

강우재현 모형실험과 SWCC Cell 실험에 의한 화강암질 풍화토의 함수특성곡선

기완서¹ · 김선학^{2*}

¹조선이공대학 토목건설과, ²조선대학교 토목공학과

Soil Water Characteristic Curve of the Weathered Granite Soil through Simulated Rainfall System and SWCC Cell Test

Wan-Seo Ki¹ and Sun-Hak Kim^{2*}

¹Department of Civil construction Engineering, Chosun College of Science&Technology

²Department of Civil Engineering, Chosun University

강우재현장치를 제작하고, 강우 및 사면조건에 따라 강우재현 모형실험과 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)을 실시하여 불포화 특성에 관해 연구하였다. 그 결과를 이용하여 강우에 따른 침투거동 특성과 함수특성곡선 모델들의 불포화된 화강암질 풍화토에 대한 적용을 검토하였다. 강우재현 모형실험의 습윤과정(강우재현)과 건조과정(방치)에서 계측된 체적함수비와 모관흡인력을 비교한 결과 체적함수비는 2~5%, 모관흡인력은 3~10 kPa 정도 값의 차이를 보여 이력현상을 확인 할 수 있었다. 또한, 모관흡인력의 값이 체적함수비의 값에 비해 상대적으로 큰 차이를 보여 모관흡인력에 이력거동이 더 큼을 확인할 수 있었다. 강우재현 모형실험과 함수특성곡선실험에서 얻은 결과로부터 구한 함수특성곡선을 비교하면, 습윤과정과 건조과정에서 두 방법 모두 근접한 함수특성곡선을 얻을 수 있었으나, 두 방법 모두 습윤과정과 건조과정에서의 결과는 차이가 있었다. 이로써 불포화토의 특성을 고려한 보다 합리적인 설계나 안정검토에 함수특성곡선을 적용시킬 때에는 습윤과정에서는 습윤과정 함수특성곡선을 건조과정에서는 건조과정 함수특성곡선을 적용하는 것이 합당할 것으로 여겨진다.

주요어 : 강우재현장치, 함수특성곡선, 화강암질 풍화토, 모관흡인력, 이력거동, 불포화토

A simulated rainfall system was built, and the unsaturated characteristics were examined by execution of simulated rainfall system test and soil water characteristic curve cell test(SWCC Cell Test) under the various rainfall and slope conditions. With the results, the applicability of infiltration behavior under rainfall and soil water characteristic curve models to the unsaturated weathered granite soil was examined. At the results of comparison the volumetric water content and matric suction measured in the wetting process(under rainfall) with those in the drying process(leaving as it was) of the simulated rainfall system, the volumetric water content showed a difference of 2~5% and matric suction of about 3~10 kPa, indicating the occurrence of hysteresis. In addition, the difference was relatively larger in matric suction than in the volumetric water content, and this tells that the hysteresis behavior is larger in matric suction. When the soil water characteristic curve derived from measurements in simulated rainfall system test were compared with those from the soil water characteristic curve cell test, both methods produced soil water characteristic curves close each other in the wetting process and the drying process, but in both, there was a difference between results obtained from in the wetting process and those from in the drying process. Thus, when soil water characteristic curves are rationally applied to the design and stability analysis considering of the properties of unsaturated soil, it is considered desirable to apply the soil water characteristic curve of the wetting process to the wetting process, and that of the drying process to the drying process.

Key words : simulated rainfall system, soil water characteristic curve, weathered granite soil, matric suction, hysteresis behavior, unsaturated soil

*Corresponding author: sun93k@naver.com

서 론

화강암질 풍화토는 표토의 대부분을 차지하고 있으며, 강우초기에는 불포화상태로 존재하다가 강우강도와 강우 지속시간이 충분할 경우 포화상태로 된다. 지금까지 포화 상태에 대한 연구는 활발하였으나 불포화상태의 이론적·해석적 어려움 등 여러 가지 이유로 불포화토에 대한 연구는 미흡하였다. 불포화토는 포화토와 비교할 때 역학적 개념이나 거동특성에서 많은 차이점이 있다. 그러나 지금까지는 사면의 설계나 공학적 판단이 필요한 경우에 이론적·해석적 문제 등 여러 가지 이유로 대상지반을 완전포화 또는 건조한 상태로 해석하였다. 이와 같은 방법으로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동을 제대로 해석할 수 없고, 지나치게 안정적으로 설계하게 되어 경제성이 떨어질 우려가 있다. 불포화토에서 침투거동의 영향 요인으로는 강우강도, 강우지속시간, 선행강우, 포화투수계수, 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC), 토사의 저류능력, 지반응력, 토사의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등 여러 가지가 있는데, 이 중에서 강우는 지표 근처 흙의 함수량 변화에 큰 영향을 주어 간극수압의 변화를 유발하고 또한, 체적과 강도를 변화시킨다(홍원표 외, 1990; 조성은과 이승래, 2000; 심태섭 외, 2004; 이광모 외, 2005; Tsaparas *et al.*, 2002; Tami *et al.*, 2004). 그러므로 강우에 따른 불포화 지반에서 보다 합리적인 실제 지반거동을 파악하기 위해서는 강우시 불포화토의 특성에 대한 기본적인 이해와 부의 간극수압을 고려한 함수특성 및 투수특성에 관한 연구가 매우 필요하다. 본 연구에서는 강우로 인한 사면붕괴가 발생된 현장에서 화강암질 풍화토를 채취하여 먼저 물리·역학적 실험을 실시하였다. 다음으로 불포화토의 거동을 규명하는데 있어 가장 큰 요인인 부의 간극수압 즉, 모관흡인력(matric suction)에 관련된 불포화토의 특성들을 파악하고자 강우재현 모형실험과 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)을 실시하였다. 강우재현 모형실험은 강우재현장치와 모형사면 토조를 제작하고 사면허부를 투수조건으로 조성하여, 선행연구 자료를 토대로 결정된 사면경사(1:1.5, 1:2.0), 강우강도(15 mm/hr, 30 mm/hr), 강우지속시간(8 hr, 16 hr)의 조건에 따라 불포화 특성(체적 함수비, 모관흡인력 등)과 이력거동(습윤과정, 건조과정)에 중점을 두고 모형실험을 실시하였다. 각 실험조건에서 사면내의 상·중·하부와 상·중·하단에 매설된 계측기를 통해 체적함수비 변화에 따른 간극수압의 변화와 습윤전선의 깊이 등을 측정하였다. 함수특성곡선실험은

SWCC Cell 장치를 이용하여 습윤과정, 건조과정에서 가압범위에 따라 체적함수비 값을 얻었다. 화강암질 풍화토를 대상으로 함수특성곡선실험과 강우재현 모형실험에서 습윤과정과 건조과정에서 얻어진 체적함수비와 모관흡인력을 각각 Soil-vision 프로그램에 입력하여 함수특성곡선 모델에 따라 최적의 함수특성곡선을 산정하고, 이들을 비교·분석하여 효율적인 적용을 검토하였다. 또한, 함수특성곡선실험과 강우재현 모형실험의 결과로 얻어진 불포화 특성값을 비교·분석하여 그 적용 특성을 검토하였다.

함수특성곡선의 모델

불포화토의 함수특성곡선을 구하기 위해서는 오랜 시간과 많은 비용이 소요되기 때문에 간단한 시험을 통해 구할 수 있는 매개체를 이용하여 함수비에 따라 변화하는 함수특성곡선을 예측하는 방법 및 모델에 대한 연구가 심도 있게 이루어져 왔다. 많은 연구자들이 함수특성곡선 함수를 제시하였는데, 대부분 실내실험을 통해 얻은 모관흡인력과 함수비 자료로부터 회귀분석과정을 통해 얻은 계수들을 이용하여 함수를 표현하였다. 그 후, 계속적인 실험으로 근래에는 일반적인 함수특성곡선의 형태는 S자 모양을 이루고 있다고 알려져 있다. 초창기에 제안되었던 식들 중 Gardner(1958), Brooks and Corey(1964), Farrel and Larson(1972), Williams *et al.*(1984), McKee and Bumb(1983)들이 제안한 식들은 S자 형태의 곡선을 이루지 않지만, 근래에 발표된 McKee and Bumb(1987), van Genuchten(1980), Fredlund and Xing(1994) 등이 제안한 식들은 S자 형태의 함수특성곡선 방정식을 보여주고 있다. 더욱이 흙의 입도분포곡선을 고려하여 함수특성곡선 방정식의 이론적인 기초를 세웠다. 다양한 흙에 대한 함수특성곡선의 유형을 방정식으로 표현하는데 있어서, van Genuchten(1980)과 Fredlund and Xing(1994)의 제안식이 널리 이용되며 방정식의 검증용으로 이용되고 있다. 근래에 와서 Fredlund and Xing(1994)을 비롯한 여러 연구자들에 의해 상단부위의 공기함입치의 굴곡과 하단부위의 잔류함수비를 결정하는 부분을 보완할 수 있도록 보정계수를 사용하였으며 모관흡인력 전범위에 적용 가능한 함수특성곡선을 표현할 수 있는 이론식이 제안되었다. Brooks and Corey(1964)은 최초로 (1)식과 같은 함수특성곡선 모델을 제안하였는데, 이는 간극크기 분포지수를 지수로 하는 함수특성곡선식이다. 간극크기 분포지수(λ)는 함수특성곡선의 기울기로 정의되는데, 다양한 크기의 간극을 가지

는 흙에서는 간극크기 분포지수가 작고 간극크기가 일정한 경우에는 간극크기 분포지수가 커지게 된다.

$$\theta = 1 \text{ for } \Psi \leq \Psi_{\text{aev}} \text{ 혹은 } \theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda \text{ for } \Psi > \Psi \quad (1)$$

여기서, θ 는 임의의 모관흡인력에서의 정규체적함수비, Ψ 와 Ψ_{aev} 은 각각 흡인력과 공기함입치(AEV)를 나타내며 λ 는 간극크기분포지수를 나타낸다. van Genuchten (1980)은 세 가지 변수를 사용하여 정규화된 체적함수비와 흡인력사이에 다음과 같은 관계가 있음을 제안하였는데, 위에서 언급한 제안식들에 비하여 적용성이 상당히 뛰어난 것으로 나타났다(Leong and Rahardjo, 1997).

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

여기서, Ψ 은 흡인력을 나타내며 α 는 공기함입치와 관련된 계수를 나타낸다. 또한, n 과 m 는 각각 함수특성곡선의 변곡점과 높은 모관흡인력 범위에서의 곡선기울기에 관련된 계수를 나타낸다. 3개의 계수가 필요한 (2)식은 좀 더 유연한 경향을 보여준다. 제안된 계수 n , m 은 서로 연관된 상태로 제안되었지만 이는 함수의 유연성을 감소시키는 작용을 한다. 함수의 유연성을 증가시키기 위해서는 계수를 연관시키지 않는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 제한된 범위의 자료만이 이용 가능한 경우(습윤과정)에 독립적인 n , m 을 사용하면 계수를 추정하는 과정에서 수렴에 문제가 발생할 수 있으므로, 불완전한 결과 값들을 이용해서 계수들 사이에 제한 조건을 부여하면 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있다. $\lambda = mn$ 으로 일정하게 하면, Brooks and Corey의 제안식과 동일하고 $n=1$ 인 형태에 대해서도 많은 학자들에 의해 제안식이 제시되었다. 기존 연구자들이 제시한 여러 함수특성곡선 모델은 특정 흙에서 특정 흡인력 범위에서만 유효하므로 이러한 단점을 개선하기 위하여 Fredlund and Xing은 van Genuchten의 식을 변형하여 모관흡인력의 최대 제한 값(10^6kPa)을 고려하여 전체 모관흡인력 범위를 적용할 수 있는 함수특성곡선을 (3)식과 같이 제안하였다.

$$\theta = \theta_0 \left[\frac{1}{\ln[e + (\Psi/a)^b]} \right]^m \quad (3)$$

여기서, a , n , m 은 함수 특성곡선의 형태를 결정하는 계수를 나타낸다. 계수 a 는 공기함입치와 관계를 갖는 계수로서 변곡점에서의 흡인력에 해당하는 계수이며, 계수 n 은 곡선 직선부의 기울기에, 그리고 m 은 높은 흡인력 단계에서 그래프 형상에 관계를 갖는 계수이다.

강우재현 모형실험과 함수특성곡선실험

실험계획

지난 30년간의 우리나라의 산사태 기록을 분석한 결과, 대규모(동일 지역에서 20개소 이상 발생하는 규모) 붕괴의 경우 최대 시간강우강도가 35 mm/hr를 초과하고, 2일간의 누적강우량이 140를 초과할 경우 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 24시간 내에 200 mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루이상 지속되면서 시간당 평균 강우량이 10 mm/hr 이상일 경우에 산사태가 발생할 위험이 큰 것으로 나타났다(홍원표 외, 1990). 선행된 여러 연구들로부터 실험 시 고려할 영향인자는 강우강도, 강우지속시간, 선행강우, 포화투수계수, 함수특성곡선, 토사의 저류능력, 지반응력, 토사의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등이 알려졌다. 열거한 영향인자에 따라 강우 시 사면의 간극수압 분포가 변화되거나 사면 설계단계에서 이러한 영향인자를 모두 고려하는 것은 많은 시간의 소요와 경제적인 측면에서 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 강우시 사면의 간극수압에 영향을 주는 대표적 인자로 강우조건(강우강도, 강우지속시간, 선행강우)과 지반의 함수특성조건(포화투수계수, 함수특성, 저류능력) 그리고 기타조건(지반응력, 토사의 이질성, 사면경사)을 큰 부류로 선정하였다. 선정된 영향인자들을 각각의 조건에 따라 변화시키며 침투류 해석을 수행하여 불포화 풍화토사면의 간극수압 분포에 보다 큰 영향을 미치는 강우강도, 사면경사, 강우지속시간을 강우재현 모형실험 영향인자로 선정하였다. 다음으로 지반상태에 따라 모형사면을 제작한 후 선정된 영향인자들의 조건을 달리하여 강우재현 모형실험을 실시하고, 모형사면 내에 설치된 계측기(TDR, Tensiometer)를 통해 체적함수비와 간극수압의 변화관계를 측정하여 불포화토의 함수특성곡선을 얻었다. 선행 연구자들이 제시한 실험에 영향을 미치는 영향인자들을 감안하여 설계단계에서 고려가 가능한 강우조건, 지반의 함수특성 및 함수조건, 사면의 기하학적 조건을 영향인자의 큰 부류로 선정하였다. 선정된 영향인자들의 조건에 따른 강우재현 실험계획을 수립하였고 그 내용을 정리하면 Table 1과 같다. 강우재현에 앞서 24시간 이상 노건조건 시료에 물을 적당량 섞어 함수비를 9~11% 정도에 맞추고, 모형사면 토조에 넣어 사각다짐대(12 × 20 cm)를 활용하여 기준단위중량에 맞게 다짐을 실시하였다. 다짐이 완료된 모형사면을 24시간이상 그대로 실온에서 방치하여 정상상태에 도달되도록 구현하였다.

Table 1. A simulated rainfall system test according to a proviso of an influence factors.

Influence factor	Model Test			
	MT-1	MT-2	MT-3	MT-4
Rainfall intensity(mm/hr)	15	30	15	30
Rainfall continuance/Maintenance time(hr)	16/24	16/24	16/24	8/32
Slope incline	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 2.0

Table 2. Physical and mechanics properties of weathered granite soil.

	Specific gravity(Gs)	2.61
Compaction test	Optimum moisture content(%)	11.40
	Maximum dry density(γ_{dmax} , KN/m ³)	18.82
	Uniformity coefficient(C_u)	13.33
Particle size analysis	Coefficient of curvature(C_g)	2.13
	10% pass particle size(D_{10} , mm)	0.075
	30% pass particle size(D_{30} , mm)	0.40
	60% pass particle size(D_{60} , mm)	1.00
	0.075mm pass ($P_{\#200}$, %)	10.00
	Coefficient of permeability(K, m/sec)	8.50×10^{-6}
Triaxial compression test	Cohesion(C, KN/m ²)	20.58
	Cohesion of saturation(C_{sat} , KN/m ²)	1.96
	Internal friction angle(ϕ , °)	22.5
	Internal friction angle of saturation(ϕ_{sat} , °)	8.0
	Unified soil classification system(U.S.C.S)	SW

다양한 간극수압 변화의 요인 중 설계단계에서 고려가 가능하고 비교적 큰 영향을 미치는 영향인자인 강우강도와 강우지속시간, 사면경사의 조건을 달리하여 강우재현 모형실험을 실시하였다. 또한, 강우지속과 방치시간은 실 강우자료와 수치해석을 통한 영향범위를 검토하여 강우지속 및 방치 40시간을 강우재현 모형실험에 적용하였다. 특히, 실험에 적용된 강우강도는 불포화토의 거동특성을 검토할 수 있도록 대상 화강암질 풍화토의 포화투수계수를 고려하여 결정하였다. 대상 화강암질 풍화토의 포화투수계수 8.50×10^{-4} cm/sec를 환산하면 31 mm/hr로 이보다 작은 값인 15 mm/hr와 30 mm/hr에 오차범위 ± 1 mm/hr고려한 값을 채택하여 불포화토의 함수특성 및 거동특성을 검토하는데 적용하였다.

대상 화강암질 풍화토의 특성

대상 화강암질 풍화토는 2004년 강우침투로 인한 사면의 붕괴가 발생한 토사로 전라남도 담양에서 채취하였다. 대상 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성 파악을 위해 비중시험, 입도분석, 다짐시험, 삼축압축시험 등을 실시하였으며 또한, 포화투수계수를 구하기 위해 실

내투수시험도 실시하였다. 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

강우재현 실험장치 및 실험방법

강우재현 모형실험은 Fig. 1과 같은 실험장치를 제작하여 실시하였다. 실험장치는 크게 모형사면을 축조할 수 있는 사면모형 토조와 강우강도에 따라 인공강우를 재현할 수 있는 강우재현장치, 그리고 토사상태와 사면경사를 재현할 수 있는 강사장치 및 경사조절장치, 간극수압과 함수량을 측정할 수 있는 계측기로 구성되어 있다. 모형사면(폭 × 깊이 × 길이 = 30 × 30 × 100 cm)은 화강암질 풍화토의 단일토층으로 사면하부로 배수가 가능하게 구성하였다. 유량계에서 강우강도를 고정하면 공기압에 의해 해당 유량만큼 물이 저수조를 통해 강우재현장치로 이동, 인공강우를 재현하게 된다. 모형사면의 길이방향(상부, 중부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 tensiometer를 통해 강우에 의해 발생하는 간극수압이 측정되고, 모형사면의 길이방향(상부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 함수량계(TDR)를 통해 체적함수비가 측

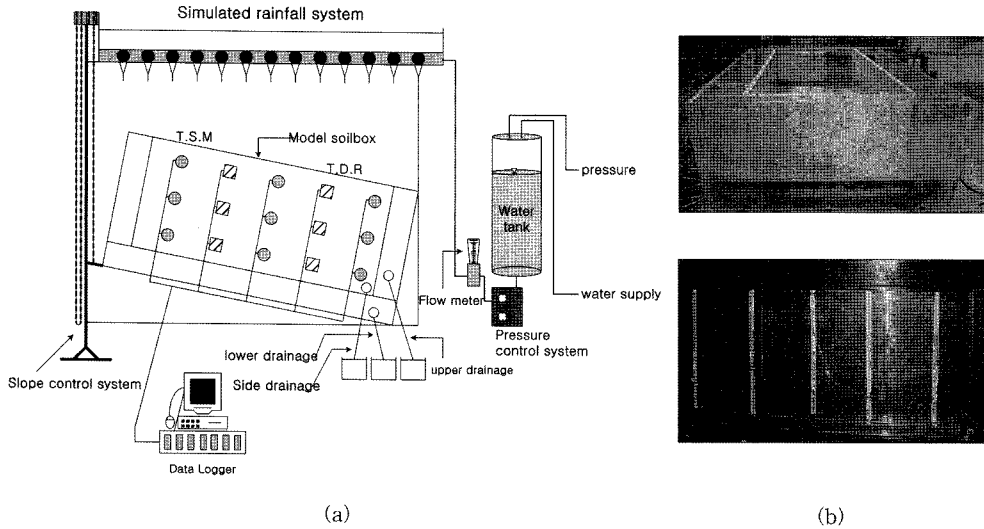


Fig. 1. Equipment of simulated rainfall system test: (a) a detailed drawing of simulated rainfall system, and (b) model soilbox and model of slope.

정된다. 압력변환기는 각각의 tensiometer와 함수량계 (TDR)에 연결되어 측정값이 연속하여 계측이 가능하도록 데이터로거(data logger)에 연결, 컴퓨터로 실시간 계측이 가능하도록 구성하였다. 또한, 모형토조에서 유출량을 측정하기 위해 전면, 측면, 하면에 유출량 탱크를 설치하여 수동으로 측정하였다. Fig. 2는 본 연구를 위해 제작된 사면모형 토조의 상세도를 나타낸 것이다.

강우재현장치는 크게 강우조절장치와 저수조, 강우 편과 수관밸브로 구성되어 있다. 수관은 폭 80 cm, 길이 130 cm에 총 15개의 강재로 제작되어 있으며 각 수관에 내경 20 μm인 강우 편을 일정간격으로 10개씩 총 150개(폭 : 10EA × 길이 : 15EA)를 설치하였다. 강우조절장

치는 다양한 강우강도를 재현할 수 있도록 제작되었으며, 저수조로부터 유량계를 통과한 강우는 수관을 거쳐 강우 편으로 분사되어 사면에 재현하게 된다. 또한, 사면경사에 따라 재현할 강우범위를 모형사면의 크기에 맞추기 위해 각 수관마다 밸브를 설치하여 강우가 재현되는 지점에만 강우를 공급할 수 있도록 하였다. 이와 더불어 강우재현장치에 상하조절장치를 설치하여 사면경사에 따라 높이를 조절할 수 있도록 제작하였다. 강우량을 보내는 저수조(지름 × 높이 = 30 × 100 cm)는 두께 1 cm의 투명한 아크릴 재질의 원통으로 제작하였으며, 저수조의 상부에는 급수를 위한 밸브, 하부에는 강우를 재현하기 위한 밸브를 설치하였다. 밸브의 개폐를 통해

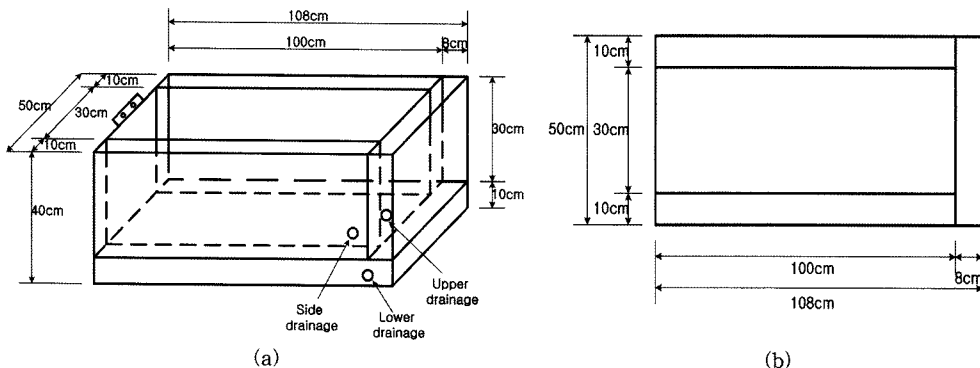


Fig. 2. A detailed drawing of model soilbox: (a) a detailed drawing, and (b) a plane drawing.

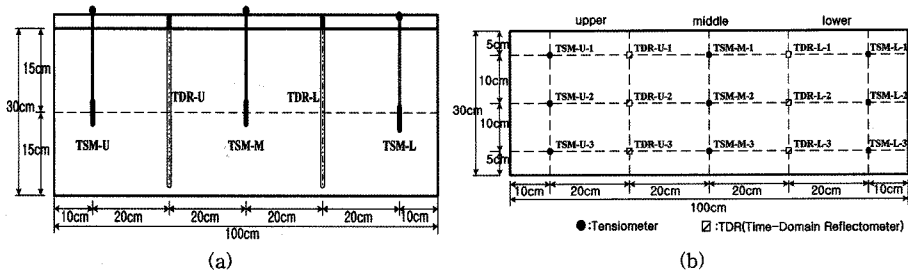


Fig. 3. An installation situation of tensiometer and TDR: (a), a plane drawing, and (b), a sectional detailed drawing.

수조 내의 수위를 조절할 수 있으며, 강우재현 시 고르게 강우를 재현하기 위해 공기압을 통해 강우강도를 조절할 수 있도록 제작하였다. 저수조에서 공급된 물을 강우재현장치에 보내기 전에 강우재현장치가 일정한 강우강도를 재현할 수 있도록 유량계를 설치하였다. 유량계는 일정한 유량을 강우재현장치에 보내게 되고 강우재현장치는 그 유량을 그대로 사면에 공급하게 되어 있다. 재현된 강우의 검증을 위해 토조의 저면을 이중으로 제작하여 강우를 받아 검측할 수 있도록 하였으며, 검측결과 오차는 $\pm 0.85 \text{ mm/hr}$ 범위 내에 나타나는 것으로 확인하였다. 토사유출을 방지하기 위해 토조 저면에 부직포를 설치하고, 화강암질 풍화토는 시험 전 미리 건조로에서 24시간 이상 건조시켰다. 건조된 시료에 함수비를 9~11% 정도로 제조한 후 강사장치를 통해 3층으로 나누어 사면모형 토조에 평행하게 단계별로 포설하였다. 또한, 다짐도를 조절하기 위해 대상 시료의 무게를 잰 후, 사각다짐대(12×20 cm)로 다짐을 실시하여 모형사면을 재현하였다. 모형사면을 길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 구분하고, TDR과 tensiometer, 토압계를 흙과의 밀착성을 좋게 하기 위하여 포설 중에 설치하였다. TDR은 모형사면의 길이방향(상부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 구분하여 6개를 설치하였고, tensiometer는 길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 9개를 설치하였다. TDR과 tensiometer의 상세 설치위치는 Fig. 3에 제시하였으며, 계측기 종류와 모형사면의 설치위치에 따라 구분하여 나타내었다.

계측시스템 설치가 완료된 후, 실험계획에 따라 모형사면의 경사에 이르도록 경사조절장치를 이용하여 사면경사를 조절한다. 그 후 바로 인공강우를 재현하지 않고, 오랜 시간(24시간 이상) 동안 방치하여 계측치의 변화가 거의 없는 정상상태(steady-state)를 구현하였다. 유량계를 조절하여 본 연구에 계획된 소정의 강우강도로 계획된 지속시

간 동안 강우를 재현하였다. 강우재현 중에 사면이 불포화 상태에서 점차적으로 습윤상태에 이르도록 하여 체적함수비와 모관흡인력의 계측을 실시하였다. 계획된 강우지속 시간 동안 강우재현으로 습윤상태에 있는 화강암질 풍화토 사면을 계획된 방치시간 동안 유지시키면서 체적함수비와 모관흡인력의 계측을 실시하였다(Fig. 4).

함수특성곡선 실험 및 실험방법

불포화토의 간극에는 공기와 물이 존재하며, 간극에 물의 양이 많아질수록 흡인력은 줄어들고 간극속의 물이 빠져나갈수록 흡인력은 커지게 된다. 이러한 원리로 흙 입자와 물, 공기간의 에너지 평형이 이루어지게 되는데, 이와 같은 에너지 평형 원리를 활용하여 함수특성곡선을 산정하는 대표적인 방법이 SWCC Cell 장치 실험이다. 본 논문에서 사용한 SWCC Cell 장치는 Fredlund & Xing(1994)의 이론을 이용하여 Fredlund가 직접 고안한 토질의 함수특성곡선을 얻는 장비이다. 직경 75 mm의 물드에 다진 시료를 미리 포화시킨 다음, 공기압을 주어 공기압이 간극수를 밀어내는 원리로 함수비와 흡인력을 조절하는 것이다. 흙의 모관흡인력으로 인하여 유입구로부터 물이 흡수될 때 물의 유입량을 측정함으로써 체적함수비를 알 수 있고, 유입된 물의 양만큼 유출을 시키는데 필요한 가압 로드(rod)에 가해지는 힘이 이때의 흡인력이 된다. Fig. 5는 SWCC Cell 장치를 나타낸 것으로 압력을 제어하기 위한 패널부(pannel part)와 시료를 구속하는 셀부(cell part)로 크게 나뉘고 각각의 명칭이 나타나 있다. 본 장치는 흡인력에 따라 변화하는 함수량을 측정하기 위해 동일한 직경과 높이의 부피 측정관(volume tube)이 양쪽에 하나씩 설치되어 있는데, 이는 셀에서 빠져나온 물과 공기압의 에너지 평형을 육안으로 확인하기 위해서다. 가압 후 두개의 부피 측정관의 수위가 더 이상 변화가 없을 때 평형조건을 판단하여 값을 측정하여야 한다. 기존의 압력판(pressure

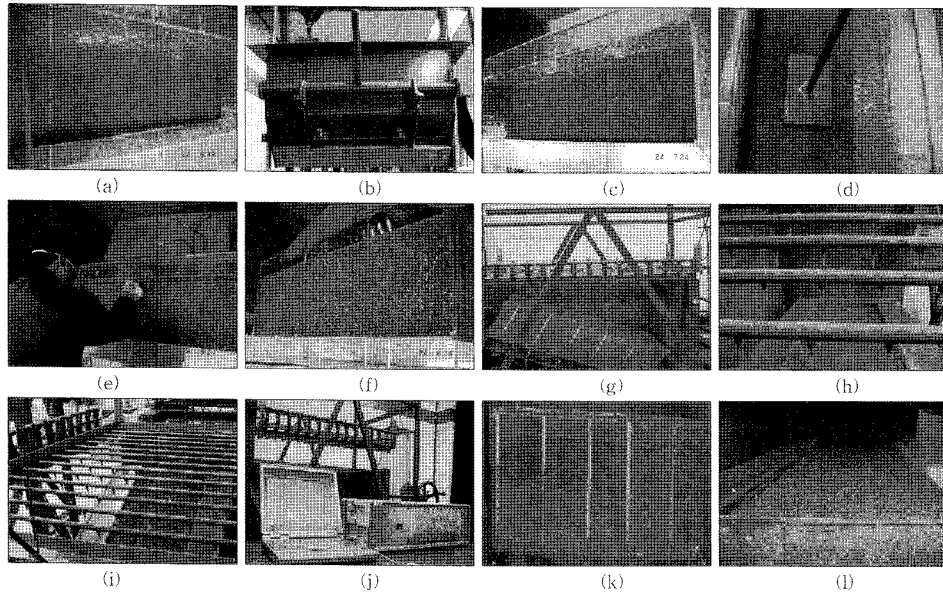


Fig. 4. A procedure of simulated rainfall system test: (a) nonwoven fabric installation, (b) filling soil, (c) the first covering soil, (d) compaction, (e) measure installation, (f) simulated slope, (g) Slope incline, (h) preparation of simulated rainfall system, (i) simulated rainfall, (j) a measurement, (k) process wetting front, and (l) end of simulated rainfall.

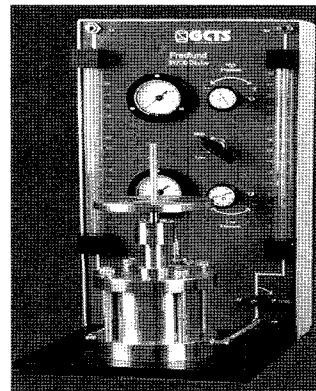
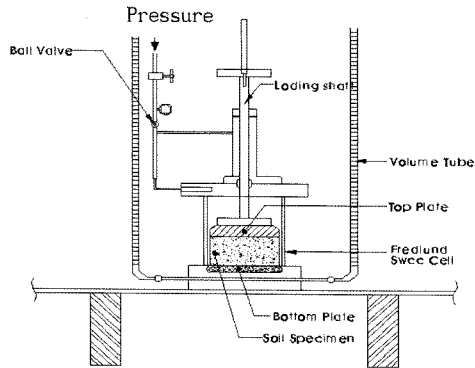


Fig. 5. Equipment of SWCC cell test.

plate)장치는 시료 당 하나의 point만을 산정함으로써 함수특성곡선을 구하기가 매우 번거롭고 비효율적이었다. 그러나 본 논문에 사용한 장치는 하나의 시료로 여러 단계의 흡인력을 산정할 수 있고, 넓은 압력제어 범위로 다양한 종류의 시료에 대한 실험이 가능하다는 장점이 있다(Soil Vision Systems Ltd, 2004).

불포화토의 함수특성곡선을 구하기 위한 SWCC Cell 실험방법을 정리하면 다음과 같다. 함수특성곡선 중 건조과정을 재현한 SWCC Cell 실험은 가압을 단계별로 증가시키면서 상승하는 부피 측정관의 수위를 읽는 것

이고, 습윤과정을 재현한 SWCC Cell 실험은 반대로 압력을 빼면서 하강하는 부피 측정관의 수위를 읽는 것이다. 시료의 부피를 측정하기 위해 몰드(cutting ring)와 세라믹스톤의 무게를 측정하고, 다짐시험을 통해 얻은 소정의 다짐도로 몰드 안에 시료를 다져 넣는다. 몰드를 세라믹 스톤의 정중앙에 위치시킨 후 24시간 동안 물속에 넣어 시료를 포화시킨다. 포화가 완료되면, 몰드와 세라믹 스톤의 무게를 측정한다. 부피 측정관에 연결된 두 개의 tube 끝을 각각 바닥판(bottom plate)에 연결시키고, 수밀성 향상을 위해 바닥판에 물을 약간 넣고 각각

의 부피 측정관(volume tube)의 끝 부분에 있는 밸브를 개방한다. 바닥판의 흡에 맞춰 세라믹 스톤과 몰드를 눌러 밀착시키면, 바닥판에 넣었던 물이 누르는 압력에 의해 체적 측정관을 따라 올라가고, 양쪽 체적 측정관의 수위가 서로 수평이 되도록 맞춘다. Cell wall, disk ring retainer, top plate를 차례로 조립한다. 압력계이지(gauge)를 조절하여, air pressure tube를 통해 압력을 가한다. 이 때 압력에 의해 상승하는 부피 측정관의 수위를 읽는데, 일반적으로 가압하여 24시간이 경과된 후, 양쪽 부피 측정관의 수위변화가 없는 정상상태가 될 때 읽어야 한다.

실험결과 및 분석

불포화된 화강암질 풍화토의 이력현상

강우재현 모형실험을 통해 습윤과정과 건조과정에서 체

적함수비와 간극수압의 분포를 알 수 있다(Fig. 6, 7). 우선, 모형사면의 상·하부에 상·중·하단으로 구분하여 설치된 TDR로부터 측정된 체적함수비는 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있었으며, Fig. 6은 모형실험에 따른 사면의 모든 단면에서 체적함수비의 분포를 나타낸 것이다.

MT-3의 건조과정시 분포형태가 조금 차이가 있을 뿐 상·하부의 모든 단면에서 유사한 분포를 나타낸다. 이는 강우침투방향이 횡 방향으로 변화되어도 사면의 하단이 투수층임으로 강우의 축적이 일어나지 않고 원활히 배수되었음을 알 수 있다. 또한, 깊이에 따른 체적함수비의 분포가 습윤과정과 건조과정에서 2~5% 정도의 차이를 보이지만 거의 유사하게 분포하였다. 이는 불포화된 화강암질 풍화토에서 체적함수비의 이력현상이 크지 않음을 보여준다. 다음으로 모형사면의 상·중·하부에 상·중·하단으로 구분하여 설치된 tensiometer로부터 측정된 간극수압 분포는 안정적인 결과를 얻을 수

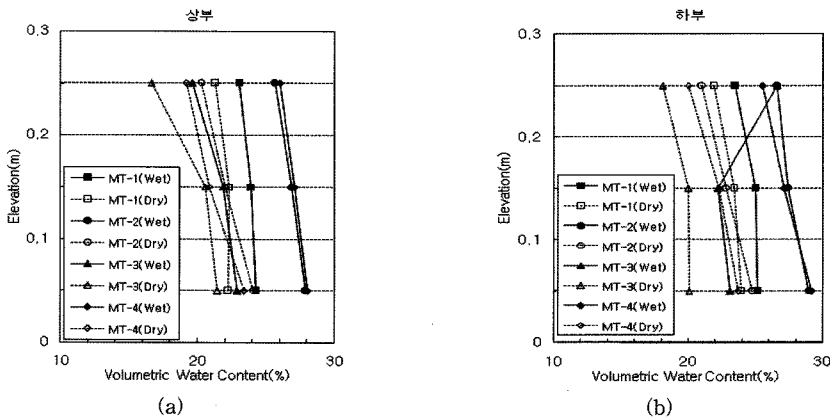


Fig. 6. Hysteresis behavior of simulated rainfall system test (volumetric water content): (a) upper of slope, and (b) lower of slope.

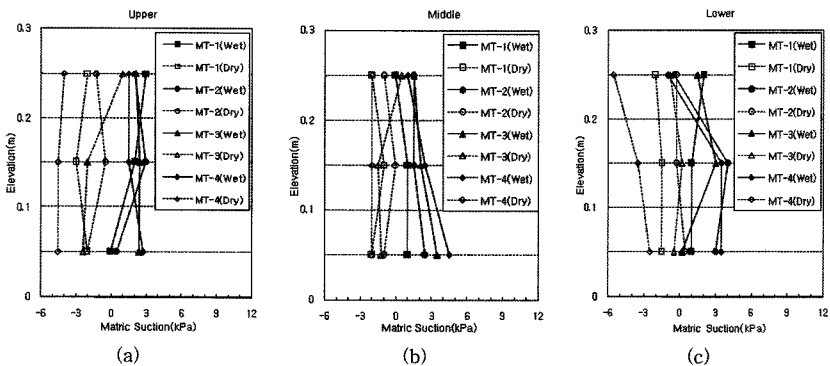


Fig. 7. Hysteresis behavior of simulated rainfall system test (matric suction): (a) upper of slope, (b) middle of slope, and (c) lower of slope.

있었으며 Fig. 7은 모형실험에 따른 사면의 모든 단면에서 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. 모형사면에 동일한 크기의 강우강도가 작용하더라도 건조과정과 습윤과정에서 간극수압의 분포는 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 불포화된 화강암질 풍화토의 습윤과정에서 발생하는 모관흡인력은 건조과정에서 발생하는 모관흡인력보다 3~10 kPa 정도 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 이력현상은 습윤과정과 건조과정에서 산정한 함수특성곡선에서도 확인할 수 있다. 즉, 동일한 강우강도에 의해 발생하는 같은 체적함수비에 대해 습윤과정의 함수특성곡선에서 구한 모관흡인력이 건조과정에서 구한 모관흡인력보다 작은 것으로 나타난다. 이러한 실험결과를 불포화된 화강암질 풍화토 내의 물의 흐름에 이력현상이 나타남을 보여주는 것이다. 이는 습윤과정에서 모관흡인력의 변화는 습윤과정에서 산정한 함수특성곡선을 따르고 건조과정에서의 모관흡인력의 변화는 건조과정의 함수특성곡선을 따르는 것으로 나타났다. 결론적으로 불포화된 화강암질 풍화토의 모관흡인력에 대한 침투거동 해석시 습윤과정에서는 습윤과정 함수특성곡선에서 얻은 모관흡인력을 적용하고 건조과정에서는 건조과정 함수특성곡선에서 얻은 모관흡인력을 적용하는 것이 보다 실제적이고 합당하리라 여겨진다.

SWCC Cell Test에 의한 함수특성곡선

건조과정 실험의 경우 가압범위 1~100 kPa에서 17~30.5%의 체적함수비를 측정 할 수 있었으며, 습윤과정 실험의 경우 압력하강범위 20~1 kPa에서 2~27%의 체적함수비를 얻을 수 있었다(Fig. 8).

습윤과정과 건조과정의 함수특성곡선 실험결과를 Soil-

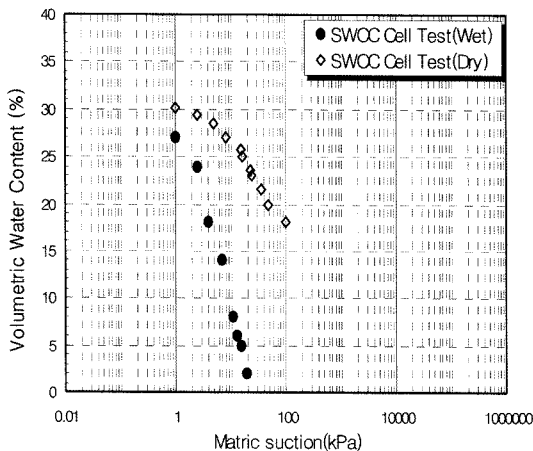
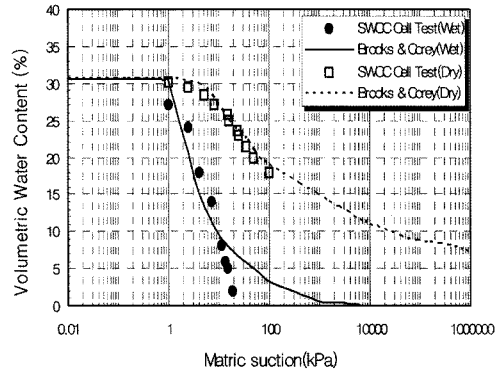


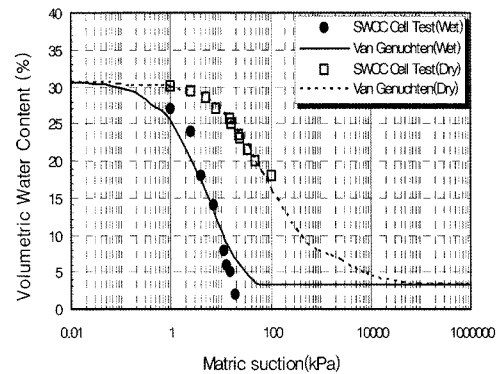
Fig. 8. Results of SWCC cell test.

Vision 프로그램에 적용하여 Brooks and Corey, Van Genuchten, Fredlund and Xing의 3가지 모델식에 따른 함수특성곡선을 산출하였다(Fig. 9).

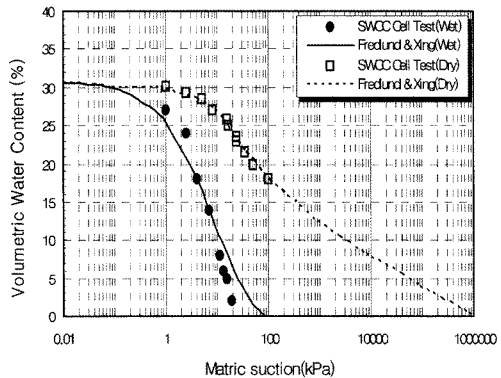
Brooks and Corey, Van Genuchten, Fredlund and



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Soil water characteristic curve through results of swcc cell test: (a) brooks and corey model, (b) van genuchten model, and (c) fredlund and xing model.

Table 3. Coefficient of soil water characteristic curve.

	Brooks and Corey	Van Genuchten	Fredlund and Xing
wetting process	0.93	a	0.03
	0.52	n	1.02
	-	m	7.20
drying process	4.02	a	0.002
	0.13	n	0.84
	-	m	1.78

Xing의 3가지 모델식에 따른 함수특성곡선을 형상화하여 산출한 계수와 불포화토의 특성을 Table 3과 Table 4에 습윤과정과 건조과정으로 구분하여 나타내었다. 함수특성곡선 실험값을 이용하여 모델별 불포화 특성값을 산정한 결과 모델식에 따라 큰 차이는 없으나 비교적 단순한 모델인 Brooks and Corey 식으로 건조과정에서 얻어진 잔류함수비와 모관흡인력이 Van Genuchten 모델과 Fredlund and Xing 모델에 비교하여 큰 차이를 나타내었다. 이는 Fredlund and Xing 모델과 Van

Genuchten 모델의 정도가 Brooks and Corey 모델에 비해 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다. Table 4와 같이 습윤과정 함수특성곡선의 습윤 전면흡인력은 약 1 kPa이하에서 나타나고 잔류범위는 Brooks and Corey 모델의 경우 33.64 kPa, Van Genuchten 모델의 경우 40.53 kPa, Fredlund and Xing 모델의 경우 49.55 kPa로 나타났다. 건조과정 함수특성곡선의 공기 함입값(AEV)은 Van Genuchten 식을 제외하고는 5 kPa이하에서 나타나고 잔류영역의 범위는 500 kPa이상의 높은 모관흡인력으로 나타났다. 함수특성곡선상의 습윤과정과 건조과정의 경로가 서로 다르게 나타나는 것으로 보아 실제지반에 강우로 인한 침투가 발생할 때 불안정의 가장 주요인인 불포화 투수계수도 서로 다른 변화양상을 보이게 될 것으로 생각된다.

강우재현 모형실험에 의한 함수특성곡선

Fig. 10은 수행된 습윤과정과 건조과정의 실내모형실험(MT-1, MT-2, MT-3, MT-4)에서 얻어진 계측치와 Soil-Vision 프로그램을 활용하여 Fredlund and Xing의

Table 4. Air entry value (AEV) and wetting front suction (WFS) according to soil water characteristic curve.

		Brooks and Corey	Van Genuchten	Fredlund and Xing	
wetting process	wetting front suction (WFS)	θ (%)	30.20	30.10	30.20
		Ψ (kPa)	0.95	0.58	0.65
	Residual water content	θ_r (%)	3.15	2.87	0.75
		Ψ_r (kPa)	33.64	40.53	49.55
drying process	Air entry value (AEV)	θ (%)	30.2	30.00	30.00
		Ψ (kPa)	3.86	9.37	4.24
	Residual water content	θ_r (%)	1.32	3.24	3.58
		Ψ_r (kPa)	25000	985.76	648.75
	Maximum Slope incline		0.24	0.39	0.27

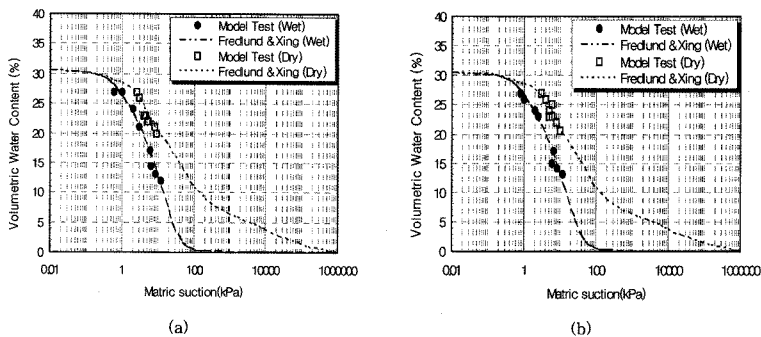


Fig. 10. Soil water characteristic curve by simulated rainfall system test: (a) upper of model slope (TDR-U-2, TSM-U-2), and (b) lower of model slope (TDR-L-2, TSM-L-2).

Table 5. Coefficient of fredlund and xing by simulated rainfall system test and swcc cell test.

		SWCC Cell Test	simulated rainfall system test		
			Upper	Lower	Average
wetting process	a	20.28	8.15	8.50	8.33
	n	1.45	1.68	1.72	1.70
	m	5.10	2.55	2.52	2.54
drying proces	a	7.75	6.97	6.34	6.66
	n	0.84	0.80	1.05	0.93
	m	0.35	1.32	1.80	1.56

모델식에 적용한 함수특성곡선을 나타낸 것이다. 모형사면 상·하부에서 얻어진 값은 흡윤과정과 건조과정에서 이력거동을 보였으며, 상·하부의 흡윤과정 또는 건조과정에서 각각 얻어진 결과는 거의 유사하게 나타났다.

Table 5와 Fig. 11은 함수특성곡선실험에서 얻은 측정값과 모형실험에서 얻은 계측치를 Fredlund and Xing의 모델식 적용하여 얻은 함수특성곡선을 비교하여 나타낸 것이다.

실내모형실험으로 얻어진 함수특성곡선은 함수특성곡선실험에서 얻어진 흡윤 및 건조과정의 함수특성곡선 사이에 나타나는 것을 알 수 있고, 흡윤과정에서 얻은 함수특성곡선은 흡윤과정 함수특성곡선에 근접하게 분포하고 건조과정에서 얻은 함수특성곡선은 건조과정 함수특성곡선에 근접하게 분포하였다. 특히, 흡윤과정의 함수특성곡선이 거의 일치하는 것을 볼 수 있고 건조과정의 함수특성곡선은 상이하게 나타남을 알 수 있다. 건조과정의 함수특성곡선은 함수특성곡선실험으로부터 구한 것이 실내모형실험으로부터 구한 것보다 동일한 체적함수비에 서 더 큰 모관흡인력을 갖는 것으로 나타났다. Table 6

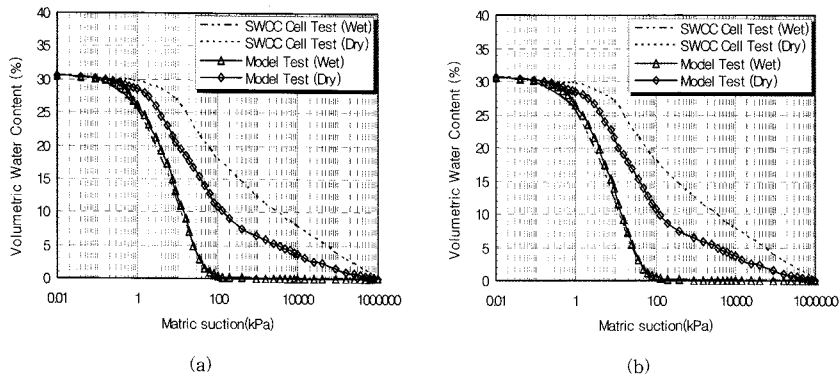


Fig. 11. Soil water characteristic curve of results by simulated rainfall system test and SWCC cell test: (a) upper of model slope (TDR-U-2, TSM-U-2), and (b) lower of model slope (TDR-L-2, TSM-L-2).

Table 6. A comparison of properties of unsaturated soil(Fredlund and Xing model).

		SWCC Cell Test	simulated rainfall system test			
			Upper	Lower	Average	
wetting process	wetting front suction (WFS)	θ (%)	30.20	30.10	30.10	30.10
		Ψ (kPa)	0.65	1.24	1.30	1.27
	Residual water content	θ_r (%)	0.74	0.95	1.02	0.99
		Ψ_r (kPa)	49.55	55.45	56.28	55.87
drying proces	Air entry value (AEV)	θ (%)	30.00	30.2	30.1	30.15
		Ψ (kPa)	4.24	2.35	2.55	2.45
	Residual water content	θ_r (%)	3.58	2.55	3.20	2.88
		Ψ_r (kPa)	648.75	545.63	560.86	553.25
	Maximum Slope incline		0.27	0.35	0.38	0.37

은 함수특성곡선실험에서 얻은 측정값과 실내모형실험에서 얻은 계측치로 얻어진 함수특성곡선으로부터 대상 화강암질 풍화토의 불포화 특성값을 나타낸 것이다.

먼저 습윤과정에서 습윤전면흡인력은 함수특성곡선실험과 실내모형실험으로부터 얻어진 값이 각각 0.65 kPa와 1.27 kPa로 유사하게 나타났으며 건조과정의 공기함입치는 각각 4.24 kPa와 2.45 kPa로 나타나 함수특성곡선실험에 의한 값이 더 크게 나타나 동일한 체적함수비에서 더 큰 모관흡인력을 갖는 것으로 나타났다. 전반적으로 불포화 특성값은 습윤과정과 건조과정에서 유사하게 나타났으며 특히, 습윤과정에서 보다 더 일치하는 것으로 나타났다.

결 론

강우재현장치를 제작하고, 강우 및 사면조건에 따라 모형실험과 함수특성곡선실험을 실시하여 화강암질 풍화토의 불포화특성에 대해 연구하였다. 그 결과를 이용하여 강우에 따른 침투거동 특성과 함수특성곡선 모델들의 불포화된 화강암질 풍화토 사면에 대한 적용성을 검토하였다.

1) 강우재현 모형실험의 습윤과정(강우재현)과 건조과정(방치)에서 계측된 체적함수비와 모관흡인력을 비교한 결과 체적함수비는 2~5%, 모관흡인력은 3~10 kPa 정도 값의 차이를 보여 이력현상을 확인 할 수 있었다. 또한, 모관흡인력의 값이 체적함수비의 값에 비해 상대적으로 큰 차이를 보여 모관흡인력에 대한 이력거동의 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다.

2) 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)과 실내모형실험결과로 얻어진 불포화 특성값을 비교한 결과, 습윤과정에서 얻어진 습윤전면흡인력은 각각 0.65 kPa와 1.27 kPa로 유사하게 나타났으며 건조과정의 공기함입치는 각각 4.24 kPa와 2.45 kPa로 나타나 함수특성곡선실험에 의한 값이 더 크게 나타나 동일한 체적함수비에서 더 큰 모관흡인력을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 각각의 실험결과로 얻어진 불포화 특성값은 습윤과정과 건조과정에서 전반적으로 유사하게 나타났으며 특히, 습윤과정에서 보다 더 일치하는 것으로 나타났다.

3) 강우재현 모형실험의 습윤과정과 건조과정에서 계측한 결과로부터 구한 함수특성곡선과 함수특성곡선실험의 습윤과정과 건조과정에서 얻은 결과로부터 구한 함수특성곡선을 비교하면, 습윤과정과 건조과정에서 두 방법 모두 근접한 함수특성곡선을 얻을 수 있었으나, 두 방법 모두 습윤과정과 건조과정에서의 결과는 차이가 있

었다. 이로써 불포화토의 특성을 고려한 보다 합리적인 설계나 안정검토에 함수 및 투수특성곡선을 적용시킬 때는 습윤과정에서는 습윤과정 함수특성곡선, 건조과정에서는 건조과정 함수특성곡선을 적용하는 것이 합당할 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- 심태섭, 김선학, 기완서, 주승완, 2004, 강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구, 대한지질공학회지, 14(4), 349-360.
- 이광모, 심태섭, 김선학, 최용준, 2005, 강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화의 특성, 대한토목학회, 2005년도 정기 학술대회 논문집, 4442-4445.
- 조성은, 이승래, 2000, 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학학회지, 16(1), 51-64.
- 조성은, 이승래, 2000, 강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가, 한국지반공학학회지, 16(5), 107-116.
- 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 6(2) 55-63.
- Brooks, R. H., Corey, A. T., 1964, Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrol. Papers, Colorado State University, Fort Collis, Colorado.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley and Sons, Inc.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Huang, S., 1994, Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, 31, 533-546.
- Gardner, W. R., D. Hillel, Y. Benyamini, 1970, Postirrigation movement of soil water, 1. Redistribution, Water Resour. Res., 6, 851-861.
- Green, W. H., Ampt, G. A., 1911, Studies on Soil Physics : 1. Flow of Air and Water through Soils, Journal of Agricultural Science, 4, 1-24.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., 1997, Review of Soil-water Characteristic Curve Equations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, December, ASCE, 123(12)
- Soil-Vision User's Manual, 2004, Soil Vision Systems Ltd.
- Tami, D., Rahardjo, H., Leong, B. C., Fredlund, D. G., 2004, Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier, Canadian Geotechnical Journal, 41, 814-830.
- Tsagaras, I., Rahardjo, H., Toll, D. G., Leong, E. C., 2002, Controlling parameters for rainfall-induced landslides, Computers and Geotechnics, 29, 1-27.

기완서

조선이공대학 토목건설과
501-744 광주광역시 동구 서석동 290
Tel: 062-230-8662
Fax: 062-230-8677
E-mail: wski@mail.chosun-c.ac.kr

김선학

조선대학교 토목공학과
501-759 광주광역시 동구 서석동 375
Tel: 062-230-7093
Fax: 062-230-7083
E-mail: sun93k@naver.com