

화강풍화토의 불포화 침투특성에 관한 연구

Infiltration Characteristics for Unsaturated Residual Soil

김영욱¹⁾, Young-Uk Kim, 김도형²⁾, Do-Hyung Kim, 정상규³⁾, Sang-Gyu Sung, 이인모⁴⁾, In-Mo Lee

¹⁾ 명지대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

⁴⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : This study investigated one-dimensional vertical infiltration to an unsaturated residual soil by numerical solutions, FDM. In order to estimate the parameters needed for numerical analysis, the soil-water characteristic curve(SWCC) of Shinnae-dong soil, one of the most typical residual soils in Korea, were experimentally obtained. Then, the statistical analysis for obtaining the SWCC was performed. The numerical solution to the linearized governing equation for unsaturated groundwater flow provides the infiltration characteristics for the unsaturated residual soil represented by transient pressure profiles and water contents profiles.

Key words : infiltration, soil-water characteristic curve, tempe cell, unsaturated soil, volumetric water content

1. 서론

실제 자연지반의 흙은 토질역학에서 일반적으로 다루어지는 포화상태의 흙이 아니라, 흙입자, 물, 공기, contractile skin의 4상구조로 이루어지는 불포화상태로 존재하는 경우가 많다. 이렇듯 불포화토의 투수관점에서는 포화토에서 사용하는 중량함수비를 사용하기보다는 전체간극에서 물이 흐를 수 있는 가용한 공간을 나타내는 지표인 체적함수비의 사용이 보다 합리적이라 할 수 있다.

지금까지 불포화토의 투수계수를 흡인력(Ψ)과 체적함수비(θ)의 함수로 제안하는 연구들이 많이 진행되어 왔으며, Srivastava와 Yeh(1991)는 불포화된 흙에서의 1차원 흐름특성에 관하여 고찰하였고, 이를 위해 흡인력의 함수인 투수계수와 체적함수비를 이용한 관계식을 제안하였다.

본 연구에서는 불포화된 흙에서의 1차원 침투 지배방정식을 선형화하여 유한차분법을 이용한 수치해석을 수행하였는데, 먼저 한국의 대표적인 풍화잔적토인 신내동 시료에 대하여 흙-수분 특성곡선을 구하고, 통계학적인 분석으로 수치해석에 사용될 변수들을 구하였다. 수치해석의 결과를 정리하여 시간 및 깊이에 따른 흡인력과 체적함수비의 변화양상을 구해서 불포화된 흙에서의 침투 특성을 파악하고, 이를 실내 실험을 통하여 구하여진 침투특성과 비교 검토하고자 한다.

2. 불포화 흐름의 1차원 지배방정식

불포화토의 침투특성은 투수계수, 흡인력, 체적함수비의 함수로서 표현할 수 있으며, Richards equation은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\Psi) \frac{\partial(\Psi+z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, z 는 연직 좌표, K 는 압력수두(Ψ , 불포화흐름에서는 음의 값)의 함수인 불포화 투수계수, θ 는 체적함수비를 나타낸다.

Srivastava와 Yeh(1991)는 식 (1)의 미분방정식을 풀기 위해서 투수계수와 체적함수비의 관계식을 흡인력의 함수로서 각각 다음과 같이 제안하였다.

$$K_z(\Psi) = K_s e^{\beta \Psi} \quad (2)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\beta \Psi} \quad (3)$$

여기서, β 는 흙 간극-크기 분포 지수(L^{-1}), θ_r 은 잔류 체적함수비(L^3L^{-3}), θ_s 는 포화 체적함수비(L^3L^{-3})를 나타낸다.

식 (2), (3)를 이용하여 식(1)을 선형화하면 다음과 같은 지배방정식이 된다.

$$\frac{\partial^2 K_z}{\partial z^2} + \beta \frac{\partial K_z}{\partial z} = \frac{\beta(\theta_s - \theta_r)}{K_s} \frac{\partial K_z}{\partial t} \quad (4)$$

2. 흙-수분 특성곡선

2.1 흙-수분 특성곡선의 정의

흙-수분 특성곡선은 흙에 작용하는 일정 흡인력 하에서 흙이 보유할 수 있는 수분의 양을 나타내는 것으로, 포화도-흡인력, 중량함수비-흡인력, 체적함수비-흡인력 등의 형태로 표현할 수 있다. 여기서, 흡인력은 총흡인력(total suction)으로서 매트릭 흡인력(matric suction)과 삼투 흡인력(osmotic suction)의 합을 의미하나 일반적으로 삼투 흡인력의 크기는 매우 작다고 가정할 수 있으므로 매트릭 흡인력만을 나타내기도 한다. 이러한 흙-수분 특성곡선은 불포화토 역학의 출발점이라고 할 수 있다.

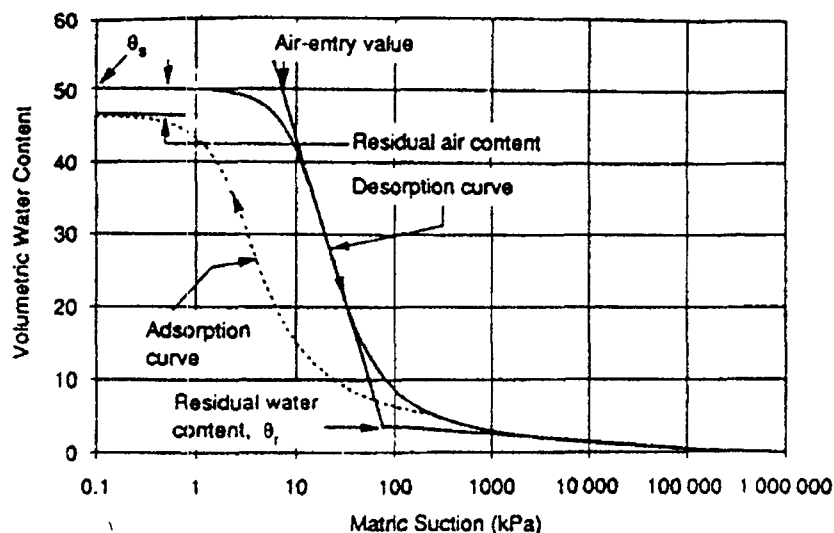


그림 1 전형적인 흙-수분 특성곡선 (Fredlund & Xing, 1994)

2.2 실내 실험

2.2.1 시료

본 연구에서는 한국의 대표적인 풍화잔적토인 신내동 시료를 채취하여 실내시험을 실행하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 다짐시험, 액·소성 시험, 입도 분포 시험을 행하였다. 시료의 물리적 특성은 표 1과 같으며, 시료의 입도분포 및 다짐 곡선은 각각 그림 2와 그림 3과 같다.

표 1 신내동 시료의 물성치

Soil	Porosity	O.M.C (%)	$\gamma_{d(max)}$ (kN/m ³)	Percent passing #200 sieve (%)	Plasticity(%)			G _s	USCS
					LI	PL	PI		
Shinnae-dong	0.358	10	18.64	14.23	NP			2.65	SC

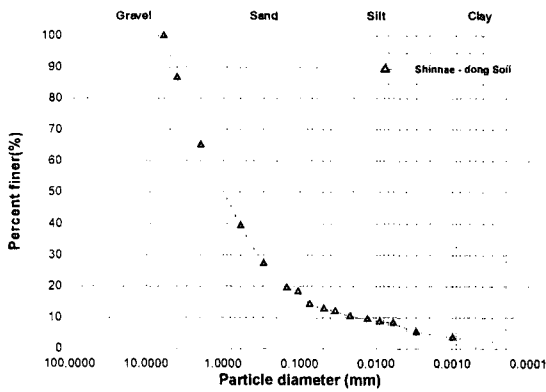


그림 2 신내동 시료의 입도분포

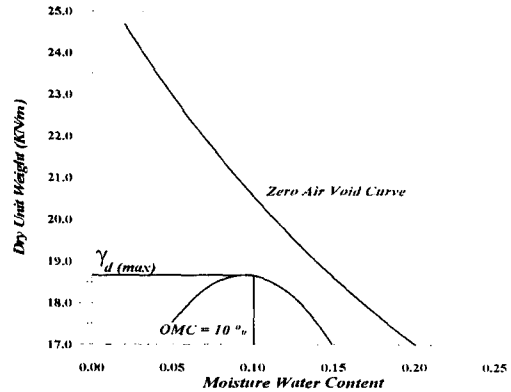


그림 3 신내동 시료의 다짐 곡선

2.2.2 실험 장비 및 방법

신내동 시료의 흡-수분 특성을 구하기 위해 tempe cell 장비를 사용하였다.(그림 4 참조) 실제 자연 지반에서는 대기압상태($u_a=0$)에서 함수비가 포화시로부터 감소함에 따라 물의 표면장력에 의해 발생하는 음(-)의 간극수압에 의해 흡인력($u_a - u_w$)이 발생하게 되지만, 실내시험에서는 음(-)의 간극수압이 커지면 공동화현상(cavitation)이 발생할 뿐만 아니라 실험에서 시료교란의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, $u_w=0$ 을 기준으로한 상태에서 u_a 를 증가시켜 흡인력을 발생시키게 된다.(axis-translation technique, Hilf, 1956) 시료의 직경은 64mm이고 높이는 25mm이며, 함수비 10%로 정적 다짐하였다. 흡인력 0~450 kPa의 범위에서 실험을 실행하였다.

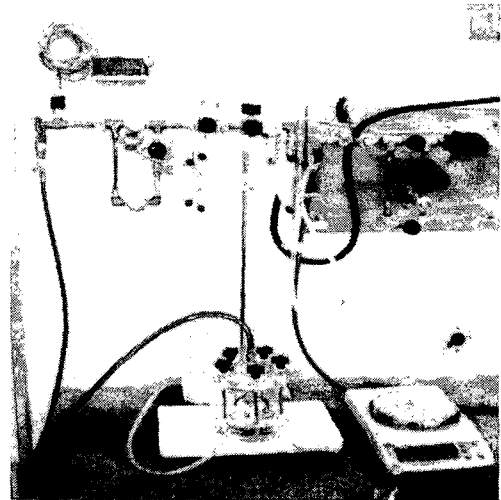


그림 4 Tempe cell 시험 개요

2.2.3 실험 결과 및 분석

표 2는 흡-수분 특성곡선 실험 전후의 시료 조건을 나타내며 그림 5와 그림 6은 각각 (중량함수비와 체적함수비)-흡인력, 포화도-흡인력의 관계로 나타낸 흡-수분 특성곡선이다. 흡-수분 특성곡선은 초기 함수비와 packing porosity에 따라 현저하게 차이게 나게 된다고 알려져 있다.(이 등, 2000)

표 2 Tempe cell 시험의 시료 조건

초기 간극비	0.444
초기 중량함수비(%)	10
초기 체적함수비(%)	18.35
실험 종료시 중량함수비(%)	4.72
실험 종료시 체적함수비(%)	8.65

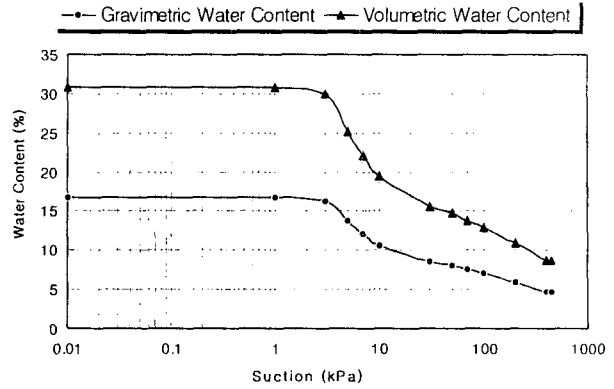


그림 5 흡-수분 특성곡선
(중량함수비와 체적함수비)

유한차분법에 의한 수치해석을 위해서 실험으로부터 구해진 중량함수비-흡인력의 흡-수분 특성곡선을 통계학적인 분석을 시행하여 다음과 같은 식을 얻었으며, 실측치와의 비교를 그림 7에 나타내었다. 여기서, R^2 은 94.6%로 비교적 큰 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

$$\theta = 11.5 + 19.9 e^{0.07 \Psi} \quad (5)$$

식 (5)로부터 추정된 신내동 시료의 간극-크기 분포 지수 (β)는 0.07이며, 유한차분법을 이용한 수치해석에서 변수로 활용하게 된다. 단, 흡인력 (Ψ)의 단위는 kPa이다

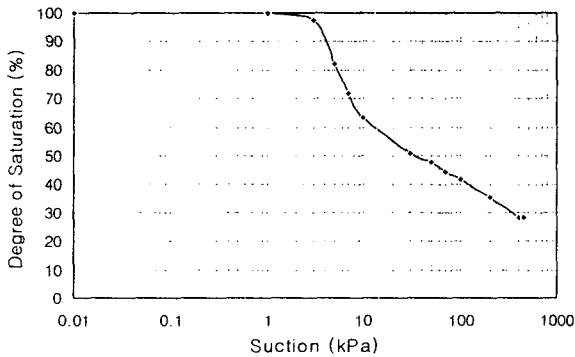


그림 6 흡-수분 특성곡선(포화도)

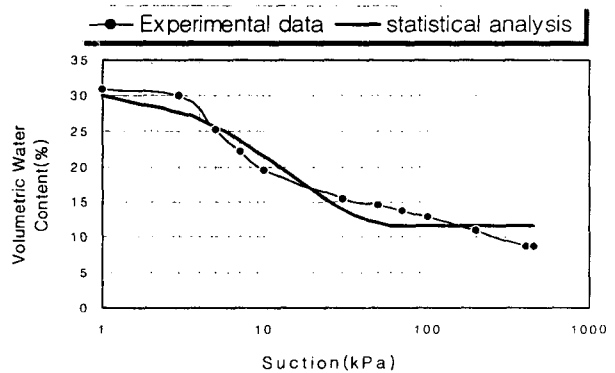


그림 7 통계학적인 SWCC 분석

3. 유한차분법을 이용한 수치해석

불토화된 지반에서 1차원 흐름의 침투특성을 유한차분법을 이용한 수치해석으로 예측해 보았다. 식 (4)의 지배방정식은 해석의 편의를 위해 식 (6)의 무차원 변수들을 이용하여 간략하게 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.(Srivastava와 Yeh(1991))

$$z' = \beta z \quad L' = \beta L \quad (6a)$$

$$K' = K/K_s \quad (6b)$$

$$q_A = q_A'/K_s, \quad q_B = q_B'/K_s \quad (6c)$$

$$t' = \frac{\beta K_s t}{\theta_s - \theta_r} \quad (6d)$$

$$\frac{\partial^2 K}{\partial z^2} + \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial K}{\partial t} \quad (7)$$

유한차분법의 수치해석을 위해서 사용되는 초기조건과 경계조건은 다음과 같으며, 그림 8에 나타내었다.

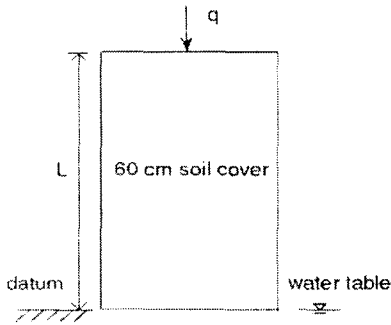


그림 8 수치해석에 사용된 지반

$$K(z, 0) = q_A - (q_A - e^{\beta \Psi_0}) e^{-z} = K_0(z) \quad (8)$$

$$K(0, t) = e^{\beta \Psi_0} \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial K}{\partial z} + K \right]_{z=L} = q_B \quad (10)$$

여기서, q_A 는 무차원화된 흙 표면에서의 초기 유입 유량, q_B 는 $t=0$ 이후의 흙 표면에서 일정 유입유량, Ψ_0 는 수면에서의 흡인력을 나타낸다.

본 연구에서는 식 (7)을 유한차분법에 의한 수치해석으로 분석하여 깊이와 시간에 따른 불포화토의 투수계수 분포를 구하였다. 다음에, 식 (2)와 흙-수분 특성곡선의 통계학적 분석을 통해서 구해진 β 값을 사용하여 투수계수에 따른 흡인력의 분포를 추정할 수 있는데 그 분포는 그림 9와 같다. 또한 이렇게 해서 구해진 깊이 및 시간에 따른 흡인력의 분포와 식 (3)을 이용하면 체적함수비의 분포를 그림 10과 같이 구할 수 있다.

수치해석에서 모델링 된 불포화 지반은 초기조건에서 $2.78 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 의 침투율로 포화되며 $t=0$ 이상의 시간에서는 $2.78 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 의 일정 침투율을 가진다. 해석 결과에서 보듯이, 침투율의 증가에 따라 대략 100시간이 지난 후에는 거의 포화상태에 이른다. 또한 유한차분법에 사용된 시간 간격은 해를 수렴시키기 위한 값을 추정하여 사용하였다.

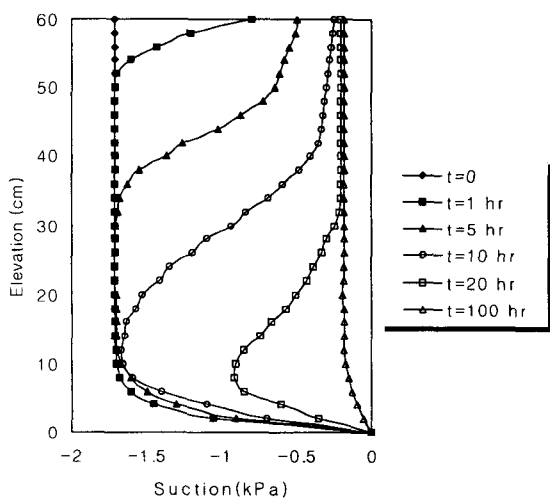


그림 9 흡인력 분포도

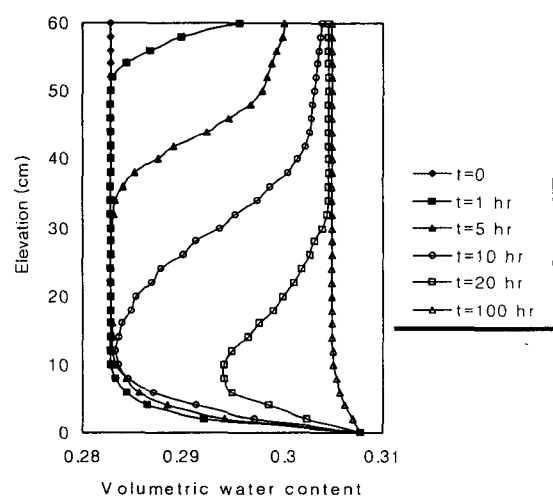


그림 10 체적함수비 분포도

그림 9와 그림 10의 유한차분법에 의한 수치해석 결과를 유한요소법을 사용한 수치해석(Choo와 Yanful(2000))

및 미분방정식의 정해(analytical solutions, Srivastava와 Yeh(1991))와 직접적인 수치 비교를 한다는 것은 해석시에 추정된 변수들과 해석지반의 물리적 특성이 동일하지 않으므로 어렵다. 하지만, 흡인력과 체적함수비의 시간 및 깊이에 따른 그 분포는 공학적으로 어느 정도 비슷한 변화양상을 가진다고 할 수 있다. 본 연구에서 얻어진 수치해석 결과는 현재 진행중인 불포화 실내투수 시험을 통해 얻어진 실제 데이터들과 비교해 보고자 한다. 즉, 수치해석과 실내시험의 결과를 비교함으로써 본 연구의 최종 목적인 화강풍화토의 불포화 침투특성 및 복토재로서의 기능에 대하여 전반적으로 고찰할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 불포화토의 선형화된 1차원 흐름 지배방정식에 대하여 Srivastava와 Yeh(1991)가 제안한 흡인력-투수계수, 흡인력-체적함수비의 관계를 이용하여 유한차분법에 의한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용되는 변수들은 흡-수분 특성곡선을 실내 실험을 통해 구한 뒤, 통계학적으로 추정하였다.

- 1) 유한차분법을 이용한 수치해석과 이전에 행하여진 해석적인 정해와 유한요소법을 사용한 수치해석 결과를 비교해 볼 때, 시간 및 깊이에 따른 흡인력과 체적함수비의 분포는 비슷한 변화 양상을 가진다.
- 2) Srivastava와 Yeh(1991)가 제안한 흡인력-체적함수비 관계식(식 (3))을 만족시키는 실내동 시료의 간극-크기 분포지수는 통계학적으로 추정했을 때 0.07로 나타났으며, 이때 R^2 은 94.6%이며, 흡인력의 단위는 kPa이다.
- 3) 이번 연구에서 구해진 유한차분법에 의한 해석결과는 현재 진행 중인 화강풍화토의 불포화 실내투수 시험으로 구하게 될 실제 흡인력, 체적함수비 분포와 비교할 계획이며, 화강풍화토의 복토재 사용에 대한 전반적 고찰을 수행할 것이다.

5. 감사의 글

본 연구는 교육부의 BK'21 사업에 의해 이루어진 결과로서 당 기관에 감사를 드린다.

6. 참고 문헌

1. 이인모, 성상규, 양일순 (2000), "풍화잔적토의 불포화전단강도 예측 및 특성연구", 한국지반공학회가 학술발표회 논문집, pp.377~384.
2. Choo, L.P and Yanful, E.K. (2000), "Water flow through cover soils using modeling and experimental methods", Journal of Geotechnical and Environmental. Engineering, pp.324-334.
3. Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993), Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley and Sons, Inc., New York.
4. Fredlund, D.G., Xing, A., and Huang, S. (1994), Predicting the permeability function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp.533-546
5. Srivastava, R. and Yeh, J. T.-C (1991), "Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils", Water Resour. Res., Vol 27(5), pp.753-762.
6. van Genuchten, M.T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Sci. Soc. of Am. J., Vol 44, pp.892-898.