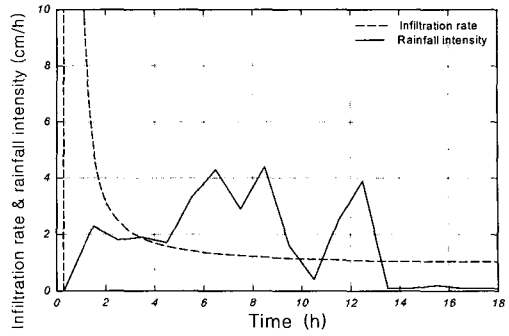
Fig. 5. (a)와 (b)는 각각 정상강우와 비정상강우를 적용하였을때의 침투능과 강우강도에 대한 그래프이다. 폰딩량과 폰딩시간이 크게 차이나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 또한 강우초기 첫 번째 폰딩시간까지를 비교하면 비정상강우가 정상강우보다 강우량이 작다. 때문에 Fig. 5. (c)에서 정상강우의 침투능 감소가 더 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 강우사상의 후반부 역시 비정상강우가 정상강우보다 강우량이 작기 때문에 Fig. 5. (d)의 비정상강우 포화깊이 기울기가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 강우종료후 포화깊이는 대략 50 cm 정도의 차이를 보이는데 이는 비정상강우 가정시에 강우중반부에서 발생하는 폰딩량에 의한 것으로 생각할 수 있다. 실제 강우사상의 후반부에는 낮은 강우강도를 보이는 경우가 많은데, 기존의 Mein & Larson 모델의 경우 상대적으로 강우 후반부에 실제보다 강우가 침투에 과대 반영되는 경향이 있음을 확인하였다. Fig. 5. (e)의 안전율 값은 포화깊이와 반대되는 양상의 값을 보였다.

2. Case 2 (2006년 7월 15일)

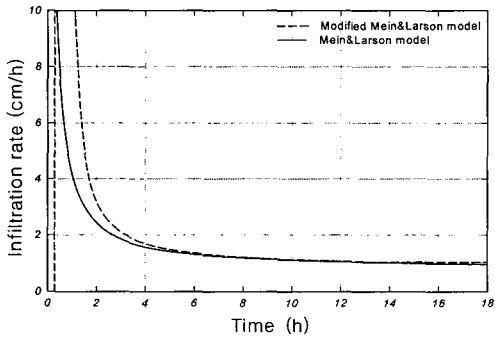
7월 15일 강우는 Fig. 6. (a)의 정상강우 가정시에는 강우가 종료될 때까지 폰딩이 일어나지 않는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 6. (b)의 비정상강우에 대한 해석을 보면 강우초기의 높은 강우강도를 보이는 시간에서 폰딩이 일어나는 것을 알 수 있다. 즉 총 강우량이 같더라도 강우가 짧은 시간에 집중되는 경우 폰딩이 발생할 수 있고, 그것으로 인하여 포화깊이에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 강우초기의 폰딩에 의한 영향은 Fig. 6. (c)의 침투율 비교에도 잘 나타나있다. 폰딩이 일어나지 않는 Mein & Larson 모델에 비해 수정된 모델의



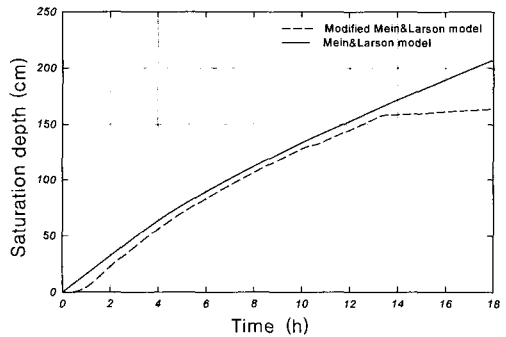
(a) Infiltration curve of Mein & Larson model (Steady rainfall)



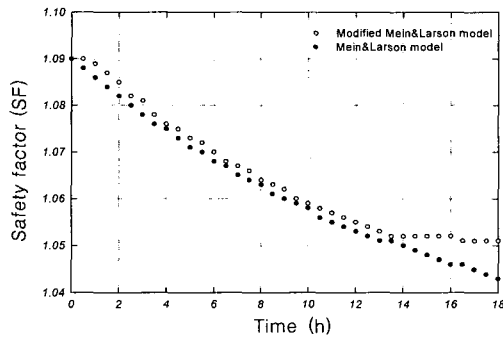
(b) Infiltration curve of modified Mein & Larson model (Unsteady rainfall)



(c) Comparison of infiltration capacity



(d) Comparison of saturation depth

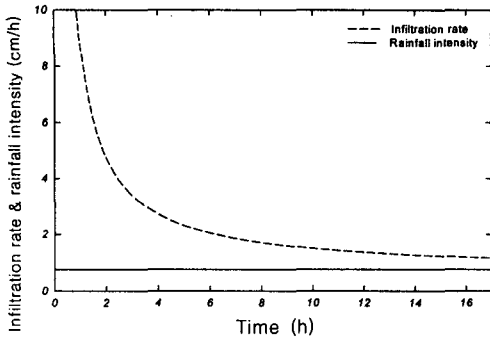


(e) Comparison of safety factor

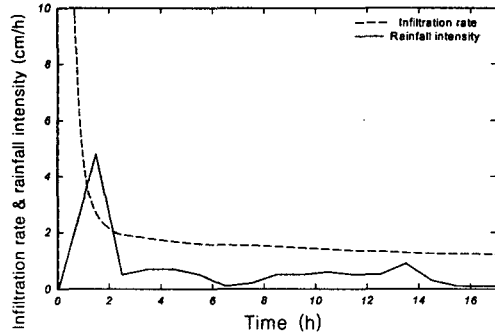
Fig. 5 Result of Case 1

침투율 감쇠가 더욱 급격하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6. (d)의 포화깊이 곡선을 보면, 수정된 모델의 경우 강우초반부 포화깊이가 급격하게 증가하다가 후반부에서는 기울기가 약해지는 것을 알 수 있다. 한편 Mein & Larson 모델은 강우

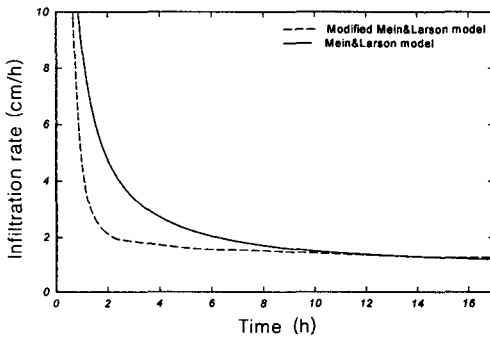
종료시까지 일정한 기울기로 포화깊이가 증가하는데, 이는 강우지속시간 내내 강우강도가 지반의 침투능을 초과하지 못하기 때문이다. Fig. 6. (e)의 안전율을 살펴보면 1~2시간의 구간에서 수정된 모델의 안전율이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.



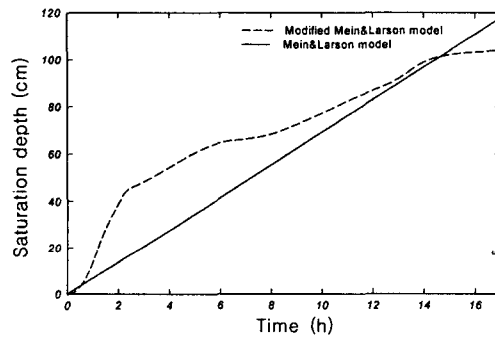
(a) Infiltration curve of Mein & Larson model (Steady rainfall)



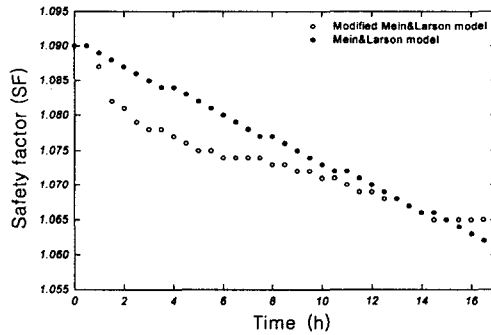
(b) Infiltration curve of modified Mein & Larson model (Unsteady rainfall)



(c) Comparison of infiltration rate



(d) Comparison of saturation depth



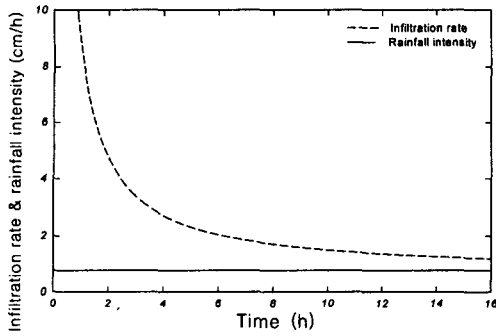
(e) Comparison of safety factor

Fig. 6 Result of Case 2

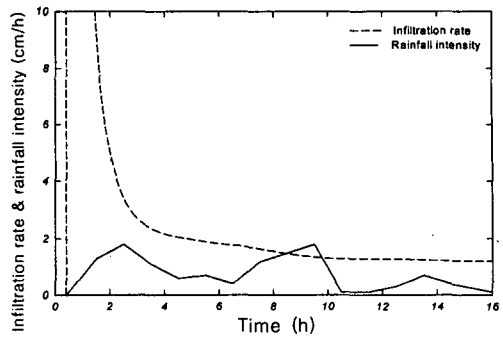
이는 일차원 침투에 의한 지반의 습윤상태가 급격하게 변하는 구간으로 안전율 값이 최소인 시간보다 공학적으로 더 의미 있는 시간일 수 있다.

3. Case 3 (2006년 7월 27일)

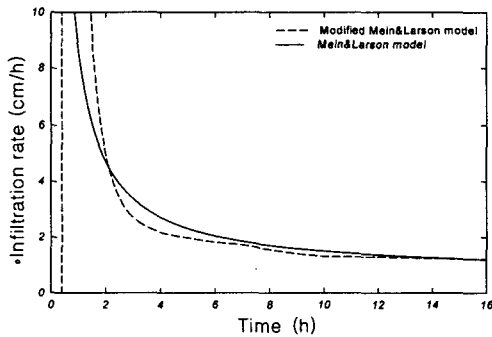
7월 27일 강우 역시 Fig. 7. (a)의 정상강우가 정시에는 강우가 종료될 때까지 폰딩이 일어나지 않는다. 비정상강우는 모의시간으로 9~10시 사이



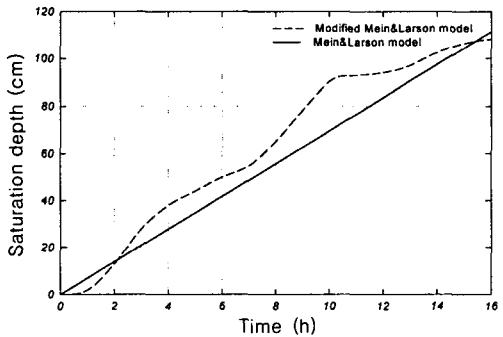
(a) Infiltration curve of Mein & Larson model (Steady rainfall)



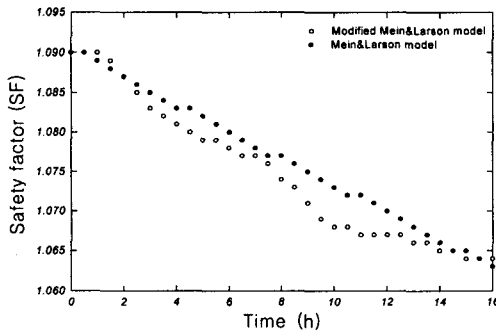
(b) Infiltration curve of modified Mein & Larson model (Unsteady rainfall)



(c) Comparison of infiltration rate



(d) Comparison of saturation depth



(e) Comparison of safety factor

Fig. 7 Result of Case 3

에 폰딩이 한번 일어난다. Case 3의 폰딩량은 많지 않으나 강우강도의 변화에 따라 정상강우와 비정상강우의 침투율 변화가 서로 교차되는 특징을 보인다. 이는 Fig. 7. (d) 포화깊이 곡선에도 나타나는데, 폰딩량이 작아서 최종 포화깊이 차이는 크

지 않지만 시간에 따른 침투량의 차이는 크기에 Fig. 7. (e)의 시간에 따른 사면의 안전율 값 역시 서로 교차되는 양상을 보이고 있다.

IV. 결 론

정상강우가 적용되는 Mein & Larson 모델과 비정상강우를 적용하는 수정된 Mein & Larson 모델을 세 가지 강우사상에 대하여 모의해보았다. 시간-침투능&강우강도 곡선을 통해 두 모델의 폰딩구간과 폰딩량의 차이를 비교할 수 있었고, 침투능 비교곡선과 포화깊이 비교곡선을 통해 비정상강우 적용을 통한 폰딩 양상의 차이가 강우 침투로 인한 습윤전선 하강 깊이, 즉 포화깊이의 결과에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 또한 SLOPE/W 해석을 통하여 습윤전선의 하강에 따른 사면의 안전율 변화를 평가하였다.

1) 비정상강우 적용시 정상강우를 적용할 때보다 폰딩량과 폰딩구간이 커지기 때문에 최종 포화깊이가 작게 나타났다.

2) 정상강우 적용시 강우의 후반부에 침투량이 과대평가되는 경향이 있었는데, 비정상강우 적용을 통해 이를 개선할 수 있었다.

3) 수정된 모델은 폰딩이후에도 다시 폰딩이 일어나지 않는 상태가 될 수 있기 때문에 폰딩 이후 시간에서도 보다 의미 있는 해석 결과를 보여주었다. 또한 짧은 시간에 강우가 집중될 시에 침투속도가 급격하게 증가하는 시간을 찾아낼 수 있었다. 이처럼 시간변수의 의미가 강화된 것이 수정된 모델과 Mein & Larson 모델의 가장 큰 차이점이다.

4) 본 연구는 강우 침투로 인한 자연사면 안정성 평가 시 안전율을 보다 합리적으로 산정하는데 중요한 기초자료가 될 것이고, 나아가 침투로 인해 사면의 안전율이 급격하게 감소하는 시간 및 구간을 찾아내는 데에 기여할 것으로 판단된다.

References

1. Kim, W. K., Chang, P. W., & Cha, K. S., 2006, Estimation of saturation depth by reflecting water-redistribution phenomena at a natural slope, *Journal of Korean society of Agricultural Engineers*, 48(1), p. 71.
2. Fredlund, D. G., & H. Rahardjo, 1995, Soil mechanics for unsaturated soils, *John Wiley & Sons Inc.*
3. Green, W. H., & C. A. Ampt, 1911, Studies on soil physics, I. Flow of water and air through soils, *Journal of Agricultural Science*, 4, pp. 1-24.
4. Morel-Seytoux, H. J., P. D. Meyer, M. Nachabe, J. Touma, M. T. van Genuchten & R. J. Lenhard, 1996, Parameter equivalence for Brooks-Corey and van Genuchten soil Characteristic: Preserving the effective capillary drive, *Water Resource. Research*, 32(5), pp. 1251-1258.
5. Ng, C. W. & Q. Shi, 1998, Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Computer and Geotechnics*, 22(1), pp. 1-28.
6. van Genuchten, M. Th., 1980, A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898.