

강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토의 사면 안정 해석 연구

A Study of Stability Analysis on Unsaturated Weathered Slopes Based on Rainfall-induced Wetting

김 재 홍* ¹	Kim, Jae-Hong	박 성 완* ²	Park, Seong-Wan
정 상 섬* ³	Jeong, Sang-Seom	유 지 형* ⁴	Yoo, Ji-Hyeung

Abstract

The infiltration of prolonged rainfall causes shallow slope failures on surficial slopes. Experiments performed on soil-water characteristic curves in weathered soils of three different types(SW, SP, SM) were used to construct a general equation for the soil-water characteristic curve. Based on this, the saturated depth by Green & Ampt model was compared with the results of numerical analyses and the range of application of Green & Ampt model was evaluated. It was found that the saturated depth occurred by infiltration on the surface of slopes has an influence on the surficial stability of slopes and, the stability analysis of unsaturated soils calculated by using the soil-water characteristic curve of weathered soils was found to be a proper analysis for shallow slope failures due to rainfall.

요 지

강우시 발생하는 여러 사면의 얇은 파괴는 지표로 침투하는 강우에 의한 포화깊이 증가에 의해 발생한다. 본 연구에서는 불포화사면 해석을 위하여 국내의 전형적인 표토층을 구성하는 화강풍화토를 3가지(SW, SP, SM)로 분류하여 함수특성곡선을 각각 구하고 그에 따른 함수특성곡선의 방정식을 추정하였으며, 기존에 사용되고 있는 Green & Ampt의 포화깊이 추정식과 수치해석 결과를 비교·분석함으로써 추정식의 사용범위에 대한 제한성을 파악하였다. 또한, 강우에 의한 사면의 포화깊이가 사면의 안정성에 미치는 영향을 파악하고 화강풍화토의 함수특성곡선을 이용하여 불포화사면의 강도정수를 추정하여 계산된 불포화지반의 해석이 기존의 포화사면의 해석에 비하여 보다 정확한 결과임을 알 수 있었다.

Keywords : Green & Ampt model, Infiltration, Shallow slope failure, Soil-water characteristic curve, Unsaturated soil

1. 서 론

우리나라에서 사면붕괴의 대부분은 강우가 주된 원인이 되고 있다. 더욱이 6~9월중의 집중호우로 인한 사면붕괴 및 산사태가 직접 또는 간접적으로 확인되고 있으며 사면파괴 유형은 대부분 지표면에서 얇고, 사면

의 경사와 평행한 형태로 나타난다.

일반적으로 강우로 인한 사면파괴는 지하수위 상승으로 인하여 사면지반내의 간극수압이 증가하여 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있었으나, 자연사면에서는 지하수위 상승에 의한 영향보다는 강우의 침투로 발생하는 포화깊이에 따른 얇은 사면파괴가 주로 발생하고

*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

*2 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원 (Member, Civil Engrg., Div., Korea Institute of Construction Technology)

*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr)

*4 정회원, 경일대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyungil Univ.)

있다. 즉, 사면의 전단강도를 증가시키는 지표면에서의 음의 간극수압(suction)의 감소로 인한 강도의 저하가 얇은 사면파괴의 주된 원인인 것으로 알려져 있다(Ng & Shi, 1998). 이에, 국내에 널리 분포하는 화강풍화토의 특징과 현장사면의 환경을 반영할 수 있는 불포화사면의 강도특성에 대한 연구 또한 고려되어야 할 사항이다.

사면붕괴의 원인으로는 사면을 구성하고 있는 토질의 특성에 따른 침투수의 전달속도 및 포화깊이 그리고, 사면붕괴가 되기 전 원지반의 함수조건이나 지하수위의 존재와 위치 그리고 사면을 불안정하게 하는 강우강도의 크기 및 지속성 여부 등을 들 수 있다. 이러한 많은 요인들이 부분적, 또는 복합적으로 사면을 불안정하게 조성한다. 따라서, 기존의 포화상태의 지반해석보다는 현장상태를 보다 가깝게 해석하기 위하여 불포화지반의 특성에 대한 이해가 요구된다.

불포화 지반의 흐름을 간편하게 해석하는 방법으로는 Lumb의 습윤대법(wetting band method)과 Green & Ampt의 모델식이 이용된다. 또한 강우의 재현기간을 이용한 Pradel과 Raad의 해석 방법 역시 Green & Ampt의 모델식이 근간을 이루고 있다. 그 외에 이와 같은 모델식을 이용하여 사면의 안정성을 해석한 논문들이 발표되었으며, 모델식의 정확한 해를 분석하고 식의 조항을 세분화하여 오차를 줄이기 위한 식들이 제안되었다(Fourie, Rowe & Blight, 1999; Serrano, 2001). 국내에서는 풍화토의 세립함유량에 따른 함수특성 자료(류지협, 1997)를 바탕으로 Green & Ampt의 모델식과 ponding을 고려하여 수정된 간략법(Mein & Larson, 1973)을 같은 강우 재현기간과 포화깊이에 따라 침투 초기투수계수를 비교하였고, 그 후로 상용프로그램인 SEEP/W에 내장된 지반조건을 대상으로 포화깊이에 대한 사면의 안정성을 비교하였다(조성은 & 이승래, 2000; 2001).

본 연구에서는 국내의 화강풍화토를 대상으로 불포화 지반의 고유특성인 함수특성곡선을 Filter Paper 실험으로 측정하고, 강우로 침투되는 사면의 포화깊이를 Green & Ampt의 모델식과 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 비교·검토했다. 그리고, 강우시 사면의 포화깊이에 따른 얇은 파괴에 대한 안정성을 파악하고자 상용프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 포화깊이의 증가에 따른 무한사면의 안정성을 해석하고 불포화 지반의 강도정수를 적용하여 포화 지반과 불포화 지반의 사면 안정성을 비교·분석하였다.

2. Lumb and Green & Ampt의 모델식

산악지형이 많은 세계 여러 곳에서 강우에 의한 사면의 붕괴가 빈번히 발생하고 있다. 특히, 사면에 균열이 있는 지반이나 풍화토로 구성된 불포화 사면에서는 집중호우로 인한 사면 파괴가 빈번히 발생한다. 예를 들어, 홍콩과 일본의 사면 붕괴에 대한 사례에서도 사면의 전단강도에 크게 영향을 주는 음의 간극수압(suction)의 감소로 인해, 강우시 물이 침투되어 발생하는 침윤전선(wetting front)이 형성되는 포화깊이에서 얇은 사면 파괴면이 형성됨을 보고하였다(Yagi & Yatabe, 1987; Ng & Shi, 1998).

강우시 사면의 포화깊이를 예측하는 방법으로는 Lumb (1975)과 Green & Ampt(1911)이 제안한 두가지 모델식들이 있다. 식 (1)은 Lumb(1975)가 강우시 사면의 습윤대를 예측하기 위하여 제안된 식이다.

$$h_w = \frac{k_s \cdot t}{n(S_f - S_o)} \quad (1)$$

여기서, n 은 간극률, k_s 는 포화 투수계수, t 는 강우지속시간 그리고 S_o 와 S_f 는 강우 초기와 강우후의 포화도이다. 이 식은 강우시 지반의 습윤대가 점점 깊어가면서 지하수위의 영향 정도를 추정하기 위하여 1970~1980년대에 종종 사용되었다. 그러나, Lumb의 제안식은 사면의 지반 조건들과 사면내로 흐르는 물의 흐름, 강우강도 그리고 가장 중요한 흙의 함수비가 투수계수에 미치는 영향정도를 고려할 수 없다. 따라서, 이와 같은 조건들을 고려할 수 있는 식 (2)와 같은 Green & Ampt의 제안식이 많이 이용되고 있다.

$$T = \frac{\mu}{k_w} \left[z_w - S_w \cdot \ln \left(\frac{S_w + z_w}{S_w} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, T 는 강우지속시간, k_w 는 포화투수계수, μ 는 체적함수비의 전·후 변화량($\theta_s - \theta_i$), z_w 는 포화깊이를 나타낸다. 그리고, S_w 는 젖은 경계면의 모관흡수력(wetting front suction)으로써 지표면으로부터 강우가 침투하는 동안 깊이별로 변하는 suction값을 나타낸다. 즉, 지반이 포화되기 직전에 나타나는 최소 suction값이다. Pradel & Raad (1993)는 모래질 흙에 대한 wetting front suction 값은 80cm, 점토질 흙은 140cm로 규정하여 사면의 강우강도와 안정성을 분석하였다.

일반적인 흙에 있어서 wetting front suction 범위는 최

저 0.97cm에서 최고 156.5cm로 나타난다(Maidment, 1993). 이 모델식은 포화깊이를 결정하면 그에 대한 강우지속시간을 추정할 수 있다. 이 식에서는 흙의 함수비와 불포화 지반의 특성을 고려할 수 있는 음의 간극수압(suction) 요소가 있다. 이 모델식은 불포화 흐름(Wallace, 1975)을 기초로 좀 더 명확하게 현장지반과 비교하였을 때 좋은 상관성을 보이고 있다(Brakensiek, 1977). Pradel & Raad(1993)는 남부 캘리포니아 지역의 지반조건과 기후조건으로 Green & Ampt의 모델식을 이용하여 강우빈도기간에 따른 강우강도와 강우지속시간의 관계를 나타내었으며, 투수계수의 변화를 주면서 사면의 안정성을 비교하였다.

3. 시료의 모관흡수력 측정

국내 화강풍화토를 대상으로 통일분류법에 의하여 입도를 SW, SP, SM의 세가지로 나누어 함수특성곡선 실험을 수행하였다. 풍화토의 전흡수력의 전구간을 측정하기 위하여 Filter Paper 방법을 사용하였으며, tensiometer를 사용하여 측정값의 정확도를 확인하였다.

3.1 시 료

본 실험에서는 연세대학교내의 신축현장에서 굴토작업으로 조성된 지반 5m하단에서 풍화토를 채취해 No. 4~No.200체로 각각 분류하여 C_u (균등계수), C_c (곡률계수)와 각 체의 누적량을 토대로 SW, SP, SM의 세가지

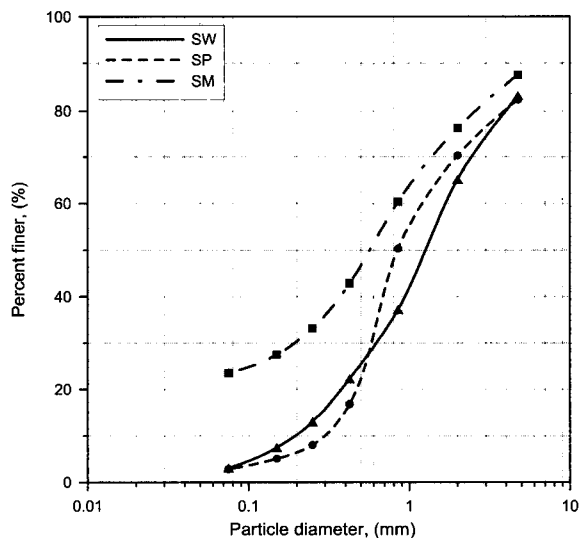


그림 1. 3가지 화강풍화토의 입도분포곡선

표 1. 3가지 화강풍화토의 물성치

물성치 \ USCS	SW	SP	SM
D_{10} (mm)	0.2	0.3	-
D_{30} (mm)	0.62	0.58	0.2
D_{60} (mm)	1.6	1.2	0.9
균등계수, C_u	8	4	-
곡률계수, C_c	1.2	0.9	-
비중, G_s	2.70	2.70	2.75
No. 200체 통과량(%)	4.56	2.84	23.57

시료를 구성하여 함수특성 실험을 수행하였다.

3.2 Tensiometer

Tensiometer는 흙 속의 부간극수압(negative pore-water pressure)을 측정하는 장치로 높은 공기함입값을 갖는 가느다란 튜브로 연결된 다공성 세라믹 컵으로 구성되어 있다. 흙 속으로 삽입한 tensiometer는 튜브 안에 있는 물을 흙이 빨아들임으로써 다공성 세라믹 컵 내에서 평형을 이루어 부간극수압을 측정한다. 튜브는 낮은 열전도율과 부식되지 않는 플라스틱으로 만들어졌으며 물저장 용기에서 튜브와 세라믹 컵으로 물이 공급되는 체계로 되어 있다.

Tensiometer 튜브의 직경은 약 2cm 정도이며, 흙 속으로 삽입되는 튜브와 세라믹 컵사이의 길이는 15cm~1.5m 정도로 다양하다. 본 실험에서는 15cm의 크기를 사용하였다. Tensiometer는 물의 공동현상이 일어날 수



그림 2. Tensiometer

있기 때문에 측정할 수 있는 값은 최대 90 kPa 정도이다. 일반적으로, 간극 공기압($u_a=0$)은 대기압 상태로 간주되기 때문에 측정값은 수치적으로 모관흡수력(u_a-u_w)이 되며, 만약 간극 공기압이 대기압보다 크다면 tensiometer의 읽음 값에 주위의 간극 공기압을 더해야 한다. 결국, 측정된 모관흡수력은 세라믹 컵의 공기함입값(air-entry-value)을 초과하지 못한다.

일반적으로 흙의 흡수력(soil suction)을 전흡수력(total suction)이라 하며, 이 전흡수력은 모관흡수력(matric suction)과 삼투흡수력(osmotic suction)으로 나뉘는데, tensiometer는 본래 비교적 낮은 범위의 모관흡수력(matric suction)만을 측정할 수 있으며 다공질 세라믹 컵으로 이온화된 염분(soluble salts)은 자유롭게 통과하므로 전흡수력(total suction) 성분 중 삼투흡수력(osmotic suction)은 측정되지 않는 단점이 있다(Soilmoisture, 2000).

3.3 Filter Paper Method

불포화 지반의 함수특성곡선을 구하기 위해서 tensiometer의 제한적인 측정 범위 때문에 Filter Paper 방법을 병용하여 실험하였다. Filter Paper는 습도와 용기내의 따뜻한 환경으로 인해 유기적인 작용과 생물학적인 분해작용이 없는 제품이 필요하다.

본 실험은 ASTM D5298-94에 규정되어 있으며, 시료의 함수비를 감지 할 수 있는 크기로서 지름이 55 mm인 원형 Filter Paper를 이용하였다. 그리고, 실험규정에 있는 Whatman No. 42와 Schleicher and Schuell No. 589 White Ribbon을 사용하여 실내실험을 수행하였다.

위에서 제시한 두 가지의 Filter Paper는 증류수 이동이 있는 염화칼륨이나 염화나트륨 같은 염분이 있는 시

료를 제외한 순수한 수분에 의해 측정된 calibration curve를 사용할 수 있다.

그림 3은 Whatman No. 42와 Schleicher and Schuell No. 589에 대한 전형적인 calibration curve를 나타낸 것이다. 이 calibration curve는 두가지 Filter Paper에 대해 나타난 것이며, 각각 두가지의 직선식으로 구성되어 있다. 그림 3에서 각각 직선식의 상단부는 입자표면에 흡착되는 얇은 막으로 유지되는 수분을 의미하며, 반면에 하단부는 입자들 사이에 모세관현상 또는 표면장력에 의해 유지되는 수분을 나타낸 것이다(Miller & McQueen, 1978). 일반적으로 흙의 suction은 자유에너지(free energy)라는 의미로 다음 식 (3)과 같이 pF의 단위를 쓴다.

$$pF = \log |h_t|, \quad (h_t: \text{모관흡수력, cm}) \quad (3)$$

이 Filter Paper 방법은 흙의 모관흡수력과 전흡수력의 측정이 가능한 실험이다. 즉, Filter Paper는 간접적으로 흡수력(suction)을 측정하는 센서 역할을 한다. Filter Paper 실험은 어떤 흡수력을 갖는 흙과 Filter Paper와의 사이에서 수분의 흐름이 평형상태가 된다는 원리를 이용한다. 평형상태는 액체상으로, 또는 수증기 상태로 흙에서 Filter Paper로 전달된다. 그림 4와 같이 흙과 직접 접촉되어 있는 경우에는 흙 속의 물이 전달되어 Filter Paper와의 평형을 이루고, 얇은 고무링 같은 매개물로 흙과 비접촉 되는 경우에는 공기중으로 수분 또는 수증기 상태로 Filter Paper로 전달되어 평형을 이루게 된다.

그림 4와 같은 시료용기에 200~400g 정도의 시료를 담아서 Filter Paper를 설치하고, 전흡수력을 측정하는 경우에는 얇은 고무링이나 O-ring, 철사 같은 망으로 시료와 최소한의 간격을 유지하여 핀셋으로 흙이나 먼지가 묻지 않도록 올려놓는다. 모관흡수력을 측정하는 경

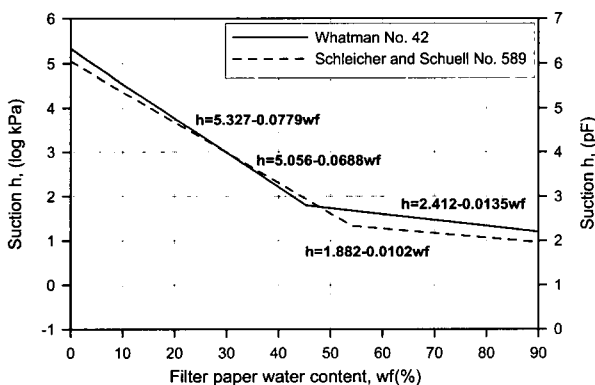


그림 3. 2가지 Filter Paper의 calibration curve(ASTM, 1994)

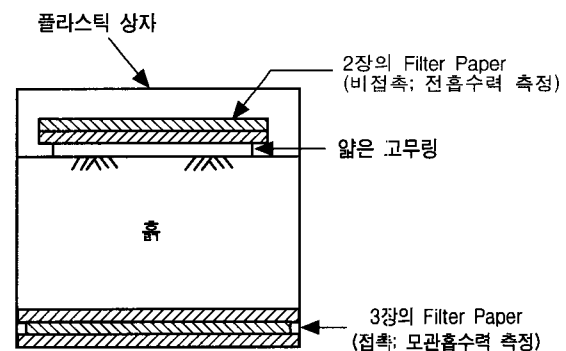


그림 4. 모관흡수력과 전흡수력 측정을 위한 Filter Paper 실험방법

우에는 3장의 Filter Paper를 이용하여 흡과 접촉하여 설치한다. 그 중 중간의 Filter Paper는 모관흡수력을 측정하는데 이용되며, 바깥 Filter Paper보다 직경을 3~4mm 정도 잘라내어 외부의 흡 또는 먼지와와의 접촉이 되지 않도록 설치하여야 한다.

시료용기에 Filter Paper를 설치한 뒤에는 일반적으로 20~25℃사이의 일정한 온도(3℃ 이하의 오차)를 갖는 장소에서 격리시켜 보관해야한다. 조금 더 큰 용기에 넣어서 보관하여 온도 변화를 예방할 수도 있으며, 항온항습기를 이용하여 일정한 온도를 유지하는 방법도 있다. 보관하는 용기 또한 밀폐시켜 공기의 유입을 방지해야 한다. 일반적으로 밀폐된 시료용기 내부의 공기, Filter Paper 그리고 시료사이의 증기 및 수분이동에 대한 최소한의 평형기간은 7일이며, 7일 후에 시료용기를 개봉해 핀셋으로 Filter Paper를 용기에 담아서 빠른 시간 내에 무게를 측정해야한다. 실험동안에 0.0001g의 감도를 갖는 저울을 사용하므로 매 측정시 마다 오차를 줄이기 위해서는 모든 실험장비들을 시료용기에 가까이 두고 실험해야 한다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 3가지의 입도로 구성된 총 23개의 화강풍화토 시료를 대상으로 tensiometer의 측정과 Filter Paper법에 의해 함수특성곡선을 산정하였다. 측정값 중에서 오차가 많고, fitting하는 과정에서 많이 벗어나는 측정값들을 제거시킨 다음, 곡선형태에 맞게 값들을 정리하였다. 특히, 공기함입치를 나타내는 포화 근처의 suction값들은 여러 번의 실험을 통해 측정하여 그 정확도를 높였다.

4.1 측정된 함수특성곡선

그림 5~그림 7에 나타난 바와 같이 tensiometer의 측정값들은 대략 0~90kPa정도의 범위 내에 있었다. 그리고 Filter Paper법으로 측정된 넓은 범위의 값들과 비교할 때, 비교적 좁은 범위이지만 전체적인 곡선의 유형에 접근하고 있음을 알 수 있었다.

4.2 함수특성곡선식의 제안

함수특성곡선은 전흡수력(total suction) 변화에 따른

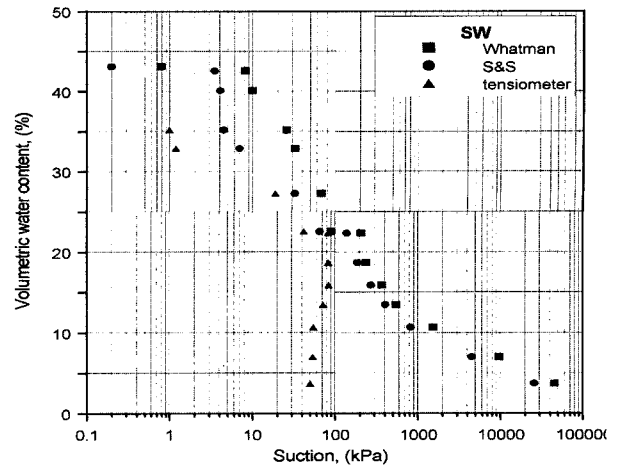


그림 5. 풍화토의 함수특성곡선(SW)

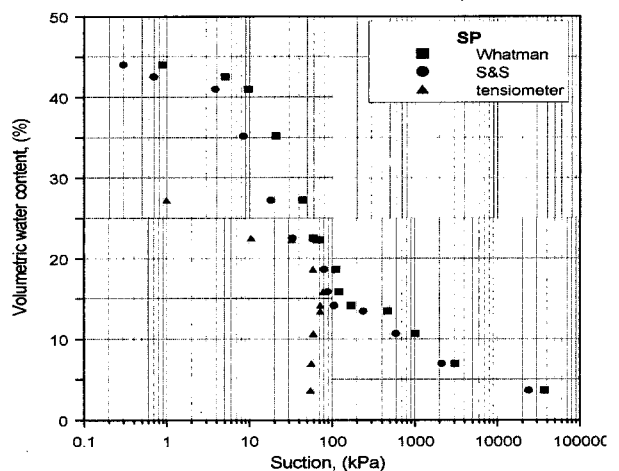


그림 6. 풍화토의 함수특성곡선(SP)

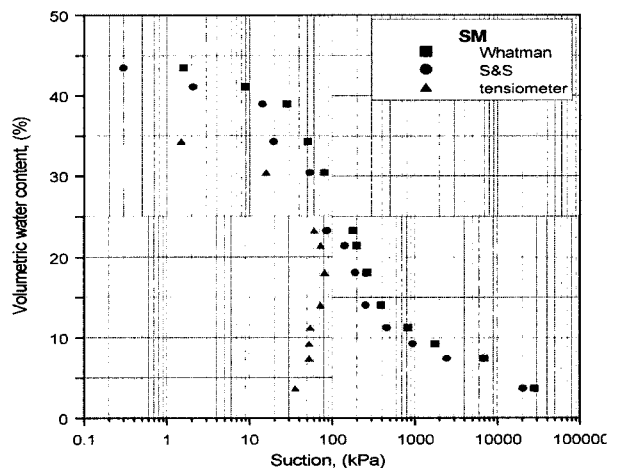


그림 7. 풍화토의 함수특성곡선(SM)

지반의 체적함수비 변화를 결정한다. 전흡수력 변화에 따른 물리적 변화의 계수는 함수특성곡선의 경사에 의해 좌우된다. 기존의 함수특성곡선 방정식은 일반식으로 여러 지역의 지반 특성에 맞는 함수특성곡선 유형으

로 제안되었다. 방정식의 곡선 형태도 경사가 급한 굴곡 형태에서 흡의 함수특성곡선에 근접한 S자 형태의 방정식으로 개선되고 있다(Leong & Rahardjo, 1997).

여러 제안식들 가운데, van Genuchten(1980)과 Fredlund & Xing(1994)의 제안식이 다양한 흡에 대한 함수특성곡선 방정식으로 많이 이용되며 방정식의 검증으로도 이용되고 있다. 근래에 와서 Fredlund & Xing의 제안식은 상단부위의 공기함입값 굴곡과 하단부위의 잔류함

수비를 결정하는 부분을 보완할 수 있도록 하였다(Fredlund & Xing, 1994; Leong & Rahardjo, 1997).

다음 식 (4)와 식 (5)는 van Genuchten과 Fredlund & Xing의 방정식을 나타낸다.

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (a \cdot s)^n} \right]^m \quad (4)$$

$$\theta = \left[\frac{1}{\ln\{e + (s/a)^n\}} \right]^m \quad (5)$$

표 2. 방정식 모형에 따른 상수 비교

Filter paper 종류	상수	van Genuchten			Fredlund & Xing		
		SW	SP	SM	SW	SP	SM
Whatman	a	22	24	66	128	91	136
	n	1.95	3.11	1.53	0.86	1.24	1.2
	m	0.27	0.26	0.69	2.7	3.1	2.9
S & S	a	17	17	53	78	61	163
	n	1.25	1.68	1.22	0.72	1.08	0.9
	m	0.45	0.51	0.92	2.9	3.6	4.9

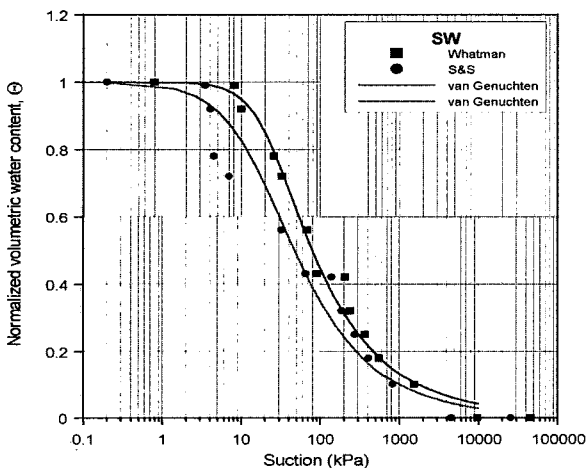


그림 8. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(van Genuchten 모형, SW)

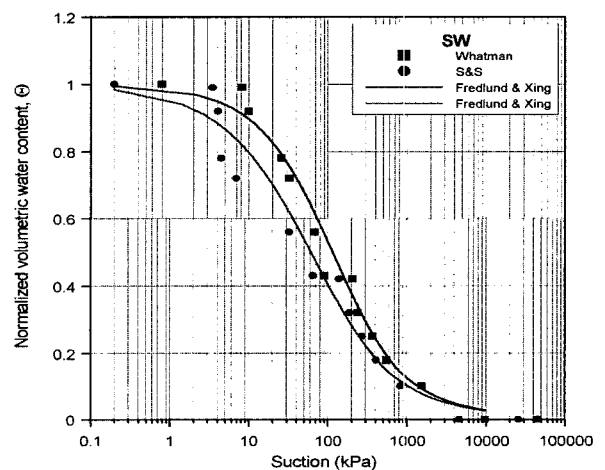


그림 9. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(Fredlund & Xing 모형, SW)

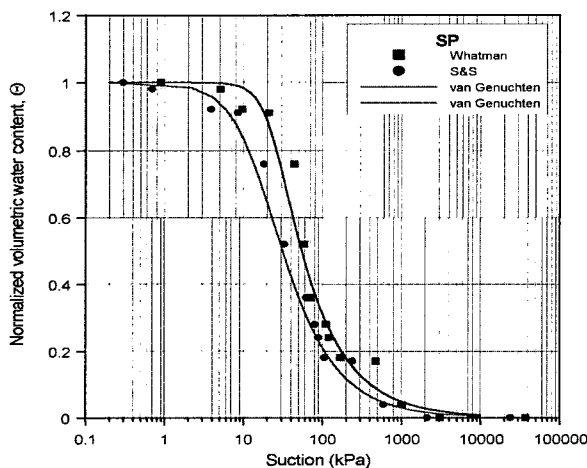


그림 10. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(van Genuchten 모형, SP)

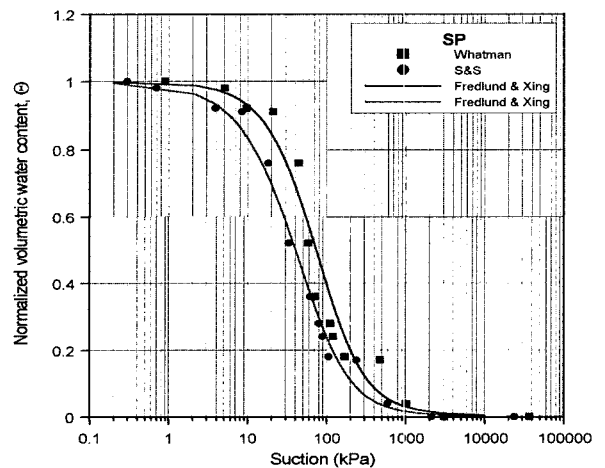


그림 11. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(Fredlund & Xing 모형, SP)

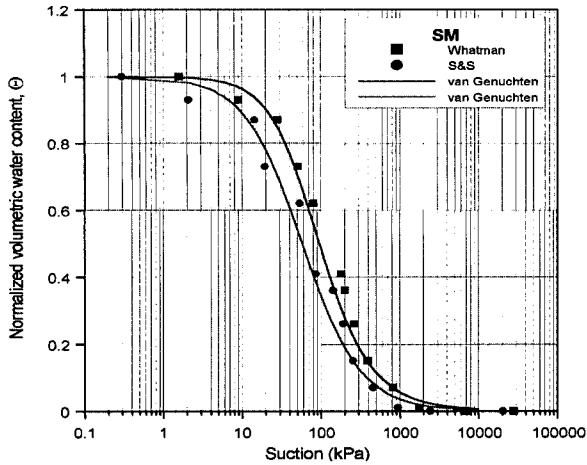


그림 12. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(van Genuchten 모형, SM)

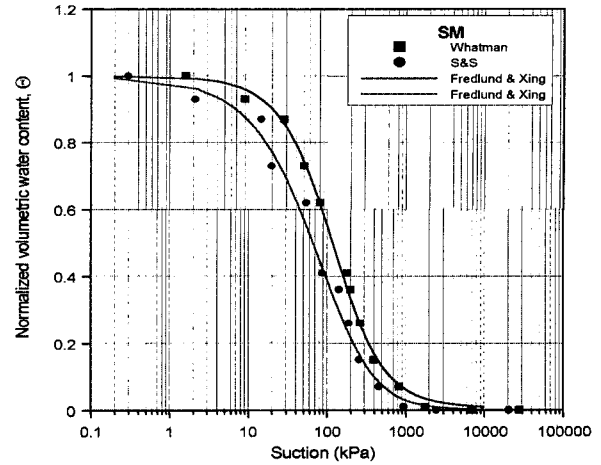


그림 13. 풍화토의 함수특성곡선 방정식(Fredlund & Xing 모형, SM)

여기서, θ (normalized volumetric water content)는 $(\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 으로 표현되며, 여기서 θ_w 는 체적함수비이며, s 는 전흡수력(total suction), e 는 자연지수, a , n , m 은 상수이다. 다음 그림 8~그림 13은 실험을 통해 얻어진 suction값들을 최적화하여 곡선으로 표현한 것이다. 3가지 풍화토 시료에 따라 van Genuchten과 Fredlund & Xing의 식으로 나타내었다. 두 방정식은 간극크기 분포함수(Leong and Rahardjo, 1997)를 이용하여 a , n , m 는 같은 유형으로 변화한다. 따라서, van Genuchten 식에서 $\alpha = 1/a$ 이다.

풍화토의 3가지 분류에서 곡선의 유형을 비교할 때, SP와 SM의 형태는 각각 모래질 흙과 점토질 흙에서 볼 수 있는 변형을 나타내고 있으며, SW는 SP와 SM 곡선의 중간 형태로 나타난다. 곡선 식에서 공기함입값을 표현하는 변수 a 값의 변화로 SW, SP, SM의 유형 변화를 알 수 있다. No. 200체의 통과량이 많은 SM의 변수 a 값이 세립질이 비슷한 SW와 SP보다 비교적 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fredlund & Xing의 식에서, SW의 변수 a 가 SM과 SP의 중간의 값으로 표현되고 있음을 알 수 있다.

5. 강우시 사면의 포화깊이 측정

강우시 무한사면에 침투하는 침투수에 의해 발생하는 포화깊이는 표면파괴 또는 사면의 내부파괴를 일으키는데 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 이런 사면의 포화깊이를 파악하기 위해 Green & Ampt의 모델식을 이용하였다. 국내 여러 곳의 화강풍화토를 대상으로 식 (2)와 식 (6)을 적용하여 산정하였으며, 그 결과는 그림

표 3. 지역별 흙의 종류와 포화투수계수

지역 \ 물성	USCS	k_s (cm/s)	θ_i (%)	θ_s (%)	$\Delta \mu$ (%)
충남 성환	SM	1.30×10^{-5}	18.46	43.46	25
경기 옥수	SW	7.08×10^{-5}	23.22	43.07	19.85
서울 남산	SM	6.30×10^{-5}	27.23	43.46	16.23

14에서부터 그림 16과 같다.

$$I_{\min} = \frac{\mu}{T_{\min}} \left[z_w - S_w \cdot \ln \left(\frac{S_w + z_w}{S_w} \right) \right] \left(\frac{z_w + S_w}{z_w} \right) \quad (6)$$

여기서, I_{\min} 는 최소강우강도, μ 는 체적함수비의 전후 변화량($\theta_s - \theta_i$), T_{\min} 는 최소강우 지속시간, S_w 는 젖은 경계면의 모관흡수력(wetting front suction) 그리고 z_w 는 포화깊이를 나타낸다. 그리고, 표 3은 본 실험을 위해 문헌에서 얻은 적용대상 지반의 물성값들을 나타낸 것이다(김상규, 1999; 윤현중, 1986; 김영득, 1990).

식 (2)와 식 (6)에 적용되는 체적함수비($\Delta \mu$)는 초기 체적함수비(θ_i)에서 완전포화가 되는 최종 체적함수비(θ_s)의 차이를 나타낸다.

5.1 강우강도-포화깊이 관계

강우강도-포화깊이 관계도는 각 지역마다 초기체적함수비에서 강우지속시간을 일정하게 증가하며 침투되어 젖은 경계면(wetting front)의 suction값의 크기에 따라 비교한 그래프들이다. 강우지속시간은 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 48, 72, 96시간으로써 11가지로 나누어 비교한 결과 Green & Ampt의 모델식 특성상 강우지속시

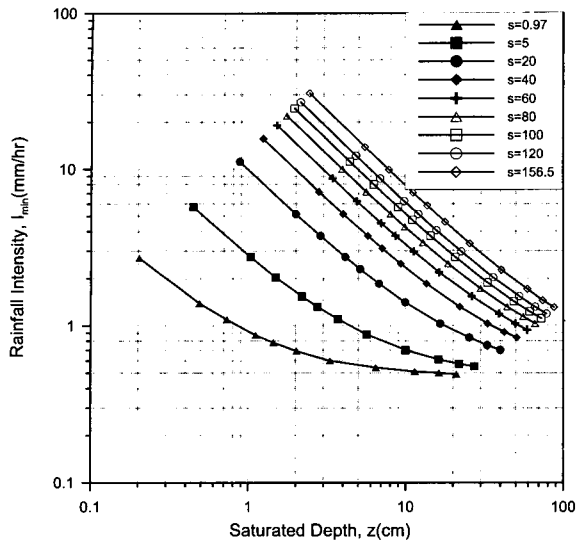


그림 14. 충남 성환지방(SM)의 예상 포화깊이

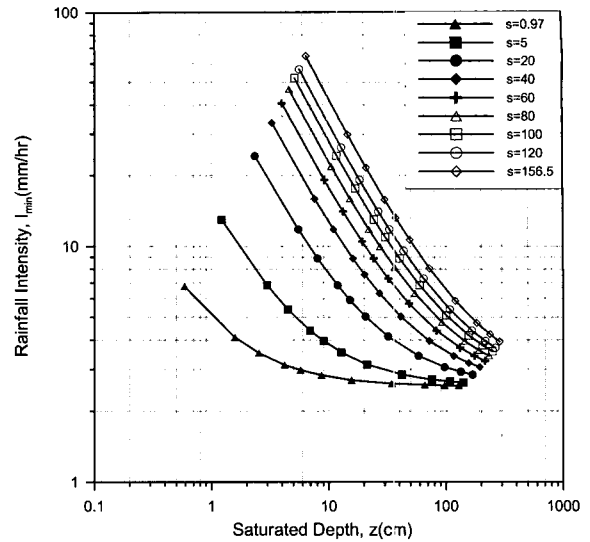


그림 15. 경기 옥수지방(SW)의 예상 포화깊이

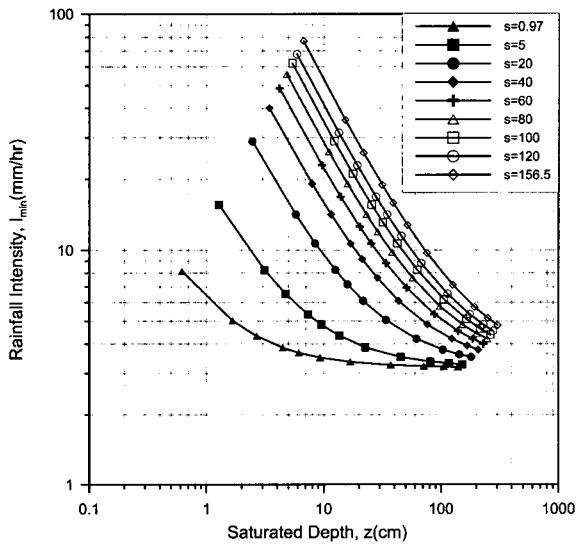


그림 16. 서울 남산(SM)의 예상 포화깊이

간과 강우강도는 반비례 경향을 보였다.

그림 14부터 그림 16에서 나타난 것과 같이 wetting front suction값이 낮을수록 높은 강우강도에서 사면에 얇은 포화깊이를 나타내며, wetting front suction값이 높을수록 낮은 강우강도에서 포화되는 깊이가 깊어지는 현상을 나타낸다. 포화깊이에 영향을 주는 요소 중에서 가장 큰 영향을 주는 요소는 현장 사면의 초기지반 상태이다. 무한사면의 자연함수비인 초기체적함수비가 클수록 같은 wetting front suction과 같은 시간에 따라 포화깊이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

5.2 강우강도-강우지속시간 관계

그림 17부터 그림 19에서 나타난 강우강도(I_{min})는 지반의 침투조건을 나타낸다. 이러한 침투비율은 식 (2) 및 식 (6)의 모델식으로부터 $k_w(z_w+S_w)/z_w$ 의 관계를 유도할 수 있다. 따라서, 모델식은 현장 강우강도에 관계없이 침투비율 조건에 따라 사면 내의 침투가 이루어진다.

그림 17에서 충남성환 지방의 강우강도값(I_{min})이 다른 지역보다 현저히 낮은 값을 나타내고 있다. 그 이유는 사면의 침투비율에 크게 영향을 주는 투수계수값이 두 지역보다 낮고, 초기 체적함수비값에 따른 wetting front suction값이 다른 두 지역보다 높기 때문에 같은 포화깊이를 나타내기 위하여 긴 강우지속시간이 필요하다는 걸 알 수 있다.

6. 모델식과 수치해석에 의한 포화깊이 비교

본 연구에서는 Green & Ampt의 모델식을 이용하여 강우시 예측된 포화깊이를 2차원 불포화 침투해석이 가능한 상용프로그램인 SEEP/W(GEO-SLOPE International, 1994) 해석값과 비교·분석하였다. 수치해석에 적용된 경계조건 또한 모델식에 적용한 것과 같은 조건으로 수행하였다. SEEP/W의 해석결과에서 포화깊이로 판단된 경계지점을 압력수두로 나타내면, 부압력인 -0.2m의 suction값은 포화깊이에 따른 사면의 안전을 해석과정에서 깊이에 따라 변하는 부압력 값들 중에서 현저히 안전율이 떨어지는 경계지점이다. 따라서, 사면 표면으

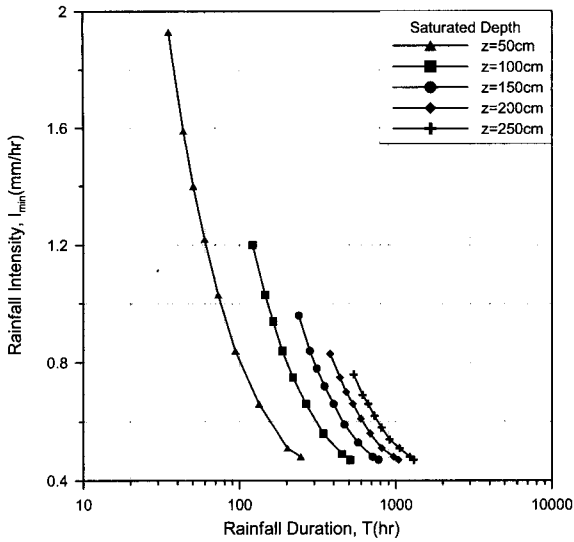


그림 17. 충남 성환지방(SM)의 예상 포화깊이

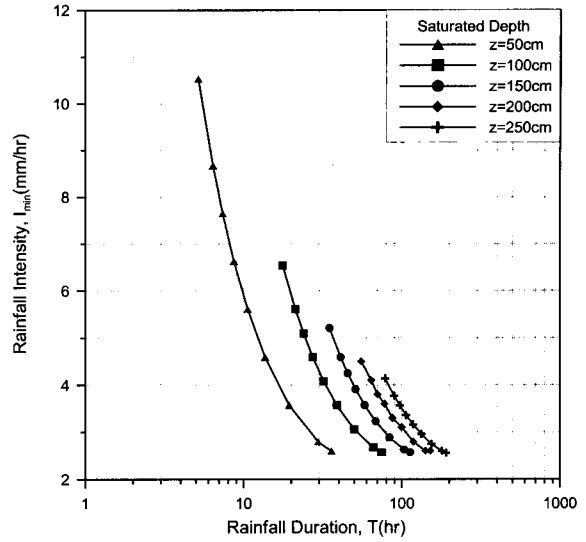


그림 18. 경기 옥수지방(SW)의 예상 포화깊이

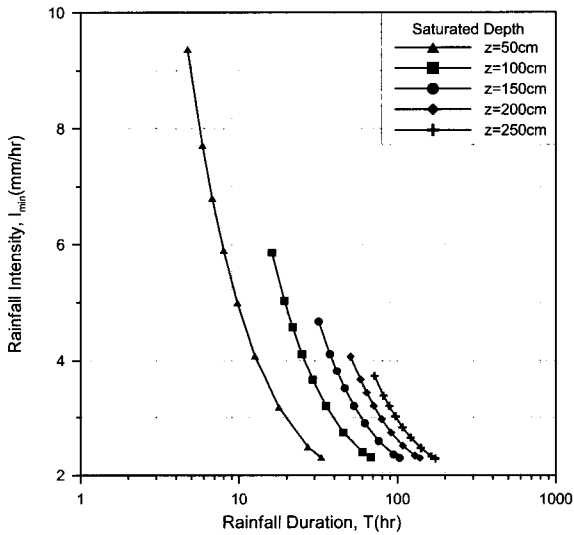


그림 19. 서울 남산(SM)의 예상 포화깊이

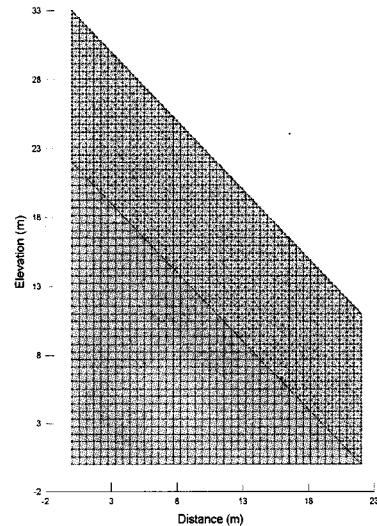


그림 20. 수치해석상의 무한사면 격자요소망(SEEP/W)

로부터 -0.2m의 지점까지 포화되어 있다고 가정한 수치이다. 수치해석상에서 포화깊이를 나타내는 경계는 -0.2m로 결정하였으며 사면에 5m 이상의 포화깊이를 갖는 조건은 전체사면이 포화된 상태로 간주하였다.

6.1 수치해석의 경계조건

Green & Ampt의 모델식과 침투깊이를 비교하기 위하여 동일한 조건으로 수치해석을 수행하였으며, 그림 20은 해석에 사용한 격자요소망이다.

6.2 추정식과 수치해석의 비교

다음 표 4와 표 5는 Green & Ampt의 모델식에 의해 추정된 각 지역별 포화깊이와 수치해석 결과 값을 비교한 것이다.

충남 성환지방의 경우, 포화깊이 40에서부터 60cm에서 Green & Ampt의 모델식과 수치해석간에는 차이를 보이지만, 80에서부터 120cm에서는 비교적 근접한다. Wetting front suction값이 증가하고 시간이 일정할 때 일반적으로 사면에 침투되는 포화깊이는 작아져야 하므로 수치해석에 비해 모델식의 오차값이 크다는 걸 알 수 있다. 또, 경기 옥수지방에서는 포화깊이 80cm근처에서 Green &

표 4. Wetting front suction별 포화깊이(cm) 비교(충남성환, SM)

suction	해석방법	강우지속시간 (hr)										
		0.1	0.5	1	2	3	5	10	24	48	72	96
40cm	Green-Ampt	1.2	2.8	4.0	5.7	7.1	9.3	13.5	22.1	33.1	42.4	50.7
	SEEP/W	9.8	11.2	12.6	18.2	26.6	33.6	47.7	79.9	82.7	180.8	231.3
60cm	Green-Ampt	1.5	3.4	4.9	7.0	8.6	11.2	16.3	26.3	39.1	50.0	59.1
	SEEP/W	4.2	7.0	8.4	9.8	12.6	18.2	25.2	40.7	63.1	86.9	121.1
80cm	Green-Ampt	1.7	3.9	5.6	8.0	9.9	12.9	18.6	29.9	44.1	55.8	66.2
	SEEP/W	1.4	2.8	4.2	7.0	9.8	12.6	16.8	28.0	44.9	61.7	92.5
100cm	Green-Ampt	1.9	4.4	6.3	8.9	11.0	14.3	20.6	33.0	48.6	61.3	72.5
	SEEP/W	1.0	1.4	2.8	4.2	7.0	11.2	14.0	25.2	42.1	54.7	70.1
120cm	Green-Ampt	2.1	4.8	6.8	9.7	12.0	15.6	22.5	35.9	52.6	66.2	78.2
	SEEP/W	1.0	1.4	2.8	5.6	7.0	9.8	14.0	25.2	39.3	51.9	63.1

표 5. Wetting front suction별 포화깊이(cm) 비교(경기옥수, SW)

suction	해석방법	강우지속시간 (hr)										
		0.1	0.5	1	2	3	5	10	24	48	72	96
20cm	Green-Ampt	2.4	5.5	8.0	11.9	15.1	20.6	31.9	58.1	97.0	133.2	168.1
	SEEP/W	28	68.7	107.9	157	316.8	포화	포화	포화	포화	포화	포화
40cm	Green-Ampt	3.3	7.6	11.0	16.1	20.2	27.1	41.1	72.0	116.1	156.0	193.9
	SEEP/W	15.4	40.7	64.5	95.3	117.8	155.6	227.1	포화	포화	포화	포화
60cm	Green-Ampt	4.0	9.2	13.3	19.3	24.1	32.2	48.2	82.9	131.2	174.2	214.5
	SEEP/W	9.8	22.4	32.2	47.7	64.5	84.1	123.4	포화	포화	포화	포화
80cm	Green-Ampt	4.6	10.6	15.2	22.0	27.5	36.5	54.3	92.1	144.0	189.7	232.2
	SEEP/W	8.4	14.0	22.4	32.2	42.1	56.1	82.7	131.8	포화	포화	포화
100cm	Green-Ampt	5.2	11.8	16.9	24.4	30.4	40.2	59.6	100.3	155.4	203.5	248
	SEEP/W	1.0	1.1	7.0	12.6	14.0	16.8	26.6	40.7	58.9	81.3	98.1
120cm	Green-Ampt	5.6	12.8	18.4	26.6	33.0	43.6	64.4	107.7	165.8	216	262.3
	SEEP/W	1.0	1.1	5.6	11.2	12.6	15.4	19.6	30.8	50.5	63.1	78.5

Ampt의 모델식과 수치해석의 결과 값이 접근하며 포화 깊이가 80cm 이상에서는 많은 차이를 나타나고 있다. 또, 충남 성환지방과 경기 옥수지방에서 간편법에 의한 수치해석 결과 값의 접근성을 비교할 때, 투수계수값이 크면 클수록 오차 또한 커지고 있다.

상용프로그램인 SEEP/W를 이용하여 포화깊이를 추정 한 결과, 포화깊이는 사면경사의 변화에는 영향을 보이지 않고, 함수특성곡선에 의해 변하는 불포화지반의 투수계수와 지반에 침투되어 포화깊이를 형성하게 하는 wetting front suction값에 큰 영향을 받고 있었다.

본 실험에서도 흙의 두 가지 특성인 SW와 SM을 비교할 때, 공통적으로 wetting front suction값 80cm을 중심으로 Green & Ampt의 모델식과 수치해석의 포화깊이가 유사한 값을 나타내며 80cm보다 작거나 큰 값에서는 점점 오차가 커진다는 것을 알 수 있었다.

6.3 포화깊이의 비교

Green & Ampt의 모델식에 의한 강우강도는 사면에 침투정도를 나타내는 강우강도의 최소값이므로 강우지속시간에 따른 강우강도 값의 범위가 실제로 내리는 강우와는 많은 차이가 있다. 실제 사면에서 suction 값이 증가하면서 사면의 포화깊이가 줄어드는 경향에 어긋나는 Green & Ampt의 모델식은 작은 강우강도와 높은 suction 값에서도 포화깊이가 증가하는 경향을 보인다.

그림 21부터 그림 24와 같이 수치해석 결과와 Green & Ampt의 모델식의 비교에서 침투수에 저항하는 wetting front suction값을 80cm 근처에서 비교적 포화깊이에 대한 값들이 유사하게 나타나고 있다. 본 연구에서는 체적 함수비 15.3에서부터 25.7%의 범위에서 화강풍화토의 wetting front suction의 실험값으로 4에서 12kPa(40~120cm)정도의 값을 나타내었듯이, 지반의 환경과 강우

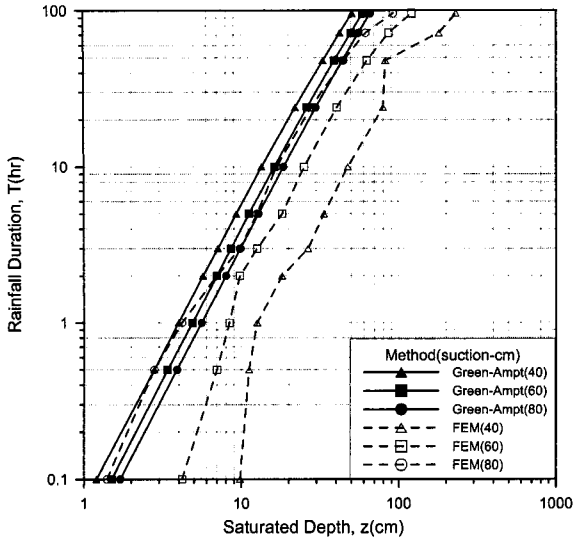


그림 21. 충남성환 [suction(SM)=40~80cm]

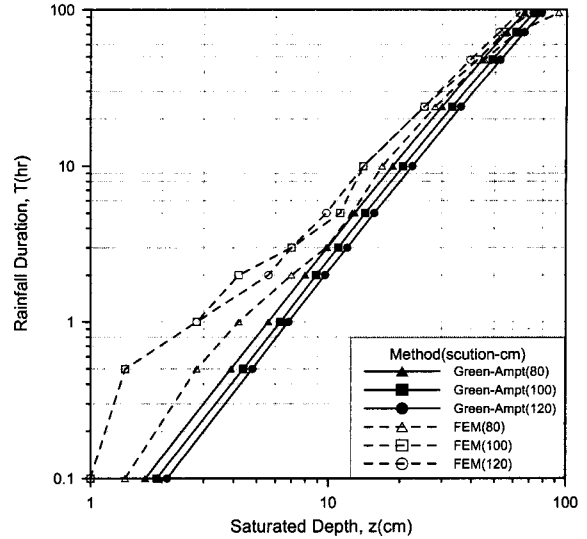


그림 22. 충남성환 [suction(SM)=80~120cm]

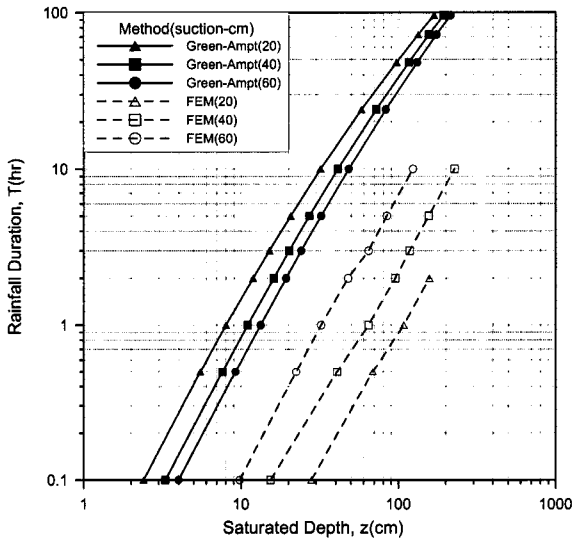


그림 23. 경기옥수 [suction(SW)=20~60cm]

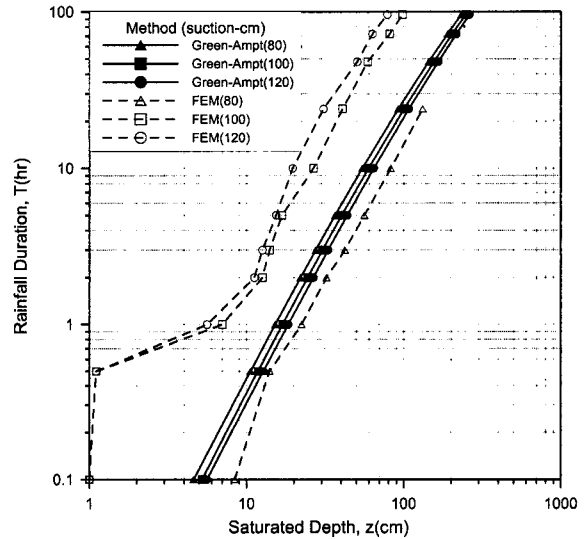


그림 24. 경기옥수 [suction(SW)=80~120cm]

의 조건에 따라 변하는 사면의 wetting front suction값의 모든 범위에 대하여 모델식을 이용하여 얻은 포화깊이 값은 비교적 과다한 예측값을 보임을 알 수 있다.

7. 포화 깊이에 따른 안정성 평가

침투해석으로 추정된 포화깊이를 이용하여 불포화 상태를 고려할 수 있는 한계평형해석 상용 프로그램인 SLOPE/W(Geo-Slope International, 1994)를 사용하여 사면안정 해석을 수행하였다. 본 실험으로 산정된 화강풍화토의 함수특성곡선으로 불포화지반의 강도정수를 계산해 안정성 검토를 하였다. 다음 식 (7)은 함수특성곡

선 만으로 불포화 강도정수 ϕ^b 를 구하기 위해 Fredlund 등(1996)이 제안한 식이다.

$$\tan \phi^b = \tan \phi' \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right) \quad (7)$$

여기서, ϕ' 는 포화토의 내부마찰각, S는 포화도 그리고 S_r 는 잔류포화도를 나타낸다.

이때, 식 (7)에 나타난 포화도는 본 실험에서 산정한 체적함수비로부터 다음 식 (8)을 적용하여 구하였다.

$$\theta = \frac{S \cdot e}{1 + e} = S \cdot n \quad (8)$$

표 6. 흙 종류별 포화도 및 잔류포화도

흙 종류	S(%)	S _r (%)	초기 체적함수비	비고
SW	52	18	23.22%	경기옥수
SM	39	19	18.46%	충남성환

여기서, θ 는 체적함수비, e 는 간극비 그리고 n 은 간극률을 나타낸다. 표 6은 초기 체적함수비에 대한 포화도(S)와, 실험에서 얻은 함수특성곡선을 변환하여 포화도와 suction의 관계로부터 얻은 잔류포화도(S_r) 값을 나타낸다.

다음 표 7은 국내 화강풍화토의 일반적인 강도정수 및 식 (7)을 적용하여 얻은 불포화지반의 강도정수와 그에 대한 비율을 나타낸다. 일반적으로 불포화해석에 따른 불포화지반의 강도정수비(ϕ^b/ϕ)값을 대략 0.2정도로 가정하여 해석하는 경우도 있다(Fourie, Rowe and Blight, 1999).

표 7. 화강풍화토의 불포화 강도정수

지반종류	γ_s (t/m ³)	c (kg/cm ²)	$\phi(o)$	SW	SM
				$\phi^b(\phi^b/\phi)$	$\phi^b(\phi^b/\phi)$
느슨	1.8	0.1	25	10.9(0.44)	6.6(0.26)
중간	1.8	0.1	29	12.9(0.44)	7.8(0.27)
조밀	1.9	0.1	33	15.1(0.46)	9.1(0.28)

7.1 포화지반 해석

먼저 포화지반의 안정성 평가는 강우시 침투된 포화 깊이를 변화시켜 기존의 포화지반의 강도정수를 이용

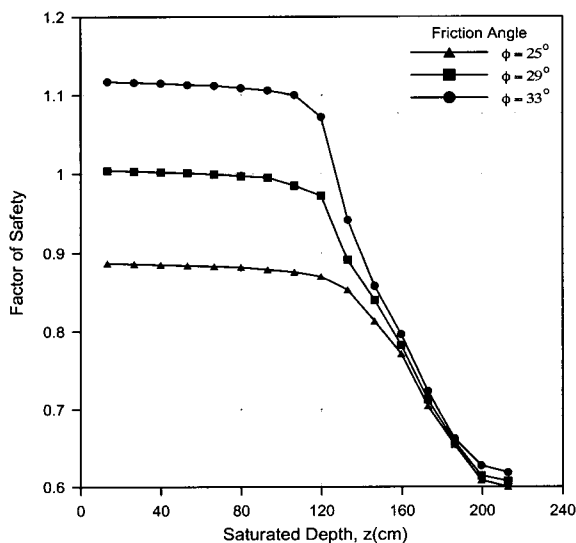


그림 25. 포화깊이에 따른 포화지반 안전율 (충남성환)

하여 사면안정 해석을 수행하였다. 그 결과, 사면의 한계평형해석 상용프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 사면의 얇은 파괴에 대한 안전율을 그림 25부터 그림 26에 나타내었다.

강우 초기에는 포화깊이가 표층에 얇게 위치해 있어서 지반강도정수에 대해 분명한 안전율의 차이를 보이지만, 대략 1.3m정도의 포화깊이가 되면서 사면파괴는 대부분 포화된 부분에서만 전체 파괴면을 형성하므로 급격한 사면의 안전율 저하가 발생하였다.

7.2 불포화지반 해석과의 비교

불포화지반의 강도정수를 적용하여 해석한 사면의 안정성 평가에서는 불포화지반의 강도정수비(ϕ^b/ϕ)가 증가하면서 포화깊이에 따른 안전율의 차이를 구하였다. 또한, 포화깊이의 차이보다 초기 함수비에 좌우하는 wetting front suction값에 따라 안전율의 영향정도를 파악하였다.

충남 성환지방과 경기 옥수지방을 대상으로 해석한 불포화지반의 해석시, 포화깊이의 전체 변화구간에서 안전율의 변화가 극히 적게 나타나 포화깊이 0.5m와 1m의 두가지의 경우를 대상으로 wetting front suction 값에 따라 비교하였으며 그 결과는 그림 27과 그림 28과 같다.

그림 29와 그림 30은 포화지반으로 해석한 사면의 안전율과 불포화지반정수를 적용해서 얻은 안전율을 비교한 것이다. 포화지반과 불포화지반 모두 내부마찰각

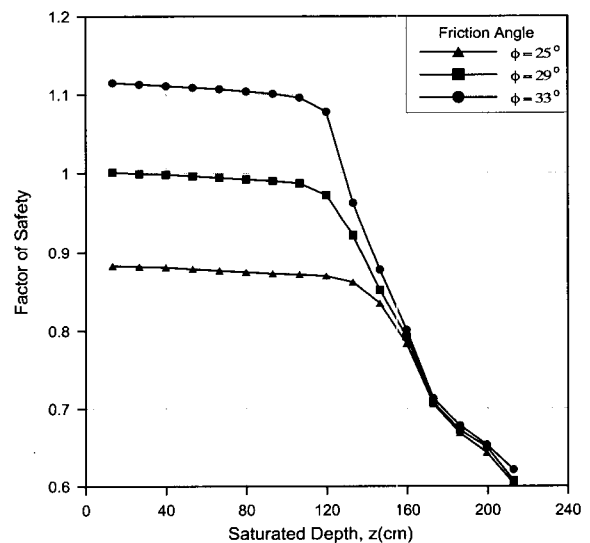


그림 26. 포화깊이에 따른 포화지반 안전율 (경기옥수)

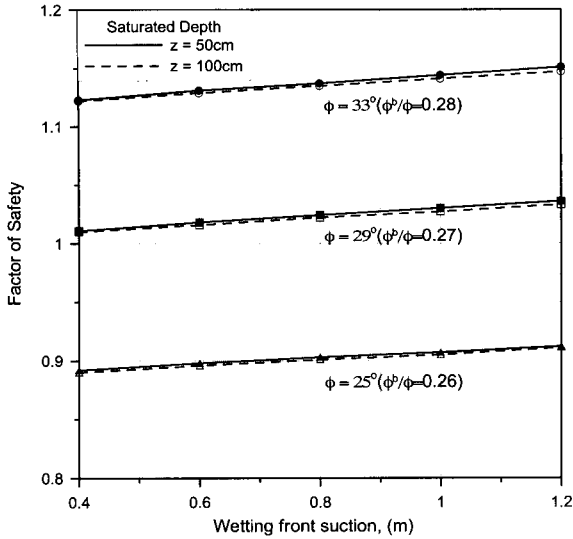


그림 27. suction 값에 따른 불포화지반의 안전율 (충남성환)

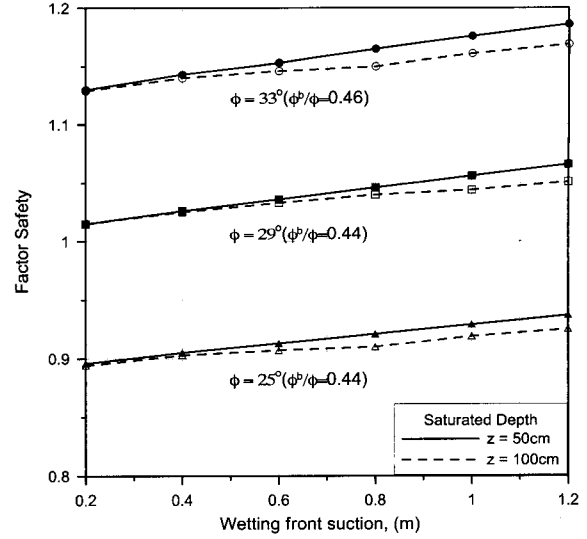


그림 28. suction 값에 따른 불포화지반의 안전율 (경기옥수)

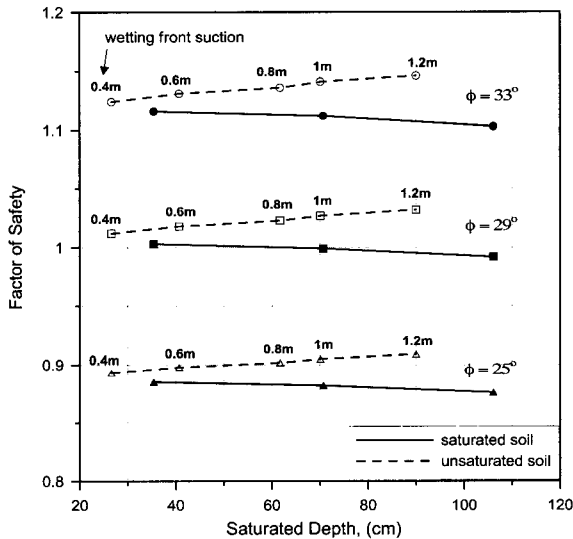


그림 29. 포화지반과 불포화지반의 안전율 비교 (충남성환)

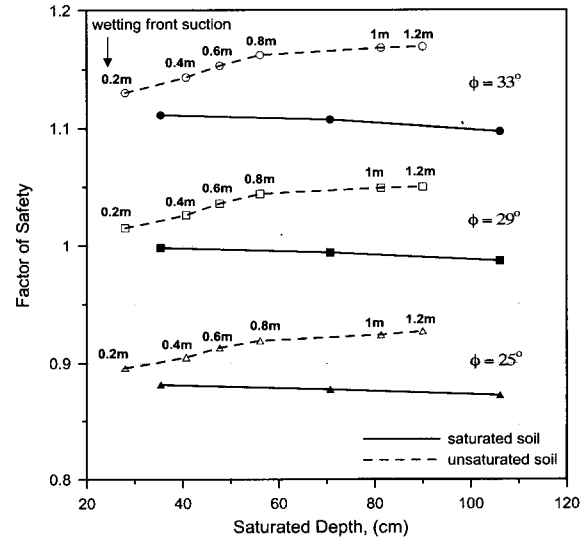


그림 30. 포화지반과 불포화지반의 안전율 비교 (경기옥수)

25°, 29°, 33°를 갖는 강도정수의 값을 토대로 비교하였다. 불포화지반에서는 포화깊이보다 wetting front suction 값이 안전율에 더 큰 영향을 미치고, wetting front suction 값이 크면 클수록 안전율이 증가함을 알 수 있었다.

8. 결론

본 연구에서는 불포화 상태의 무한사면에 침투하는 강우에 대하여 강우지속시간과 강우강도에 따라 사면의 포화깊이를 산정하기 위해서 불포화지반의 고유특성인 함수특성곡선 실험을 수행하였으며, 포화깊이를 구하는 모델식과 수치해석으로 그 차이점을 분석하여

포화깊이에 따른 사면의 안정성을 비교하였다. 이에, 불포화 사면의 지반 특성으로 국내에 널리 분포되어 있는 화강풍화토를 대상으로 3가지 입도(SW, SP, SM)에 따른 함수특성곡선을 구하고 그에 따른 포화지반과 불포화지반의 포화깊이에 따른 사면의 안정성을 비교·분석하였다.

본 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 화강풍화토를 대상으로 실험한 함수특성곡선에서 SW, SP, SM의 3가지 곡선의 형태는 모래질 흙과 점토질 흙의 중간단계에서 곡선의 형태가 유지되었으며, 각각의 곡선형태 또한 SP는 모래질 흙, SM은 점

토질 흙의 곡선변화에 유사하였고, 그 중간 형태로 SW의 곡선이 위치하였다.

- (2) 최근까지 포화깊이를 추정하는데 사용되는 Green & Ampt의 모델식은 초기 대입되는 투수계수 값이 포화투수계수 값으로써 현장지반에 적용되는 불포화 투수계수와 많은 차이를 나타내며, 특히 강우강도와 강우지속시간의 관계에서 실제로 적용되는 값들을 비교할 때, 실제 포화깊이보다 과대 추정할 수 있다.
- (3) Green & Ampt의 모델식과 수치해석의 포화깊이 비교에서 wetting front suction값에 따라 변하는 포화깊이는 그 수치가 80cm를 전·후로 포화되는 값들이 유사하며 그 이상과 그 이하의 값들에 대해서는 점점 더 오차가 커지는 변화를 볼 수 있었다. 이와 같이, wetting front suction값에 의해 변하는 포화깊이를 고려할 때, Green & Ampt의 모델식의 제한적인 적용범위를 알 수 있었다.
- (4) 포화깊이가 대략 1.3m정도에서부터 안전율이 급격히 떨어짐을 알 수 있었다. 즉, 포화깊이 1.3m는 알은 파괴가 이루어지는 임계파괴깊이 임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부·한국건설기술연구원 (2000), "산지사면과 급경사면 안정성평가 및 보강대책 시스템 개발", 97사업 최종보고서, pp. 국내 사면 파괴특성을 고려한 토사사면의 안정해석 및 보강기법 시스템 개발.
2. 김상규, 류지협, 김동현 (1999), "불포화 풍화토의 침투특성" 한국토목학회논문집, Vol.19, No.Ⅲ-3, pp.995~1002.
3. 조성은, 이승래 (2000), "강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가", 한국지반공학학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 107~116.
4. 조성은, 이승래 (2001), "불포화 토사사면의 알은 파괴해석에 대한 비교 연구", 한국지반공학학회논문집, 제17권, 제4호, pp.135~143.
5. Annual Book of ASTM Standards (2000), "Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper", Vol.04.08. D5298-00, pp. 154-159.
6. Daniel Pradel and Glen Raad (1993), "Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.119, No.2, pp.315~332.
7. 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.1~3.
8. Fredlund, D. G., and Anqing Xing (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", Can. Geotech. J., Vol.31, pp.521~532.
9. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley and Sons, Inc.
10. Leong, E. C., and Rahardjo, H., (1997), "Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.123, No.12, December, ASCE.
11. Maidment, David R. (1993), "Handbook of hydrology", David R. Maidment, editor in chief. McGraw-Hill, Inc., pp.5.32~5.51.

(접수일자 2002. 1. 14, 심사완료일 2002. 3. 30)