

# 강우침투시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향

## Influence of Rainfall Intensity and Saturated Permeability on Slope Stability during Rainfall Infiltration

이 승 래<sup>1</sup> Lee, Seung-Rae

오 태 규<sup>2</sup> Oh, Tae-Kyu

김 윤 기<sup>3</sup> Kim, Yun-Ki

김 희 철<sup>4</sup> Kim, Hee-Chul

### Abstract

The unsaturated characteristics of Korean weathered granite soils have been studied to investigate the influence of saturated permeability, rainfall intensity and soil-water characteristic curve (SWCC) on the slope stability. The upper, average and lower SWCCs were estimated from the publication and experimental results using the statistical concept. The roughly estimated SWCC can be used for the soils without experimental results by relating SWCC with the particle size distribution curve. An appropriate ratio between the saturated permeability and the rainfall intensity ( $k_s/i$ ) was also suggested for practical use in designing the slopes by investigating the time-dependent variation of slope instability during the rainfall. The slope stability was deteriorated from the initiation of rainfall and recovered again after the factor of safety reached the critical value. The FS of the slope decreased at first and then increased after reaching the critical value during the rainfall. As a result, the slope instability was not related with an absolute rainfall intensity but with the ratio between the saturated permeability and the rainfall intensity. In case of the upper SWCC, the critical condition occurred when the ratio between the saturated permeability and the rainfall intensity was in the range of 1.0~2.0.

### 요 지

본 연구에서는 불포화 지반의 특성을 파악하고, 포화투수계수( $k_s$ )와 강우강도( $i$ ) 및 함수특성곡선(SWCC)이 사면의 안정성에 어떠한 영향을 주는지 연관성을 파악하기 위해 국내 지반에 폭넓게 분포하고 있는 화강풍화토에 대해 연구를 수행하였다. 기존 연구자료 및 실험을 통해 얻은 정규화 함수특성곡선을 데이터베이스화하고 통계적 개념을 도입하여 상한·평균·하한의 함수특성곡선을 추정하였다. 입도분포곡선과 상한·평균·하한의 함수특성곡선과의 관계를 바탕으로 함수특성곡선 자료가 없는 지반의 함수특성곡선을 개략적으로 추정하는 방법 또한 제안하였다. 그리고 추정된 상한·평균·하한의 함수특성곡선을 이용하여 강우시 사면 구조물의 시간 의존적 안전율 변화 추이를 통해 실무적으로 사용할 수 있는 포화투수계수와 강우강도의 비를 제안하였다. 연구결과에 의하면 강우 침투에 의한 안전율 변화는 강우강도의 절대 크기에 좌우되지 않고 강우강도와 투수계수의 비에 영향을 받는다. 그리고 사면의 안전율은 강우 침투에 의해 감소하기 시작하며 임계값에 도달한 이후 다시 상승하는 것을 알 수 있다. 수치해석결과 가장 낮은 안전율을 보이는 때는 상한의 함수특성곡선을 이용할 경우로, 이때 포화 투수계수값이 강우강도와 같거나 두 배가 될 때이다.

**Keywords** : Coefficient of permeability, Rainfall infiltration, SWCC, Slope stability, Unsaturated soils

1 정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, srlee@kaist.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, (주)대우건설 토목사업본부 (Member, DAEWOO E&C Co. Ltd.)

3 정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

4 정회원, (주)대우건설 토목사업본부 (Member, DAEWOO E&C Co. Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 지반공학 분야에서 고전적인 포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동이 제대로 해석되지 않아 불포화토에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 국내의 경우 강우시 사면 붕괴가 빈번하게 발생하며 이 경우 사면의 안정성을 적절히 평가하기 위해서 강우에 의한 지반의 수리학적 거동과 강우침투에 의한 영향을 파악해야 한다.

과거에는 강우로 인한 지하수위 상승으로 간극수압이 증가하고 이로 인해 전단강도가 감소하여 사면이 파괴에 이르는 것으로 가정하였다. 그러나 불포화상태의 지반에서는 강우에 의한 침윤전선의 진행에 의해 모관흡수력이 감소되고 이로 인해 전단강도가 감소하는 현상이 대부분 사면 붕괴의 원인으로 알려져 있다(Fredlund과 Rahardjo, 1995). 이러한 붕괴현상은 포화토 개념으로는 설명하기 어렵기 때문에 많은 연구자들은 강우침투를 고려한 불포화토 개념을 이용하여 이 문제에 접근하고 있다(조성은과 이승래, 2000; 조성은, 2001; 김재홍 등, 2002).

자연지반은 지하수위의 위치에 따라 포화 영역과 불포화 영역으로 나뉘어지며 지하수위면 위로는 불포화 영역이 존재한다. 불포화토 내에서는 간극에서 발생하는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력으로 인해 모세관현상과 흡착현상이 일어나고 이는 부의 간극수압을 발생시킨다. 국내의 경우 기초지반 또는 건설재료로 이용되는 흙은 거의 불포화 상태인 화강풍화토이고 이 흙의 대부분은 세립분(75 $\mu$ m)이 60% 이하이고 입도분포가 양호한 조립토이며, 누적된 간극크기는 함수특성곡선과 관련이 있기 때문에 함수비( $\theta$ )와 모관흡수력( $\psi$ )과의 관계를 나타내는 불포화토의 주요한 기본물성치인 함수특성곡선과 입도분포는 유사한 형태를 보인다. 또한 이해지(2004), Arya와 Paris(1981) 등의 연구결과는 입도분포곡선과 함수특성곡선이 밀접한 연관성이 있음을 보여주며 입도분포곡선으로부터 함수특성곡선을 추정하는 방법을 제시하고 있다.

본 연구에서는 기존 연구자료와 본 연구의 실험을 통해 얻은 국내 화강풍화토의 함수특성곡선 및 입도분포곡선과 간극비 자료를 바탕으로 이들의 상관관계를 살펴보고자 하였다. 그리고 강우시 빈번히 발생하는 사면 붕괴에 대한 원인을 규명하기 위해 강우강도와 포화투수계수 그리고 함수특성곡선이 사면의 안정성에 주는

영향성을 평가하여, 기존 포화토 이론으로 설명하기 힘든 사면 붕괴 원인을 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 함수특성곡선 추정

불포화 지반은 흙 입자, 물, 공기, 물-공기 접촉면의 4상으로 이루어져 있기 때문에 불포화토의 흐름, 변형 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 간극수와 간극공기 사이의 압력차이로 유발되는 모관흡수력을 고려해야 한다(Fredlund 등, 1994; Vanapalli 등, 1996). 함수특성곡선은 흙 속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되며 전형적인 함수특성곡선은 S자 형태를 보인다. 함수특성곡선은 불포화 정도에 따른 모관흡수력의 유발정도를 나타내는 상관관계이고, 침투해석, 안정해석시 필요한 불포화투수함수와 불포화토의 전단강도 증가분 등은 함수특성곡선으로부터 유추되기 때문에 함수특성곡선은 불포화 특성을 결정하는 중요한 기본 물성이다.

### 2.1 함수특성곡선식

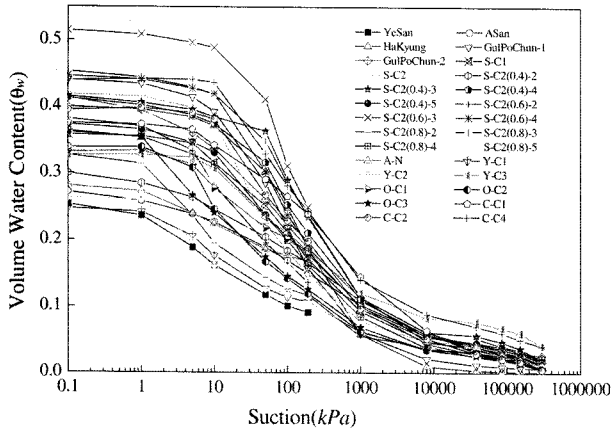
기존 연구자들은 실내실험을 통해 얻은 모관흡수력과 함수비 자료로부터 곡선맞춤(curve fitting)을 통해 함수특성곡선을 수식으로 표현하였다. 연구 초기에는 실험적 제약 등에 의해 전체 모관흡수력 범위에 대해 만족할 만한 함수특성곡선식을 제시 하지 못하였으나 최근 Fredlund와 Xing(1994)은 전체 모관흡수력 범위에 대해서 함수특성곡선을 적절히 표현할 수 있는 이론식을 제안하였다.

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

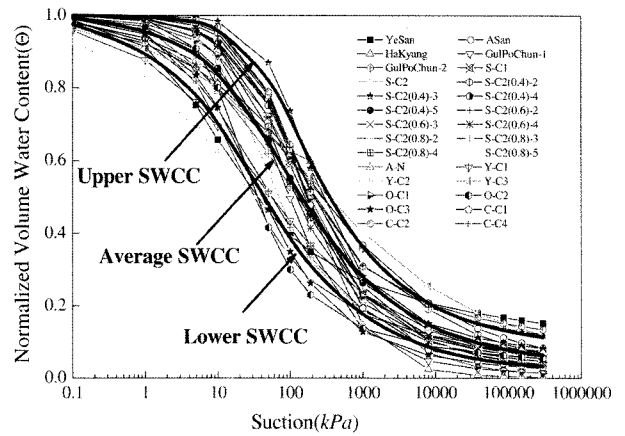
여기서,  $\Theta$ 는 정규화된 체적함수비  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 은 불포화 지반의 주요 특성을 알 수 있는 매개변수를 나타낸다. 또한  $\Theta$ 는  $(\theta_w - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ 으로 표현되며, 여기서  $\theta_w$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ 는 각각 체적함수비, 잔류체적함수비, 포화체적함수비이다. 본 연구에서는 잔류체적함수비( $\theta_r$ )를 0으로 가정하였다.

### 2.2 함수특성곡선의 추정

함수특성곡선은 고유한 지반 물성특성이므로 개별



(a) SWCC data set



(b) Normalized SWCC with Boundary Curves

그림 1. 함수특성곡선 데이터 베이스

지반에 대해 실험을 통해 구해야 한다. 하지만 실험에 따르는 시간, 비용적인 문제로 실험을 통해 구하기 힘든 경우가 많이 발생한다. 함수특성은 흙의 고유한 물성이므로 다른 물성들과 상호 연관될 수 있기 때문에 이러한 점을 바탕으로 여러 연구자들은 함수특성곡선을 유추할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 중 PTF(Pedo-Transfer Function)가 대표적인 방법이다. PTF는 입도분포곡선과 같이 간단하고 기본적인 지반정보로부터 추정되는 불포화도와 관련된 물성함수를 의미하며, Point Regression Method, Functional Parameter Estimation Method, Physio-Empirical Method 등의 접근 방법이 있는데, 이 중 Physio-Empirical Method는 흙의 물리적, 구조적 특성을 기반으로 한 방법으로 Arya & Paris(1981), Fredlund 등(1997), 이혜지(2004)의 연구자들에 의해 연구되었다. 이외에도 이성진(2004)은 인공신경망 모델을 이용하여 함수특성곡선을 추정하는 방법을 제안하였다.

### 2.3 상한, 평균, 하한의 함수특성곡선

본 연구에서는 국내 화강풍화토에 대해 수행된 함수특성곡선 및 입도분포곡선 실험결과에 PTF를 적용하여 함수특성곡선의 범위를 추정하였다. 그림 1(a)는 함수특성곡선 실험 결과를 도시한 것이고, 그림 1(b)는 이것을 포화체적함수비로 나누어 정규화시킨 함수특성곡선이다. 정규화된 함수특성곡선을 토대로 통계적 분석을 통해 상한, 평균, 및 하한의 함수특성곡선을 구하였다. 이때 사용된 함수특성곡선식은 Fredlund & Xing(1994) 모델(식 (1))을 이용하였고, 표 1은 각각 상한, 평균, 하한의 함수특성곡선식에 대한 맞춤변수값을 보여준다. 그

표 1. 여러 함수특성곡선들의 맞춤변수

구분	$a$	$n$	$m$
상한선	76.319	1.148	0.968
평균선	43.539	0.754	1.426
하한선	12.479	0.772	1.467

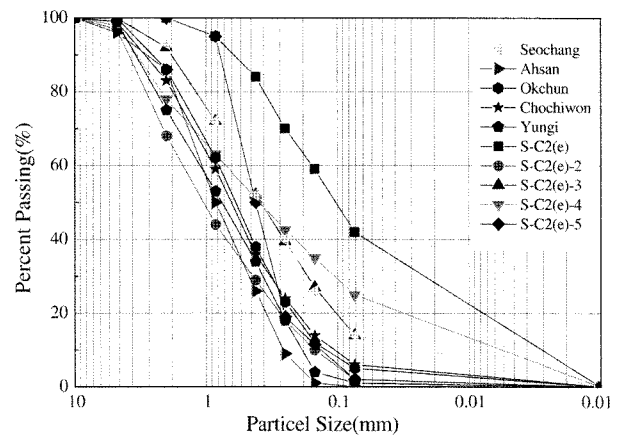


그림 2. 각 시료의 입도분포곡선

림 2는 이때 사용된 시료의 입도분포 곡선을 도시한 것이고, 표 2와 표 3은 본 연구에서 사용된 시료의 지반물성값과 맞춤변수이다.

## 3. 불포화투수함수 추정

### 3.1 투수함수식

Fredlund 등(1994)은 Mualem(1986)이 제안한 통계적 모델에 Fredlund & Xing의 함수특성곡선식을 대입하여 투수함수식을 구하였다. Mualem의 통계적 모델은 세가지 일반적 형태로 표현되며 이중 식 (2)에 함수특성곡선

표 2. 각 현장시료의 조건 및 물성값(이성진, 2004)

Area	Sample	Condition	G <sub>s</sub>	PL	LL	γ <sub>d,max</sub>	OMC (%)	w (%)	e	θ <sub>s</sub>	a	n	m
Okchun (O)	O-C1	Compacted at 0.95 (wet side)	2.67	27.82	37.09	1.70	13.9	19.87	0.57	0.363	193.2	0.7	2.6
	O-C2	Compacted at 0.95 (dry side)				1.70	13.9	7.93	0.57	0.363	13.14	1.4	1.1
	O-C3	Compacted water content of O-C1				1.51	13.9	19.87	0.77	0.435	21.75	0.8	1.774
Chochiwon (C)	C-C1	Compacted at 0.95 (wet side)	2.66	28.96	42.81	1.59	16.25	23.78	0.673	0.4	93.7	1.1	1.6
	C-C2	Compacted at 0.95 (dry side)				1.59	16.25	8.72	0.673	0.4	46.18	1.4	0.8
	C-C3	Compacted water content of C-C1				1.34	16.25	23.78	1.0	0.5	-	-	-
	C-C4	Void ratio and Compacted water content of C-C2 with #40 sieve passing soils				1.59	16.25	8.72	0.673	0.4	46.18	1.105	0.933
Yungi (Y)	Y-C1	Compacted at 0.95 (wet side)	2.63	NP	31.09	1.78	13.63	18.77	0.48	0.320	17.80	0.513	1.694
	Y-C2	Compacted at 0.95 (dry side)				1.78	13.63	8.49	0.48	0.320	3.925	1.5	0.65
	Y-C3	Void ratio and Compacted water content of Y-C1 with #20 sieve passing soils				1.78	13.63	18.77	0.48	0.320	31.82	0.948	0.837
Seochang (S)	S-C1	Compacted at 0.95 (wet side)	2.64	21.09	37.78	1.64	12.5	20.61	0.606	0.370	61.44	0.95	1.4
	S-C2	Compacted at 0.95 (wet side)				1.64	12.5	20.61	0.606	0.370	-	-	-
A-N	-	-	-	-	-	-	-	0.390	0.281	2.37	1.28	0.298	
YeSan	YS	Same as field condition	-	-	-	-	-	0.339	0.253	3.372	0.89	0.812	
Ahsan	A	Same as field condition	2.58	28.16	36.55	-	-	0.39	0.28	113.36	0.452	1.923	
Hakyung	HK	Compacted at 0.95 (wet side)	-	-	-	-	-	0.67	0.4	242.39	0.863	3.246	
Gulpochun (G)	G-1	Same as field condition	-	-	-	-	-	0.79	0.441	72.26	0.9204	2.073	
	G-2	Same as field condition	-	-	-	-	-	0.727	0.421	46.32	0.5813	1.7	

표 3. 각 인공시료의 조건 및 물성값(이성진, 2004)

Area	Sample	Condition	e	θ <sub>s</sub>	a	n	m
Seochang (S)	S-C2(0.4)-2	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-2의 입도분포곡선	0.4	0.312	140.1	0.4869	2
	S-C2(0.4)-3	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-3의 입도분포곡선		0.404	91.87	1.4	1.029
	S-C2(0.4)-4	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-4의 입도분포곡선		0.409	78.9	0.875	1.435
	S-C2(0.4)-5	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-5의 입도분포곡선		0.379	42.08	0.743	1.404
	S-C2(0.6)-2	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-2의 입도분포곡선	0.6	0.394	21.91	0.667	1.658
	S-C2(0.6)-3	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-3의 입도분포곡선		0.51	67.7	1.247	1.196
	S-C2(0.6)-4	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-4의 입도분포곡선		0.447	46	1.058	1.297
	S-C2(0.8)-2	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-2의 입도분포곡선	0.8	0.371	12.76	0.433	2.212
	S-C2(0.8)-3	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-3의 입도분포곡선		0.451	109.97	0.854	1.71
	S-C2(0.8)-4	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-4의 입도분포곡선		0.367	73.08	0.672	1.92
	S-C2(0.8)-5	S-C2 시료의 다짐함수비, S-C2(e)-5의 입도분포곡선		0.425	13.35	1.2	1.15

식 (1)을 대입하고 적분의 수치적 어려움을 피하기 위해 대수축 적분을 하면 식 (3)과 같이 투수곡선식이 표현된다(김윤기, 2003).

$$k_r = S_e^n \frac{\int_0^{\theta_w} \frac{\theta_w - \theta}{\psi^{2+m}} d\theta}{\int_0^{\theta_s} \frac{\theta_w - \theta}{\psi^{2+m}} d\theta} \quad (2)$$

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi) \theta'_w(e^y) dy}{e^y}}{\int_{\ln(\psi_s)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi) \theta'_w(e^y) dy}{e^y}} \quad (3)$$

여기서,  $b = \ln(1,000,000)$

$y =$  모관흡수력의 대수축을 나타내는 적분더미 변수

김윤기(2003)와 최경립(2007)의 연구결과에 따르면 국내 화강풍화토에 대한 불포화 투수실험자료를 분석한 결과 Fredlund 등(1994)의 투수곡선식을 수정하여 사용할 경우 실험으로부터 구해진 실제 화강풍화토의 투수계수 변화를 가장 잘 표현하고 있으므로 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 불포화 투수계수를 유추하였다.

### 3.2 투수함수의 추정

침투 해석 결과는 사면 안정해석에 직접적으로 활용되기 때문에 사면의 안정성 평가에 중요하게 인식되며 침투특성은 투수함수의 영향을 크게 받는다. 투수함수식은 실험에 의해 직접 얻는 것이 가장 합리적인 방법이지만, 실험에 소요되는 시간과 비용의 문제로 인해 일반적으로 함수특성곡선으로부터 추정한다(Fredlund 등, 1994). 본 연구에서는 앞서 제시한 상한, 평균, 하한의 함수특성곡선을 토대로 식 (3)을 이용하여 상한, 평균, 하한의 투수함수를 추정하였다. 추정된 투수함수(그림 3)는 함수특성곡선(그림 1(b))과 같이 각각 상한( $k_{r,up}$ ), 평균( $k_{r,avg}$ ), 하한( $k_{r,low}$ )의 투수함수로 나타났다. 투수함수의 형태는 함수특성곡선의 공기함입치의 영향을 받게 되므로, 하한 함수특성곡선보다 높은 공기함입치가 나타나는 상한 함수특성곡선의 경우 추정된 투수곡선에서도 더 높은 모관흡수력이 유발되어야 비로서 투수계수가 감소하는 특성을 보여주고 있다.

그림 3은 각각 상한, 평균 및 하한의 함수특성곡선으로부터 추정된 투수함수를 보여주고 있고 이들의 투수

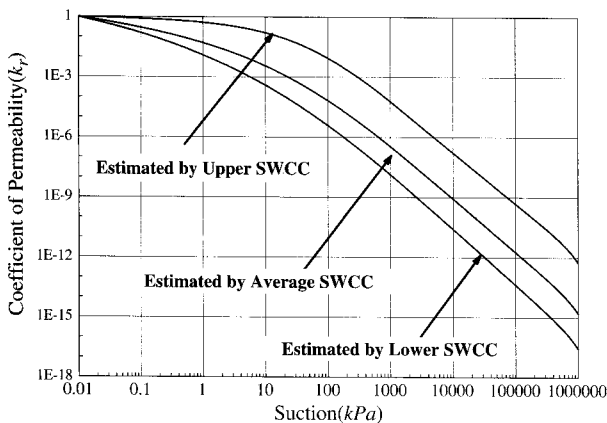


그림 3. 각각의 SWCC로부터 추정된 투수함수

표 4. 각 시료의 곡률계수( $C_z$ )와 투수함수에서의 위치

Specimen	$C_z$	Location in SWCC	Specimen	$C_z$	Location in SWCC	Specimen	$C_z$	Location in SWCC
S-C2(e=0.4)-4 S-C2(e=0.6)-4 S-C2(e=0.8)-4	2.84	Upper	S-C1(e=0.606) S-C2(e=0.606)	1.17	Between Upper and Average	S-C2(e=0.4)-2 S-C2(e=0.6)-2 S-C2(e=0.8)-2	0.704	Lower
S-C2(e=0.4)-3 S-C2(e=0.6)-3 S-C2(e=0.8)-3	1.754	Upper	C-C1(e=0.673) C-C2(e=0.673) C-C4(e=0.673)	1.14	Between Upper and Average	Y-C1(e=0.48) Y-C2(e=0.48) Y-C3(e=0.48)	0.86	Below Lower
S-C2(0.4)-5 S-C2(0.8)-5	1.43	Between Upper and Average	O-C1(e=0.57) O-C2(e=0.57) O-C3(e=0.57)	1.1	Average			

함수는 포화투수계수( $k_s$ )값으로 정규화된 곡선이다. 상한, 평균, 하한의 투수함수에 포화투수계수( $k_s$ )를 곱하면 현장 지반의 투수함수식이 추정될 수 있다.

### 3.3 투수함수의 분류

그림 3의 결과를 보면 투수함수는 함수특성곡선에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서, 투수함수의 형태와 각 시료의 특징을 살펴보고 어떤 특성을 가진 시료가 투수함수의 상한, 평균 또는 하한을 따르는지 분석할 필요가 있다. 분석결과 각 시료별 투수함수에서의 위치는 곡률계수( $C_z$ )에 의해 주도적인 영향을 받는 것으로 나타났다(표 4). 투수함수는 함수특성곡선으로부터 추정되기 때문에 시료별 투수함수에서의 위치는 시료별 함수특성곡선에서의 위치로 귀결된다. 또한, 함수특성곡선은 간극비 및 입도분포와 밀접한 관련성을 보여준다(Arya와 Paris, 1981; Saxton 등, 1986; Fredlund 등, 1997; 김윤기, 2003; 이해지, 2004).

S-C2(e)-2, S-C2(e)-3, S-C2(e)-4, S-C2(e)-5는 S-C2의 다짐함수비(표 2)에서 성형된 시료이고 뒤에 붙은 기호('2', '3', '4', '5')는 각각의 입도분포 곡선의 분류 기호이며(표 3 및 그림 2) 괄호 안의 e는 간극비를 나타낸다. 마찬가지로 S-C2(e=0.4)-2, S-C2(e=0.6)-2, S-C2(e=0.8)-2는 '2'의 입도분포(그림 2)를 따르는 시료이며, 간극비가 각각 0.4, 0.6, 0.8임을 의미한다.

먼저, 같은 간극비를 갖는 시료에 대해 비교해 보면, S-C2(e=0.4)-2, S-C2(e=0.4)-3, S-C2(e=0.4)-4, S-C2(e=0.4)-5는 간극비는 같으나 입도분포는 다르다(표 3, 그림 2). 이들의 투수함수의 형태 및 위치(즉, 함수특성곡선의 형태 및 위치)는 많은 차이를 보이며 어떠한 상관성도 발견할 수 없다. S-C2(e=0.6)-2, S-C2(e=0.6)-3, S-C2(e=0.6)-4, S-C2(e=0.6)-5의 경우도 마찬가지로 투수함수의 형태

및 위치가 서로 상이하며, S-C2( $e=0.8$ )-2, S-C2( $e=0.8$ )-3, S-C2( $e=0.8$ )-4, S-C2( $e=0.8$ )-5의 결과도 위의 결과와 다르지 않다. 다음으로 같은 입도분포곡선과 다른 간극비를 갖는 시료(S-C2( $e$ )-2, S-C2( $e$ )-3, S-C2( $e$ )-4, S-C2( $e$ )-5)를 살펴보면, 표 4에 나타난 바와 같이 입도분포가 같은 것끼리 짝지어 놓았을 때 투수함수의 형태 및 위치 특성이 명확히 나타난다.

각 시료별 투수함수의 위치는 간극비( $e$ )와 포화체적 함수비( $e_s$ )에는 큰 영향이 없으며 입도분포곡선의 곡률계수와 연관됨을 알 수 있다. 표 4는 곡률계수가 증가할수록 함수특성곡선(혹은 투수함수)이 하한에서 상한으로 변하는 것을 보여준다.

통일분류법에서는 곡률계수가 1보다 큰 경우에 대해 입도가 양호하다고 규정하고 있으며 입도분포가 양호할수록 곡률계수도 커진다(최대 3)라고 규정하고 있다. Fredlund(1997)는 함수특성곡선의 맞춤변수  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 이 입도분포곡선과 관련이 있다고 하였으며, Agus 등(2001)은 특히 큰 크기의 입자와 함수특성곡선의  $a$  값이 큰 관계가 있다고 하였다. 입도분포가 양호하다는 것은 간극크기분포가 다양하다는 의미이며 이는 결과적으로 함수특성곡선에서 다양한 흡 입자의 분포로 포관흡수력 증가에 따라 함수비가 낮은 기울기로 감소하게 된다. 즉, 입도분포가 나쁠 경우 특정 간극크기만 분포되며, 따라서 함수특성곡선의 기울기가 급해진다(그림 1(b), 그림 4, 그림 5). 누적된 간극크기가 함수특성곡선과 관련이 있음을 고려하여 간극크기분포와 간극크기에 대해 앞서 구한 상한, 평균, 하한의 함수특성곡선을 도시하면 그림 4와 같이 나타난다(Fredlund 등, 1997; Agus 등, 2001; 김윤기, 2003). 그림 4를 통해 상한의 함수특성곡선이 하한의 함수특성곡선보다 작은 간극크기로

구성되어 있으며 간극 크기 분포가 좁은 영역에 밀집하여 분포하고 있는 점을 통해 상한의 함수특성곡선이 양호한 입도분포로 이루어져 있음을 알 수 있다. 뒤에서 살펴볼 각각의 함수특성곡선과 강우시 사면 안전율의 변화에서 상한의 함수특성곡선을 이용한 경우 안전율이 가장 크게 낮아지는데, 실제 사면에서도 곡률계수가 클수록 사면 붕괴가 많이 발생하였다(김경수, 2006; 김경수, 2007). 이는 곡률계수가 클수록 함수특성곡선의 상한에 해당하는 경우가 되기 때문에 침투가 쉽고 안전율의 변화가 커서 사면이 불안 내지 붕괴가 되기 쉬운 상태로 변화함을 의미한다.

곡률계수 외에도 유효경, 균등계수와와의 상관성도 분석해 보았으나 뚜렷한 경향을 확인할 수 없어 본 논문에서는 그 내용을 제외하였다.

#### 4. 강우강도와 포화투수계수 비에 따른 사면의 안전율

##### 4.1 강우조건 및 지반조건

우리나라의 월평균 강우량을 보면 대략적으로 7~8월 사이에 연 강수량의 대부분이 집중적으로 내린다. 월평균 강우량을 보면 300mm 내외, 일 최대 강수량은 평균 333mm, 시간 최대강수량은 평균 93mm 정도의 강우가 내리는 것으로 보고된다(기상청, 2006). 하지만 이러한 강우조건을 바탕으로 한 최대 강수량 개념을 실제 사면안전해석에 적용하기에는 어려움이 있다. 왜냐하면 우선 최대강수량의 경우 지속시간이 길지 않기 때문에 사면 내부에 침투되는 강우보다는 표면을 따라 유출되므로 이와 같은 해석은 무의미한 결과를 주기 때문이다.

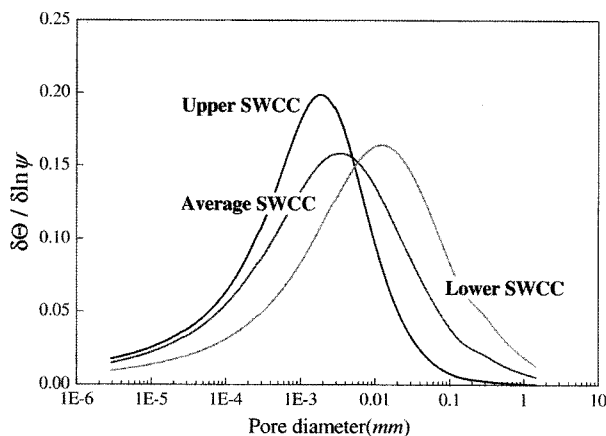


그림 4. 추정된 함수특성곡선의 간극 크기 분포 곡선

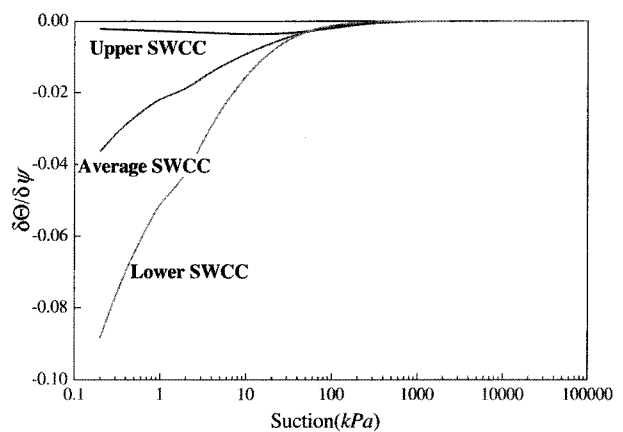


그림 5. 추정된 함수특성곡선의 포관흡수력에 대한 변화율

따라서 수치해석시 보다 적절한 실제 강우 특성을 적용하기 위해서는 확률론적 강우강도 개념을 활용하여 강우 강도와 강우 지속시간을 동시에 고려해 사면 침투해석을 수행하는 것이 타당하다. 즉, 강우가 지반 내로 침투하는 경우 강우강도뿐만 아니라 강우의 지속시간도 중요한 요소이고, 장마나 태풍 등에 의한 대부분의 집중 강우시 지속시간은 이를 이내인 점을 감안하였을 때 이를 적절히 고려하는 확률론적 강우강도를 사용하는 것이 수치해석시 강우를 적절히 모사한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 국내여건에 잘 부합하는 것으로 알려진 Japanese형 재현기간별 확률 강우강도 조건을 사용하였다(표 5, 그림 6). 또한, 장마나 태풍 등의 요소를 동시에 고려한 침투해석을 위하여 100년 빈도의 확률 강우에 대하여 48시간(강우강도 13.06mm/hr)의 재현기간을 적용하여 각각 침투해석을 수행하였다. 또한, 강우가 지속되는 시간뿐만 아니라 강우가 그친 후 침투된 강우의 지반 내 이동으로 인한 모관흡수력 변화와 사면 안정성을 알아보기 위해 강우 지속시간이 끝난 후 100일 경

과 시까지 추가적인 침투해석을 수행하였다. 초기 모관 흡수력은 이승래 등(2006), 이인모 등(2002)의 현장 계측 자료를 바탕으로, 강우 침투 효과를 높이기 위해 지하수위 위로 선형으로 증가하다가 20kPa로 일정하게 유지되는 조건을 적용하였다. 해석 대상 사면의 기울기는 그림 7과 같이 국내 사면 설계시 기준이 되는 흙깎기사면의 표준 기울기인 1:1.5를 적용하였고 높이 5m마다 소단 1m를 두었으며(진성기, 1998), 포화투수계수는 강우강도의  $n$ 배를 이용하였고 적용된 강우조건 및 지반 물성치는 표 6과 같다. 한편, 예제사면은 강우에 의해 습윤상태로 진행되는 과정이고 초기 모관흡수력이 20kPa 임을 감안하여 모관흡수력에 비례하는 전단강도 증가율을 나타내는 저항각( $\phi^b$ )은 기존연구에 근거하여 15°를 적용하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석 프로그램은 불포화 침투해석과 사면안정해석이 가능한 GEO-SLOPE International, Ltd의 SEEP/W와 SLOPE/W를 사용하였으며, SEEP/W를 이용하여 침투해석한 간극수압분포를 SLOPE/W와 연계하여 사면안정해석(Bishop 방법)을 수행하였다.

표 5. Japanese형 확률론적 강우강도  $t$ : 지속시간(분)

구분	10년 빈도	20년 빈도	50년 빈도	100년 빈도
Talbot형 (mm/hr)	467.17	540.17	634.457	705.387
	$t^{0.5} - 0.009$	$t^{0.5} + 0.128$	$t^{0.5} + 0.265$	$t^{0.5} + 0.352$

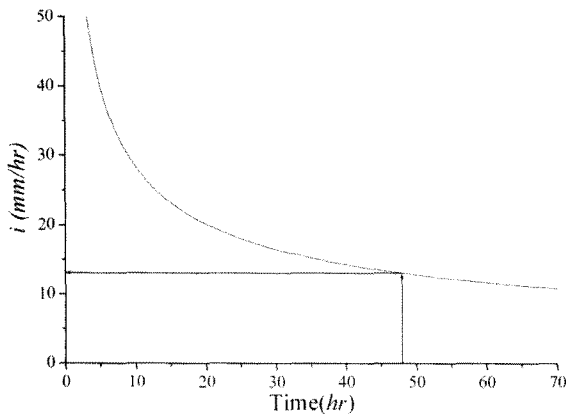


그림 6. Japanese형 100년 빈도 확률 강우강도

#### 4.2 포화투수계수-강우강도의 비( $k_s/i$ )에 따른 안전율 변화

김영상 등(2006)의 연구 결과는 포화체적함수비( $\theta_s$ )에 따른 안전율의 변화는 크지 않음을 보여주며 실험자

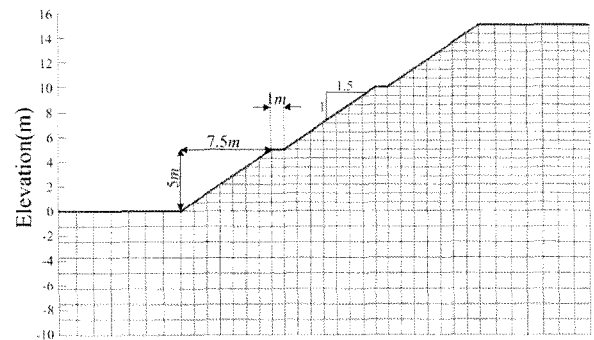


그림 7. 해석 대상 사면

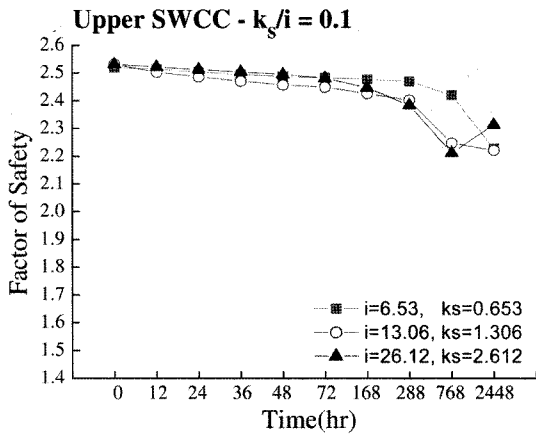
표 6. 강우조건 및 지반조건

구분	물성값	구분	물성값
강우강도( $i$ )	$\frac{705.357}{t_{min}^{0.5} + 0.352} = 13.06 \text{ mm/hr}$	$c'(kN/m^2)$	21
		$\phi(^{\circ})$	35
포화투수계수 ( $k_s$ )	$\frac{1}{1000}i, \frac{1}{100}i, \frac{1}{10}i, \frac{1}{2}i, i, 2i, 10i, 100i, 1000i, 10000i$	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20
		$\gamma_i(kN/m^3)$	18.5

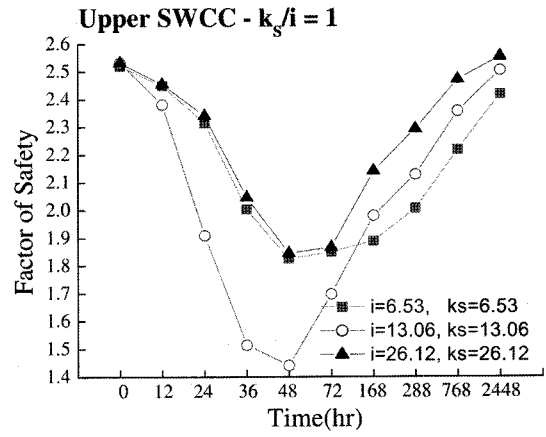
료를 정규화시켜 얻은 상한 및 하한 곡선에 각 시료의 포화체적함수비를 곱하여 침투해석과 안정해석을 수행하는 것이 합당하다고 하였다. 본 연구에서는 강우강도와 포화투수계수의 관계를 규명하기 위해 강우강도와 포화투수계수를 변화시켜가면서 포화투수계수와 강우강도의 비에 따른 안전율의 변화와 포화투수계수에 의

한 안전율의 변화를 살펴보았다.

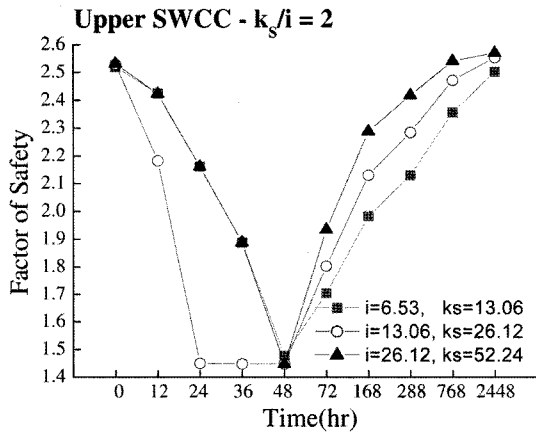
추정된 함수특성곡선과 투수함수를 이용하여 사면 안정해석을 수행한 결과 사면의 안정성은 강우강도와 포화투수계수 각각의 변화에는 큰 연관성이 없는 것으로 나타났으며, 포화투수계수와 강우강도의 비가 사면의 안정성에 영향을 주는 것으로 나타났다(그림 8, 9,



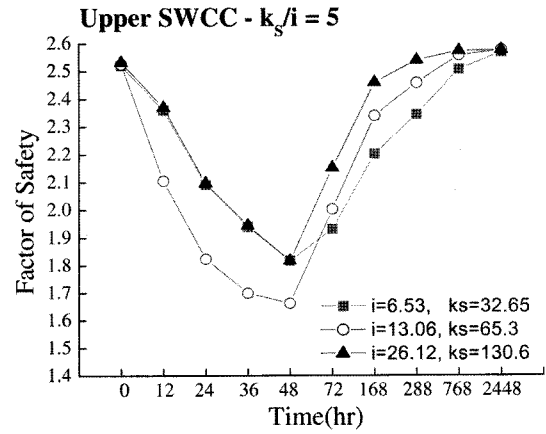
(a)  $k_s/i = 0.1$



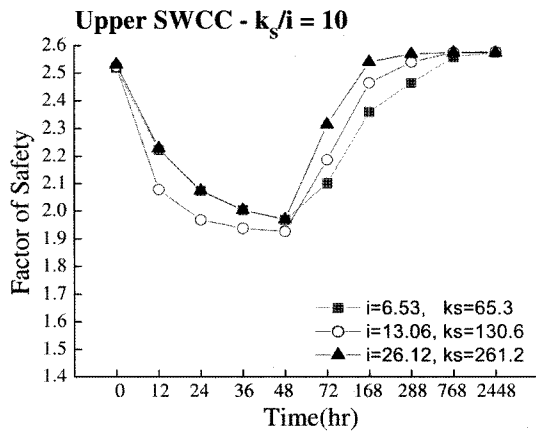
(b)  $k_s/i = 1$



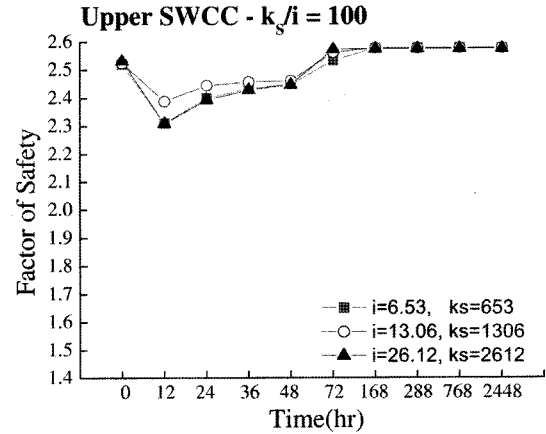
(c)  $k_s/i = 2$



(d)  $k_s/i = 5$



(e)  $k_s/i = 10$



(f)  $k_s/i = 100$

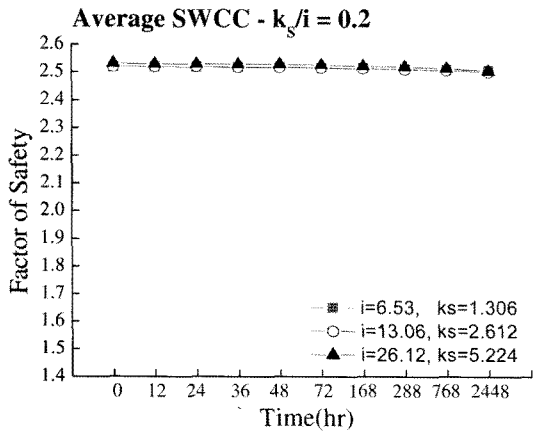
그림 8. 상한의 함수특성곡선을 이용한 경우  $k_s/i$ 에 따른 안전율 변화



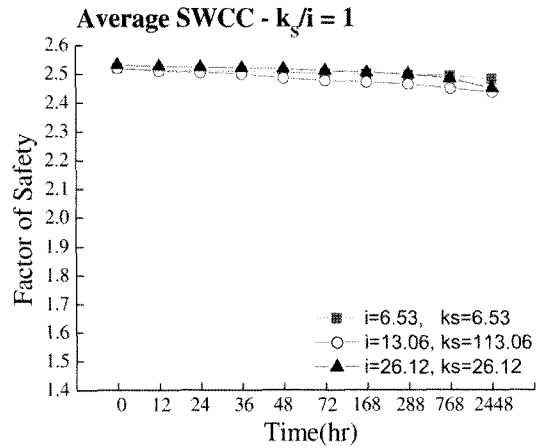
10). 일반적으로  $k_s$ 의 값이 일정 값 이상이 되면 안전율이 일정한 값으로 수렴한다는 연구결과가 있지만, 이는 불포화 상태를 고려하지 않은 경우이고 불포화 침투해석을 수행한 결과 큰 상관성을 찾아 볼 수 없었다.

포화투수계수가 매우 크거나 혹은 매우 작은 경우 안전율은  $k_s/i$ ,  $k_s$ 와는 무관하게 수렴하는 양상을 보인다.

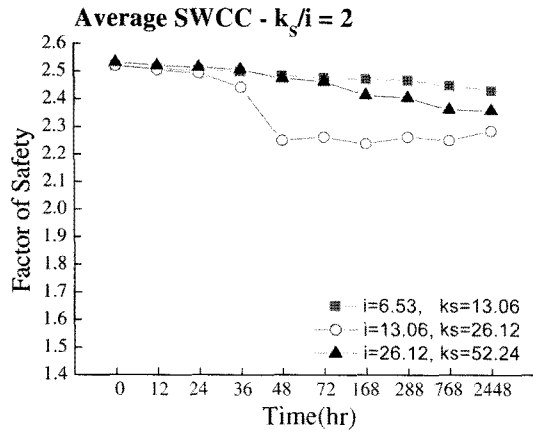
즉, 상한의 함수특성곡선의 경우에는  $k_s/i$ 가 100이상인 경우, 평균의 함수특성곡선을 이용할 경우에는  $k_s/i$ 가 1,000이상, 하한의 함수특성곡선을 이용할 경우  $k_s/i$ 가 10,000이상인 경우 안전율이 수렴하는 특징을 보인다. 이를 종합해 보면  $k_s/i$ 가 10,000이상이면 안전율이 수렴하게 된다고 볼 수 있는데, 이 값에 해당하는 투수계수는



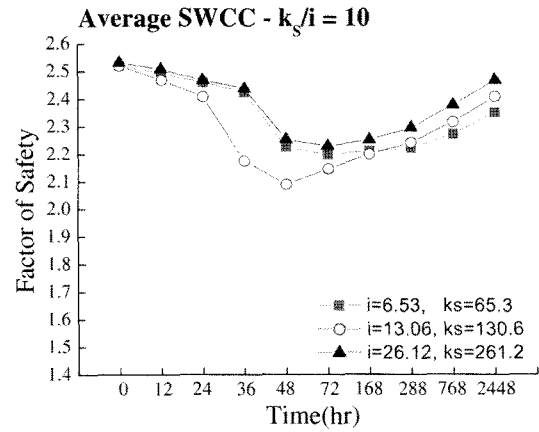
(a)  $k_s/i = 0.2$



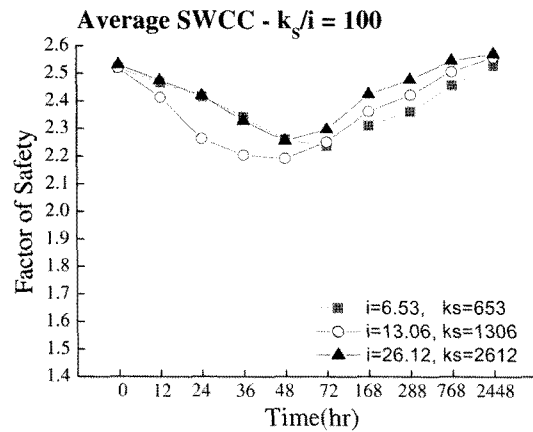
(b)  $k_s/i = 1$



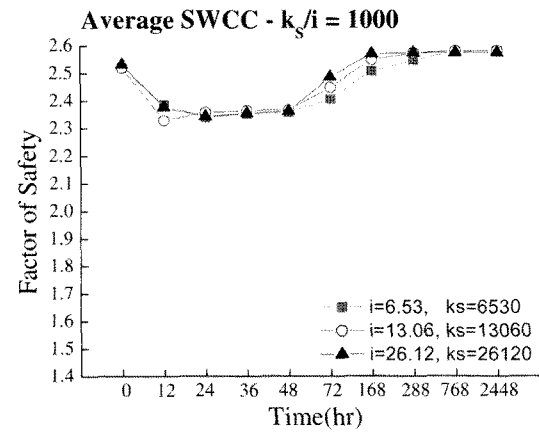
(c)  $k_s/i = 2$



(d)  $k_s/i = 10$

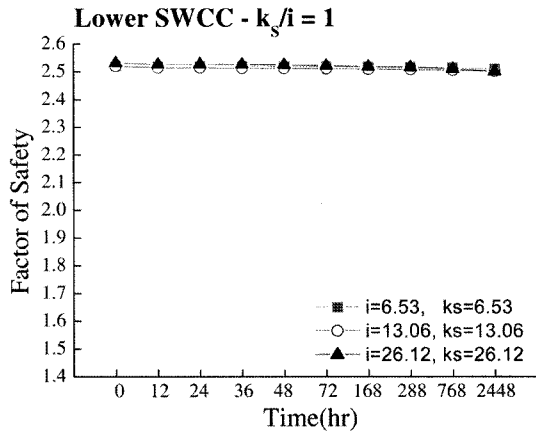


(e)  $k_s/i = 100$

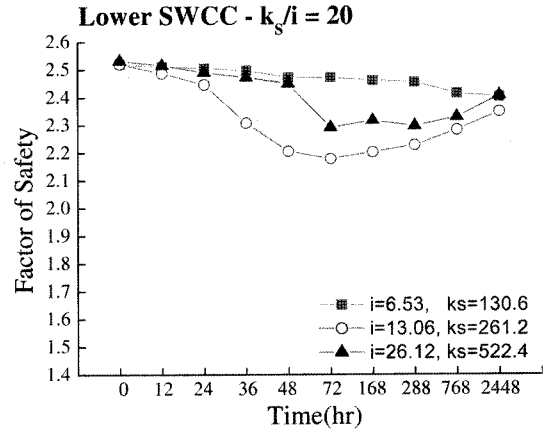


(f)  $k_s/i = 1000$

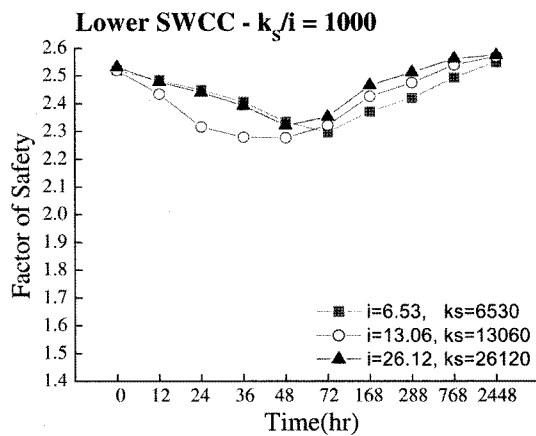
그림 9. 평균의 함수특성곡선을 이용한 경우  $k_s/i$ 에 따른 안전율 변화



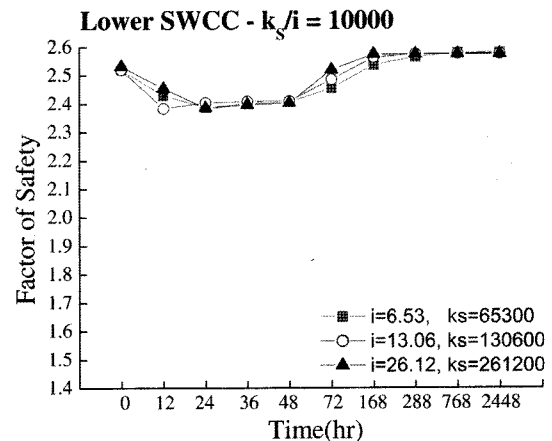
(a)  $k_s/i = 1$



(b)  $k_s/i = 20$



(c)  $k_s/i = 1000$



(d)  $k_s/i = 10000$

그림 10. 하한의 함수특성곡선을 이용한 경우  $k_s/i$ 에 따른 안전율 변화

13,060mm/hr(=3.63×10<sup>-1</sup>cm/s)에서 130,600mm/hr(=3.63cm/s)의 범위로 국내 화강풍화토의 일반적인 투수계수의 값을 크게 넘어선다. 이 정도의 투수계수 값은 모래질 지반에 해당하는 값이기 때문에, 포화투수계수가 어느 한계 값을 넘어서면 안전율이 수렴한다는 것은 큰 의미를 가지지 못하는 것으로 보인다. 그림 8, 9, 10의 결과를 보면  $k_s/i$ 가 작은 경우엔 안전율이 강우 종료 후에도 지속적으로 작아지는 경향을 볼 수 있고,  $k_s/i$ 가 큰 경우엔 안전율이 강우 초기부터 감소함을 알 수 있다. 하지만 그 변화의 폭이 상한의 함수특성곡선을 이용한 경우에 가장 두드러지고, 그 외의 경우엔 큰 변화가 없다. 평균의 함수특성곡선과 하한의 함수특성곡선을 이용한 경우 안전율의 변화가 상대적으로 크지 않기 때문에 강우침투에 민감하지 않은 특성을 보여주고 있다. 상한의 함수특성곡선(혹은 투수함수)을 이용한 경우 안전율이 가장 크게 낮아지는데, 실제 사면에서도 곡률계수가 클수록 사면 붕괴가 많이 발생하였다(김경수, 2006; 김경수, 2007). 이는 곡률계수가 클수록 함수특성곡선의 상한에 해당하는 경우가 되

표 7. 안전율이 확연히 감소하는  $k_s/i$  경계값

함수특성곡선	$k_s/i$
상한	1~2
평균	10 ~ 20
하한	20 이상

기 때문에 침투가 쉽고 안전율의 변화가 커서 사면이 불안 내지 붕괴가 되기 쉬운 상태로 변화함을 의미한다.

안전율의 변화가 나타나기 시작하는 구간을 보면 표 7과 같다. 즉, 표에 나타난  $k_s/i$  값 이상이 되는 사면의 경우엔 특별히 주의가 필요하며, 수치해석결과 가장 낮은 안전율을 보이는 때는 상한의 함수특성곡선을 이용한 경우로, 이때 포화 투수계수값이 강우강도와 같거나 두 배가 될 때이다.

### 4.3 함수특성곡선 경계값에 따른 투수함수의 변화

본 연구에서는 지하수위 위로 모관흡수력이 증가하

다가 20kPa로 일정하게 유지되는 조건을 사용하였다. 이 값은 현장 계측값을 토대로 결정된 값이며(이인모 등, 2002; 이승래 등, 2006) 초기 모관흡수력은 침투해석 시 중요한 요소중의 하나이다. 그림 11에 표시된 굵은 선이 20kPa에 해당하는 모관흡수력을 나타낸다.

강우시 초기 모관흡수력의 값은 사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(이인모 등, 2002; 이승래 등, 2006). 강우 초기에 침투는 투수곡선에서 초기 모관흡수력에 대응하는 투수계수에 의해 좌우되기 때문에 초기모관흡수력의 영향은 침투 문제에 있어서 투수계수의 값으로 귀결된다. 그림 11에서 모관흡수력 20kPa에 해당하는 상한( $k_{r,up}$ )과 평균( $k_{r,avg}$ )의 투수계수 값은 약 100배 차이가 나고, 상한( $k_{r,up}$ )과 하한( $k_{r,low}$ )은 약 1,000배 차이, 평균( $k_{r,avg}$ )과 하한( $k_{r,low}$ )은 약 10배 차이가 남을 알 수 있다. 상한( $k_{r,up}$ )과 하한( $k_{r,low}$ )의 투수곡선의 경우 모관흡수력이 20kPa일때 투수계수가 약 1,000배가 차이 나기 때문에 이때 침투된 강우량은 큰 차이를 보이며 이것이 안전율에 미치는 영향 또한 크게 나타난다.

표면에서의 침투가 전체 안전율에 어떠한 영향을 주

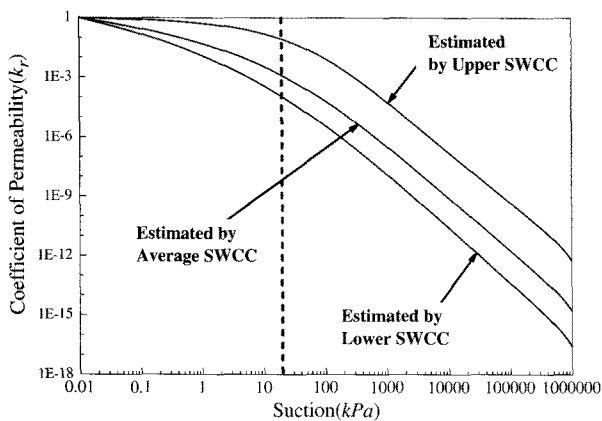


그림 11. 함수특성곡선의 경계값으로 추정된 투수합수

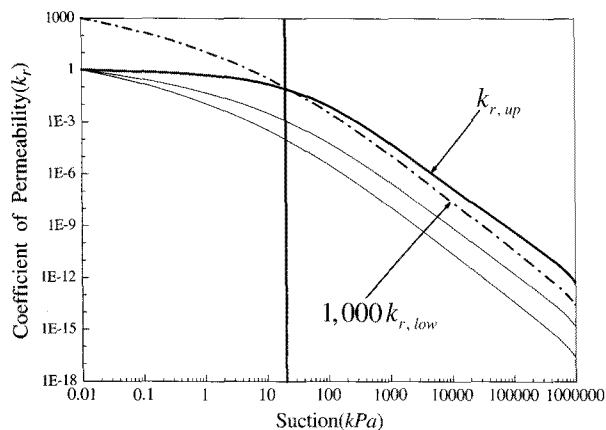


그림 12.  $k_{r,up} = 1,000k_{r,low}$  경우의 투수합수

는지 알아보기 위해 다음과 같은 침투해석을 실시해 보았다. 그림 12의 투수곡선에서 모관흡수력이 20kPa일 때  $k_{r,up}=100k_{r,avg}$ ,  $k_{r,up}=1,000k_{r,low}$ ,  $k_{r,avg}=10k_{r,low}$ 인 관계가 성립하며, 이 경우에 대해 안전율 변화를 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 모관흡수력이 20kPa보다 큰 경우에는  $k_{r,up}=1,000k_{r,low}$ 의 관계가 비교적 잘 성립되어 투수합수를  $1,000k_{r,low}$ 로 하고 안정해석 하였을 때와 투수합수를  $k_{r,up}$ 로 하고 안정해석하였을 때 안전율의 양상이 거의 일치하는 결과를 보인다. 하지만, 모관흡수력이 20kPa보다 작은 경우는 전혀 다른 침투양상을 보이게 된다. 강우가 지속되면 투수계수가 아무리 작다 하더라도 침투는 일어난다. 침투가 일어나면 모관흡수력이 점차적으로 감소하기 때문에 투수곡선은 20kPa부근에서 왼쪽(양의 간극수압 쪽)으로 이동하게 된다. 투수곡선이 왼쪽으로 이동하게 되면 이 때는  $k_{r,up}=1,000k_{r,low}$ 의 관계가 성립하지 않으며 침투 양상 또한 전혀 다른 특성을 보이며 4.2절에서 언급한 바와 같이 안전율의 변화가 전혀 다른 양상을 보인다. 초기 모관흡수력은 20kPa로 동일하지만, 하한의 투수합수는 침투가 일어나 투수곡선이 왼쪽으로 이동할 때 투수계수가 급하게 커지기 때문에 이러한 차이를 나타낸다.

## 5. 결론

본 연구에서는 함수특성곡선의 추정방법을 기술하였고 이와 같이 추정된 함수특성곡선을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 함수특성곡선은 간극크기분포를 고려한 입도분포곡선과 관계가 있으며 특히 곡률계수( $C_z$ )와 큰 상관관계를 가진다.
- (2) 입도분포곡선으로부터 구한 곡률계수의 값이 1보다 큰 경우엔 함수특성곡선이 상한값에 근접하고, 1보다 작은 경우 평균과 하한에 근접한다.
- (3) 함수특성곡선을 실험으로부터 구하지 못할 경우 간극비( $e$ )로부터 포화체적함수비( $\theta_s$ )를 계산하고, 입도분포곡선으로부터 추정된 상한, 평균, 하한의 함수특성곡선에 포화체적함수비를 곱하여 해당 지반의 함수특성곡선을 구하면 이로부터 투수합수를 추정할 수 있다. 이때, 포화투수계수는 해당 지반의 값을 사용한다.
- (4) 사면의 안전율은 포화투수계수와 강우강도의 비( $k_s/i$ )

에 따라 변화하는 양상을 보인다. 즉,  $k_s/i$ 의 값이 작은 경우에 사면은 강우 종료 후 불안정한 상태가 되며, 이와 반대로  $k_s/i$  값이 큰 경우에 사면은 강우초기부터 강우종료시점까지 불안정한 상태가 된다.

- (5) 강우시 가장 위험한 상태는 함수특성곡선이 상한에 가까운 경우이고, 이때 포화투수계수( $k_s$ )가 강우강도( $i$ )와 같거나 두 배가 될 때이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 Smart Infra-Structure Technology Center(SISTeC)과 한국건설교통기술평가원(KICTTEP)의 04건설핵심기술개발사업(A01-08)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 기상청, www.kma.go.kr
2. 김경수 (2006), "산사태지역 토층사면의 지질조건별 토질특성", *지질공학*, Vol.16, No.4, pp.359-371,
3. 김경수 (2007), "산사태지역 자연사면의 지질별 토질특성 및 상관관계 분석", *지질공학*, Vol.17, No.2, pp.205-215,
4. 김영상, 이승래, 서동남, 김윤기 (2006), "인공신경망을 이용한 불포화지반 사면 안정성에 영향을 미치는 입력변수들의 상대중요도 결정", *대한토목학회 정기학술대회*, Vol.C, p.74,
5. 김윤기 (2003), *투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구*, 공학석사 학위논문, KAIST.
6. 김재홍, 박성완, 정상섭, 유지형 (2002), "강우시 습윤에 의한 불포화도 풍화토의 사면 안정 해석 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제18권 2호, pp.123-136.
7. 이성진 (2004), *화강풍화토의 불포화 전단강도 및 함수특성곡선 산정에 관한 연구*, 공학박사 학위논문, KAIST.
8. 이승래, 김윤기, 최정찬, 오태규 (2006), "강우침투에 따른 도로성토사면의 불포화 특성 변화 예측", *대한토목학회 학술발표회*, Vol.C, p.80.
9. 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규 (2002), "풍화화강도 사면에서 강우로 인한 모관흡수력 변화에 대한 실험 연구", *한국지반공학회 분 학술발표회*, pp.509-516.
10. 이혜지 (2004), *흙의 구조적 특성을 이용한 화강풍화토의 함수특성곡선 유추에 관한 연구*, 공학석사 학위논문, KAIST.
11. 조성은 (2001), *침투를 고려한 불포화 토사사면의 안정해석에 관한 연구*, 공학박사 학위논문, KAIST.
12. 조성은, 이승래 (2000), "강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석", *한국지반공학회 논문집*, 제16권 1호, pp.51-64.
13. 진성기 (1998), *사면안정화 설계실무편람*, 도서출판 과학기술
14. 최경립 (2007), *화강풍화토에 대한 함수특성곡선으로부터 불포화투수계수 유추에 관한 연구*, 석사학위논문, KAIST.
15. Agues, S.S, Leong, E.C., Rahardjo, H. (2001), "Soil-water characteristic curves of Singapore residual soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, pp.285-309.
16. Arya, L.M. and Paris, J.F. (1981), "A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.45, pp.1023-1030.
17. Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964), "Hydraulic properties of porous media", *Colorado State University Hydrology Paper*, Mar. No.3, pp.1-27.
18. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1995), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley and Sons, Inc.
19. Fredlund, D.G. and Xing, A. and Huang, S. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 533-546.
20. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geo-technical Journal*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
21. Fredlund, M.D., Wilson, G.W. and Fredlund, D.G. (1997), "Prediction of the soil water characteristic curve from the grain size distribution curve and volume-mass properties", *Proceedings of the 3rd Symposium on Unsaturated Soil*, Rio de Janeiro, Brazil, April 20-22, pp.13-23.
22. Gardner, W.R. (1958), "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", *Soil Science*, Vol.85, pp.228-232.
23. Mualem, Y. (1986), "Hydraulic conductivity of unsaturated soils : predictions and formulas", In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*, Agron. Monogr., Am. Soc. of Agron., Madison, Wis., Vol.9, pp.799-823.
24. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. and Papendick, R.I. (1986), "Estimating generalized soil-water characteristics from texture", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.50, No.4, pp.1031-1036.
25. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392.

(접수일자 2008. 10. 23, 심사완료일 2009. 1. 25)