

## 수분 재분포를 고려한 강우 침투 시 자연 사면에서의 포화깊이 산정

### Estimation of Saturation Depth by Reflecting Water-redistribution Phenomena at a Natural Slope

김 응 구\* · 장 병 옥\*\* · 차 경 섭\*\*\*

Kim, Woong Ku · Chang, Pyoung Wuck · Cha, Kyung Seob

#### Abstract

In Korea, most landslides occurred during the rainy season and had a shallow failure plane 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. The saturation depth was readily estimated using modified Green-Ampt model proposed by Chu et al. (Chu Model) at present. But Chu Model involves some problems for application, because water-redistribution phenomena were not reflected. So the modified Chu Model (MCGAM) which reflect water redistribution phenomena was developed. The results showed that the MCGAM had a better agreement with measured volumetric water contents than existing Chu Model.

*Keywords : Redistribution, Green-Ampt, Saturation depth, Wetting front suction*

#### I. 서 론

우리나라의 경우 대부분의 산사태는 여름철 집중 호우에 의해 발생하며 파괴심도가 얇고 사면과 평행한 얇은 사면파괴이다. 최근 연구에 따르면 이러

한 파괴 유형의 경우 강우 침투로 인해 포화깊이가 증가함에 따라 지반내 음의 간극수압이 사라지기 때문이다.(Fredlund and Rahardjo, 1995; Ng and Shi, 1998; Cho and Lee, 2000).

Green and Ampt(1911)는 지반의 불포화 특성을 고려하여 강우 시 포화깊이를 산정할 수 있는 단순한 침투 모델을 제시하였으며 수많은 연구자들에 의해 적용 및 수정되어 그 타당성과 합리성이 비교적 잘 정립되어 있다. Chu and Marino(2005)는 Green and Ampt 모델을 수정하여 대부분의 현장조건을 고려할 수 있도록 하였으며 현장 계측

\* 서울대학교 대학원 석사과정

\*\* 서울대학교 조경·지역시스템공학부  
지역시스템공학전공 교수

\*\*\* 서울대학교 대학원 박사후 연구원

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: wongku@empal.com

자료와 비교하여 합리적으로 포화심도를 산정할 수 있음을 검증하였다. 하지만 Chu and Marino가 제안한 수정된 Green-Ampt 모델(이하 Chu Model 이라 함)은 non-ponding에서 발생하는 수분재분포(water redistribution) 현상에 대한 고려가 없으므로 적용상 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 현장 계측 자료를 이용하여 수분 재분포 현상에서의 함수비 변화를 예측하여 기존의 Chu Model을 수정(이하 MCGAM이라함)하였으며 침투해석 후 계측된 결과와 비교하여 적용성을 검증하였다.

## II. 강우침투이론

### 1. Chu Model

Green and Ampt(1911)는 지표는 ponding되어 있고 습윤전선(wetting front)의 상·하부는 분명하게 구분되며 습윤전선에서의 모관력 및 깊이에 따른 초기 체적함수비(volumetric water content,  $\theta_0$ )가 일정하다는 가정 하에 Darcy의 법칙을 이용하여 침투 모델을 제시하였다. Fig. 1에 이를 나타내었다.

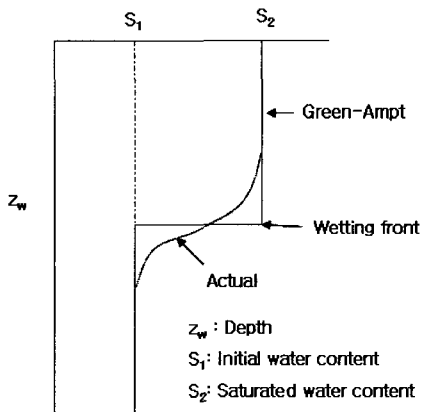


Fig. 1 The conceptual water content profile which demonstrates the piston flow (Green and Ampt, 1911)

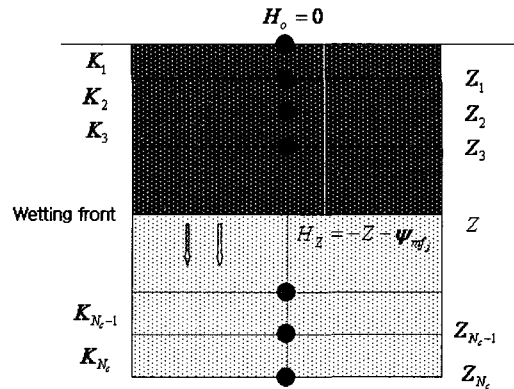


Fig. 2 Infiltration into a layered soil profile under an initially ponded condition (Chu and Marino, 2005)

Chu and Marino가 제안한 침투 모델의 지반 조건은  $N_c$ 개의 층으로 구성되어 있으며 각각  $K_1, K_2, \dots, K_{N_c}$ 의 투수계수와  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_c}$ 의 초기 체적함수비를 갖는다. 이를 Fig. 2에 나타내었다. 비정상 강우에 대한 침투 해석은 Chu(1978)가 제안한 방법과 동일하며 ponding이 발생할 경우와 발생하지 않을 경우로 나누어 해석하게 된다. 강우강도를  $i$ , 지반의 침투능을  $f$ 라 하면 강우 발생 후  $n$ 층에서의 침투는 다음과 같다.

가.  $i \geq f$ 일 경우 (surface ponding case)

$Z_{n-1} < z \leq Z_n$ 일 때

$$f_z = \frac{z + \psi_{mf_n}}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{Z_j - Z_{j-1}}{K_j} + \frac{z - Z_{n-1}}{K_n}} \dots\dots\dots(1)$$

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + (z - Z_{n-1}) \Delta \theta_n = \sum_{j=1}^{n-1} (Z_j - Z_{j-1}) \Delta \theta_j + (z - Z_{n-1}) \Delta \theta_n \dots\dots\dots(2)$$

$$z = \frac{F_z - F_{Z_{n-1}}}{\Delta \theta_n} + Z_{n-1} \dots\dots\dots(3)$$

$$t_z = t_{n-1} + \frac{\Delta \theta_n}{K_n} (z - Z_{n-1}) + \Delta \theta_n \left[ \sum_{j=1}^{n-1} Z_j \left( \frac{1}{K_j} - \frac{1}{K_{j+1}} \right) - \frac{\psi_{mf_n}}{K_n} \right] \ln \frac{z + \psi_{mf_n}}{Z_{n-1} + \psi_{mf_n}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $Z_j$ :  $j$ 층의 깊이 [L],  
 $K_j$ :  $j$ 층에서의 포화투수계수 [ $LT^{-1}$ ],  
 $z$ : 포화깊이 [L]  
 $\psi_{mf_n}$ :  $n$ 층에서의 습윤전선에서의 모관흡수력 [L],  
 $F_z$ :  $z$ 까지의 총누적침투량 [L]  
 $t_z$ : 깊이  $z$ 까지 침투하는데 걸리는 시간 [T], 그리고  
 $t_{n-1}$ :  $n-1$ 층까지 침투하는데 걸리는 시간 [T]

나.  $i < f$ 일 경우 (non-ponding case)

Non-ponding의 경우 지반의 침투능은 강우강도와 동일하며 강우는 모두 지반으로 침투하여 piston flow를 형성한다.

$$f_z = i \dots\dots\dots (5)$$

$$F_z = F_{Z_{n-1}} + \int_{t_{n-1}}^t idt \dots\dots\dots (6)$$

$$z = \frac{F_z - F_{Z_{n-1}}}{\Delta \theta_n} + Z_{n-1} \dots\dots\dots (7)$$

2. Chu Model의 문제점 및 MCGAM 제안

Ponding이 발생하지 않을 경우 즉,  $i < f$ 일 때 Chu Model에서 강우는 모두 지반으로 침투하며 piston flow를 형성한다고 가정하였다. 하지만 이 경우 상부층의 포화영역에서 하부층의 불포화영역으로 수분이 이동하는 수분재분포 현상이 발생하게

되며 더 이상 침투는 piston flow를 형성하지 않는다. 즉, ponding이 발생하지 않을 경우 포화영역이 사라지게 되어 Chu Model의 개념은 유효하지 않게 되므로 포화깊이를 예측하는 것은 무의미하며 심도별 함수비를 예측하여 다음 강우강도에 대한 포화깊이 산정 시 초기함수비로 고려하여야 한다. 이러한 현상을 고려하여 다음과 같이 MCGAM을 제안하였다.

가.  $i < f$ 일 경우 (non-ponding case)

$z=0$ : 수분재분포로 인해 포화영역이 사라지므로 포화깊이는 0

$\theta_o \rightarrow \theta_o'$ :  $\theta_o'$ 는 수분재분포에서 예측된 함수비이며 ponding case에서의 초기함수비

나.  $i \geq f$ 일 경우 (surface ponding case)

$$z = \frac{F_z' - F_{Z_{n-1}}'}{\Delta \theta_n'} + Z_{n-1}' \dots\dots\dots (8)$$

여기서, '는 수분재분포에서 예측된 초기함수비 ( $\theta_o'$ )를 이용하여 산정된 값

3. 습윤전선에서의 모관흡수력

Morel-Seytoux 등(1996)은 van Genuchten (1980)의 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)식의 맞춤변수로 부터 습윤전선에서의 모관흡수력을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

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

여기서,  $\alpha$ ,  $m$ : van Genuchten 함수특성곡선식의 맞춤변수

### Ⅲ. 연구지 및 연구 방법

#### 1. 연구지역

연구 사면은 경기도 양주시 장흥면 돌고개에 위치하며 지질은 선캄브리아기 호상편마암이다. 사면의 경사는 평균 30° 정도이며 길이는 약 50 m이다. 시추조사 결과 사면의 상단과 중간은 심도 1 m까지 잔적토층, 1~4.5 m까지는 풍화토층 그 아래에는 풍화암이 존재하였으며, 하단의 경우 심도 2.5 m까지 잔적토층, 2.5~7.3 m까지는 풍화토층 그 아래에는 풍화암이 존재하였다.

#### 2. 연구방법

본 연구에 사용된 강우자료는 의정부 기상관측소의 시우량 자료이다. 의정부 관측소는 TM좌표로  $x=204092.36$ ,  $y=471265.44$ 이며 대상 사면과 직선거리 약 5 km에 위치한다. 또한 제안된 모델을 검증하기 위해 심도별 체적함수비를 계측하여 강우에 따른 함수비 변화를 모니터링 하였으며 모델 변수를 산정하기 위해 불포화 함수특성곡선 시험 및 투수시험, 현장 밀도 시험을 수행하였다. Fig. 3에

연구 과정 및 방법을 도시하였다.

#### 가. 현장 체적함수비 계측

체적함수비 센서는 Decagon사의 ECH<sub>2</sub>O-10을 이용하였으며 사면의 하단에 30 cm, 90 cm, 120 cm에 매설하였다. Fig. 4에 센서의 배치도, 시추조사 및 샘플링 위치를 나타내었다.

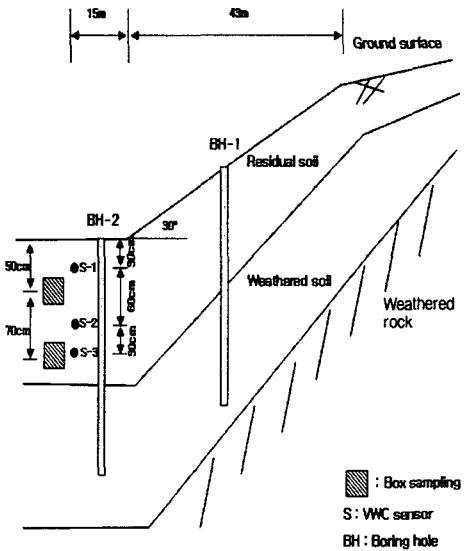


Fig. 4 The feature of field measurements

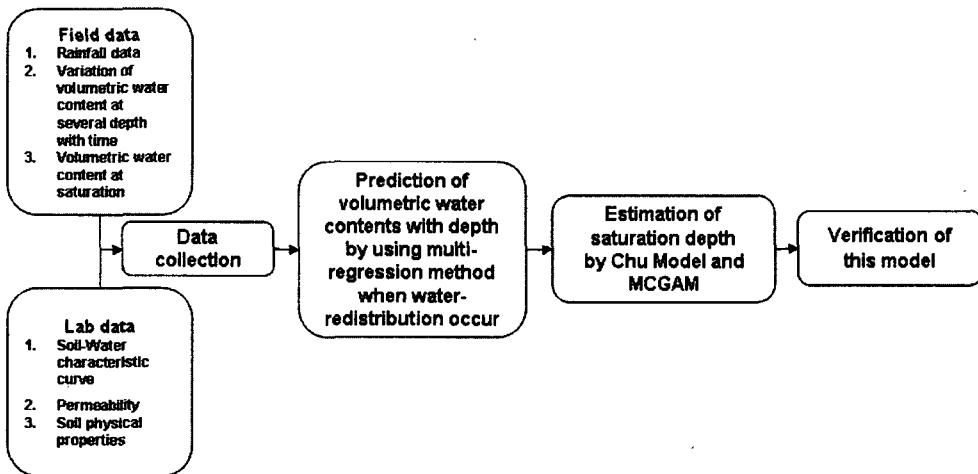


Fig. 3 The flow chart of study

나. 모델변수산정

침투 모델변수를 산정하기 위해 일련의 시험을 수행하였다. 포화체적함수비를 산정하기 위해 현장 밀도 시험을 수행하였으며 포화투수계수를 산정하기 위해 현장밀도에 맞게 시료를 성형 후 정수두 투수시험을 수행하였다. 또한 습윤 전선에서의 모관흡수력을 산정하기 위해 함수특성시험을 실시하였다.

IV. 수분재분포 과정에서의 함수비 예측

해석모델의 장점인 간편성을 최대한 유지하기 위해 수분재분포 과정에서의 함수비는 다중선형회귀법을 사용하여 예측하였다. 해석프로그램은 SPSS 12.0을 사용하였으며 해석 방법으로는 단계입력방식을 선택하였다.

입력된 독립변수는 강우경과시간, 강우강도, 누적강우량, 강우 초기의 체적함수비, 포화투수계수, 습윤전선에서의 모관흡수력이며 종속변수는 각 시간에서 계측된 함수비이다. 깊이에 따라 독립변수의 영향이 시간에 따라 다르므로 보다 정확한 예측을 위해 심도별로 산정하였다. 해석결과 기본적인 회귀방정식은 다음과 같으며 Table 1에 각 변수의 계수를 정리하였다. 식 10에서 보듯이 포화투수계수와 습윤전선에서의 모관흡수력은 심도별로 동일한 값을 가지므로 회귀식에서 제거되었다.

$$\theta = \alpha R_c + \beta R_i + \gamma \theta_o + \delta t + const. \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $R_c$ : 누적강우량 (mm)

$R_i$ : 강우강도 (mm/h)

$\theta_o$ : 초기함수비 (%)

$t$ : 경과시간 (h)

다음에 심도별 예측된 함수비와 실측된 함수비와 비교하여 도시하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 심도별 최대오차범위는 30 cm의 경우  $\pm 1.99\%$ , 90 cm의 경우  $\pm 1.68\%$ 이

Table 1 Parameters in multi-regression equation

Depth (cm)	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	const	$R^2$
30	0.067	0.272	-	-	30.181	0.889
90	0.035	-0.053	0.855	-0.047	4.779	0.868
120	0.015	-0.030	0.620	-	13.157	0.646

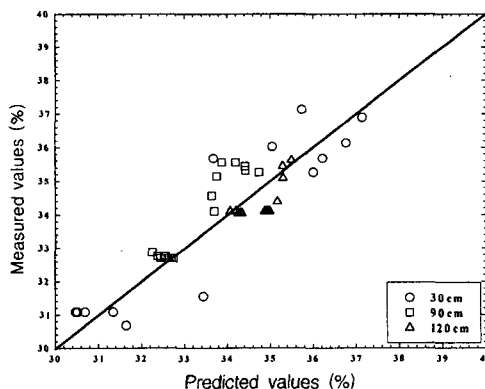


Fig. 5 Verification of predicted volumetric water contents

며 120 cm에서는  $\pm 0.88\%$ 였다. 오차가  $\pm 1\%$  이상인 예측값은 30 cm에서 총 표본개수의 16.67%, 90 cm에서 22.22%였으며 120 cm의 경우 0%였다. 따라서 산정된 회귀식에 의한 수분재분포 과정에서의 함수비 예측이 가능할 것으로 판단된다.

V. 침투 해석 및 수정된 MCGAM 검증

1. 해석 조건

본 해석에 사용된 강우는 2005/9/13일 강우로 연구 기간에 발생된 강우 중 가장 큰 강우강도를 가진다. 자연사면의 경우 식생에 의해 차단손실이 발생하므로 Kim(1993)이 제안한 차단손실을 산정 공식을 이용하여 강우강도에 따라 보정을 하였으며 계측된 체적함수비와 함께 Fig. 6에 나타내었다. Chu Model의 경우 강우와 강우 사이의 무강우에 대해 고려할 수 없으므로 9월 13일 12시~18시까지

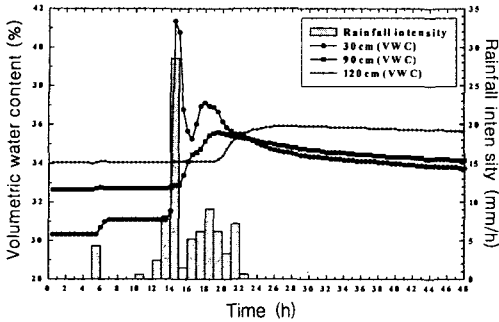


Fig. 6 Rainfall condition (2005/9/13~14)

지의 연속강우에 대해 해석을 실시하였다. 다음은 Kim(1993)이 제안한 강우 차단손실을 산정공식이다.

$$I_p = 35.84 R_i^{-0.6} \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $I_p$ : percentage of interception loss (%),  
 $R_i$ : Rainfall intensity (mm/h)

대상 지역의 지반조건 및 함수특성곡선 시험으로부터 산정한 van Genuchten(1980)의 맞춤형수와 습윤전선에서의 모관흡수력을 Table 2에 나타내었으며 침투해석을 위한 초기조건을 Table 3에 나타내었다.

여기서,  $\theta_o$ : 초기함수비,  $\theta_s$ : 포화함수비,  
 $\psi_{mf}$ : 습윤 전선에서의 모관흡수력,  
 $K_s$ : 포화투수계수

2. 침투 해석 및 MCGAM의 검증

제안된 MCGAM을 검증하기 위해 전술한 해석 조건을 바탕으로 Chu Model과 MCGAM을 이용하

Table 3 Initial condition of infiltration analysis

Depth (cm)	$\theta_o$ (%)	$\theta_s$ (%)	$\psi_{mf}$ (cm)	$K_s$ (cm/h)
0~60	31.08	42.12	83.25	0.69
60~100	32.70	42.12	83.25	0.69
100~140	34.04	39.36	122.12	0.12

여 침투해석을 실시하였다.

가. Chu Model

Table 4에 Chu 모델을 이용한 침투해석 과정을 나타내었다. 각 시간 간격에서 강우 강도는 동일하다고 가정하며 지표수막 여부를 판정하게 된다. 지표수막이 발생하지 않으면 강우는 모두 지하로 침투되며 지표수막이 발생할 경우 발생 시간 ( $t_p$ )을 산정한 후 침투해석을 수행하게 된다.

나. MCGAM

Table 5에 MCGAM의 침투해석 과정을 나타내었다. MCGAM의 경우 지표수막 여부를 판정하였을 때 지표수막이 발생하지 않으면 포화깊이는 0이 되고 전술한 회귀식을 통하여 심도별 함수비를 예측하게 된다. 예측된 함수비는 다음 침투해석 시 초기함수비로 계산된다. 즉, 예측된 초기함수비에 따라 다음 강우강도에 대한 지표수막 여부를 판정하고 지표수막 조건일 경우 포화깊이를 산정하게 된다.

침투해석 결과 Chu 모델의 경우 6h 경과 후 총 침투 깊이는 46.40 cm인 반면 MCGAM의 경우 2~3h에서의 강우강도에서만 포화깊이 32.84 cm

Table 2 Soil properties and van Genuchten's SWCC fitting parameters and wetting front suction

Depth (cm)	$G_s$	Porosity (%)	USCS	$K_s$ (cm/s)	SWCC fitting parameters			$\psi_{mf}$ (cm)
					$\alpha$	$m$	$n$	
50	2.629	42.12	SC	$1.92 \times 10^{-4}$	0.02905	0.3426	1.532	83.25
120	2.633	39.36	SC	$3.33 \times 10^{-5}$	0.02657	0.4222	2.101	122.12

Table 4 The procedure of rainfall infiltration analysis by Chu Model

Elapsed time (h)	$F$ (cm)	$z$ (cm)	$f$ (cm/h)	Ponding status	$F_p$ (cm)	$t_p$ (h)	$t_s$ (h)
1	0.24	2.21	26.63	non-ponding			
2	1.06	9.59	6.68	non-ponding			
3.00	3.92	35.51	2.56	ponding			
2.65	2.92	26.47	2.86		2.92	2.65	0.56
3	3.82	34.60	2.33	non-ponding			
4	3.97	35.99	2.27	non-ponding			
5	4.50	40.76	2.09	non-ponding			
6	5.12	46.40	1.92	non-ponding			

Table 5 The procedure of rainfall infiltration analysis by MCGAM

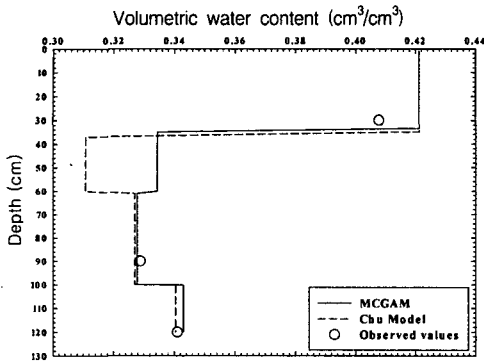
Elapsed time (h)	$F$ (cm)	$F'$ (cm)	$z$ (cm)	$f$ (cm/h)	Ponding status	$F_p$ (cm)	$t_p$ (h)	$t_s$ (h)	Prediction of $\theta_o'$ (%)		
									30 cm	90 cm	120 cm
1	0.24	0.24	0	26.63	non-ponding				31.34	32.44	34.30
2	1.06	0.81	0	6.42	non-ponding				33.44	32.78	34.40
3.00	3.92	2.86	33.42	2.21	ponding				Saturated condition		
2.80	3.35	2.30	26.83	2.86		2.30	2.80	0.44			
3	3.88	2.82	32.84	2.46	non-ponding				32.44	32.78	34.40
4	4.03	0.15	0	1.90	non-ponding				33.68	33.69	34.90
5	4.55	0.53	0	9.77	non-ponding				35.05	33.63	34.86
6	5.18	0.62	0	7.11	non-ponding				35.73	33.75	34.93

가 산정되었으며 그 이외의 강우강도 즉, non-ponding 조건인 강우강도에 대해서는 함수비가 예측되었다. 또한 Chu 모델의 경우 시간이 경과할수록 침투능이 계속적으로 감소하는데 비해 MCGAM의 경우 수분계분포 현상으로 인해 지반의 침투능이 다시 상승하였다.

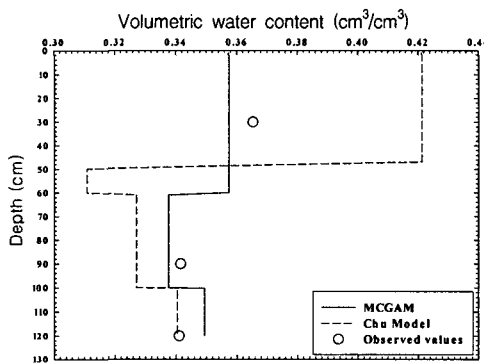
Chu Model에 의한 해석결과와 본 연구에서 제안한 수정된 MCGAM에 의한 해석결과를 예측된 체적함수비와 함께 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 3시간 경과 후 지표수막이 발생하였을 때 Chu Model과 MCGAM의 경우 모두 실제 예측된 값과 유사한 결과를 얻을

수 있었다. 하지만 Fig. 7(b)에서 예측된 함수비 분포에서 보듯이 지표수막이 발생하지 않을 경우 수분계분포로 인해 포화영역이 사라짐을 알 수 있다. Chu Model의 경우 이를 고려하지 못하므로 포화깊이를 과대산정하게 되며 포화 영역에서는 불포화 지반을 유지하는 음의 간극수압이 사라지게 되므로 사면의 안정성을 실측된 자료보다 낮게 평가할 것으로 판단된다. 하지만 MCGAM은 수분 계분포 과정에서 회복되는 지반의 음의 간극수압을 고려할 수 있으며 해석 결과 예측된 함수비 분포와 유사하므로 이를 이용한 침투해석 및 사면안정 해석이 합리적인 것으로 판단된다.



(a) after 3h



(b) after 6h

Fig. 7 Verification of MCGAM

## V. 요약 및 결론

자연사면에서 강우 침투 시 포화깊이를 산정하기 위해 강우 침투모델인 Chu Model을 수정하여 MCGAM을 제안하였으며, 제안된 모델에 의한 해석결과와 현장 계측결과를 비교하여 적용성을 검증하였다.

1. Non-ponding 조건에서 발생하는 수분 재분포 과정에서의 함수비를 현장계측자료와 다중선형 회귀법을 이용하여 예측하였으며 이를 고려하여 MCGAM을 제안하였다.

2. 침투해석결과 ponding 조건에서 MCGAM과 Chu Model이 유사한 결과를 주었으며 계측된 채

적함수비 분포와도 잘 일치하였다. Non-ponding의 경우, 본 연구에서 제안된 MCGAM에 의해 산정된 포화깊이는 0이었으며 예측된 함수비는 계측된 체적함수비와 잘 일치하였다. 하지만 Chu Model은 수분의 재분포를 고려하지 않으므로 포화영역이 없음에도 포화깊이를 산정하였으며 따라서 포화깊이를 과대 산정할 수 있으며, 포화 영역에서는 불포화 지반을 유지하는 음의 간극수압이 사라지게 되므로 Chu Model에 의한 해석 결과는 사면의 안정성을 계측된 자료에 비해 낮게 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 MCGAM에 의한 침투해석이 합리적일 것으로 판단된다.

## References

1. Cho, S. E. & S. R. Lee, 2000, Surficial stability evaluation of homogeneous slopes considering rainfall characteristics, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 16(5): pp. 107-116
2. Chu, S. T., 1978, Infiltration during an unsteady rain, *Water Resource. Research*, 14(3), pp. 461-466
3. Chu, X. & M. A. Marino, 2005, Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall, *Journal of Hydrology*, pp. 1-13
4. Fredlund, D. G. & H. Rahardjo, 1995, Soil mechanics for unsaturated soils, *John Wiley & Sons Inc.*
5. 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
6. Kim, K. H., 1993, A simulation model for estimating rainfall interception loss in a forest stand, *Ph.D. thesis*, Seoul National University. (in Korean)
7. 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
8. 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
9. 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