

불포화 준설패립 지반의 흡-수분 특성곡선 및 불포화 투수계수 예측

Prediction of Soil-water Characteristic Curve and Unsaturated Permeability Coefficient of Reclaimed Ground

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul

이 학 주² Lee, Hak-Joo

오 영 인³ Oh, Young-In

Abstract

There has been outstanding research on the soil-water characteristic curves of unsaturated soils over the past several decades. Unfortunately, unsaturated soil mechanics has not been considered as an important factor in Korea. In this paper, laboratory test and numerical analysis(SoilVision Professional ver 3.04) were performed to investigate the prediction method of soil-water characteristic curve and unsaturated permeability coefficient in reclaimed ground. The pressure cell, desiccator, and tensiometer tests were conducted on three types of reclaimed soils(dredged soil, sand, weathered granite soil). Numerical analysis was executed to compare the results with the laboratory test results and also compared with the results of each prediction method. Based on the laboratory test, three different types of soils have shown different soil-water characteristic curves. The hysteresis for these soils is clearly defined. As a result of numerical analysis, Fredlund & Xing's method and Fredlund & Wilson's model proved to work out well for reclaimed ground soils in Korea. Also, predicting method based on the soil-water characteristic curves from the particle-size distributions is fairly reliable for estimating unsaturated permeability coefficient.

요 지

불포화지반에서 발생하는 부 간극수압은 함수비 변화에 따라 비선형적인 거동을 보이며, 이 관계를 흡-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)이라고 정의한다. 현재까지 우리나라의 흡에 대한 흡-수분 특성의 연구결과는 거의 전무한 실정이기 때문에 불포화 지반의 응력해석 및 침투해석 시, 마땅히 입력할 계수나 특성값이 없다. 본 연구에서는 준설패립지반의 주요 토사인 준설토와 모래, 그리고 복토재로 사용되는 화강풍화토에 대한 흡-수분 특성시험을 실시하여 흡-수분 특성을 규명하였으며, 해석적 검증을 통하여 불포화 지반의 응력해석 및 침투해석 시 필요한 계수를 분석하였다. 또한, 입도분포곡선으로부터 흡-수분 특성곡선 예측모델을 적용하고 흡-수분 특성시험 결과와 비교 검토하였다. 흡-수분 특성시험결과, 세 가지 시료 모두 뚜렷한 히스테리시스 현상을 나타내었으며, 기존에 제안된 경험방정식에 실험결과를 적용한 결과 Fredlund and Xing의 경험방정식은 세 가지 시료 모두에 대하여 높은 정확도를 나타내었다. 한편, 입도분포를 이용한 예측모델은 Fredlund and Wilson의 방법이 가장 높은 정확도를 나타내었다. 흡-수분 특성 시험결과와 다양한 예측모델을 통하여 불포화 투수계수를 예측하여 상호 비교한 결과, 모래와 화강풍화토는 Fredlund and Wilson의 방법, 준설토는 Arya and Paris의 예측모델이 높은 정확도를 나타내었다.

Keywords : Air-entry value, Matric suction, Soil-water characteristic curve, Unsaturated permeability coefficient, Volumetric water content

1 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Univ. of Incheon, ecshin@inchoen.ac.kr)

2 (주)수성엔지니어링 토질부 주임 (Engineer, Division of Geotechnical Engrg., Soosung Engrg. Co., LTD.)

3 정희원, 캘리포니아 주립대 박사 후 연구원 (Member, Post Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engrg., California State Univ. at Sacramento)

1. 서론

자연지반은 지하수의 위치에 따라 포화영역과 불포화 영역으로 나뉘어 지는데, 포화영역은 흙 입자와 그 사이의 간극이 모두 물로 채워진 상태이고, 불포화영역은 포화영역으로부터 인장력을 발휘하여 흙 입자들을 서로 결합시키고, 체적과 질량이 작아 물의 한 부분으로 고려되는 공기와 물의 접촉면을 포함하는 4상구조(solids, water, air, contractile skin)를 이룬다. 불포화영역의 간극 속에는 물과 공기의 압력 차에 의한 표면장력과 물분자를 결합하는 표면력이 발생한다. 따라서, 불포화토의 침투거동특성을 규명하는데는 함수비의 변화에 따른 부간극수압의 측정이 이루어져야 한다. 체적함수비와 부간극수압과의 관계는 흙의 종류에 따라 다른 특성을 보일 뿐만 아니라 동일한 흙이라도 수분이 증가할 때(wetting)와 감소할 때(drying)의 관계가 동일하지 않다. 이 관계는 흙수분 특성곡선으로 나타낼 수 있다. 불포화흐름에 대한 기본식은 일반적으로 지반의 내부나 외부에서 가해지는 유량에 대해서도 고려할 수 있도록 방정식을 유도하며, 불포화토를 통하여 흐르는 유량의 방정식은 시간의 변화에 따른 체적함수비의 변화로 표시된다. 따라서 불포화토에 대한 침투거동은 부간극수압의 변화에 따라 달라지는 함수비의 변화 즉, 흙수분 특성을 규명하는 것이 무엇보다 중요하다. 해외 선진연구기관과 대학에서는 여러 종류의 흙에 대하여 흙수분 특성을 연구하고 실험하여 상당히 진보된 결과를 발표하였으나, 우리나라의 흙에 대한 불포화토 연구는 아직까지 초기단계에 있는 실정이다. 국내 흙에 대한 불포화토 연구를 간단히 살펴보면, 류지협(1997)은 풍화토의 세립분에 따른 불포화특성연구를 수행한 바 있으며, 이인모 등(2000)과 이형주 등(2003)은 체적이 변화하는 경우의 흙수분 특성곡선식과 증발이론에 대한 연구를 수행하였다.

우리나라에서는 국토의 확장을 위하여 많은 준설매립을 시행하여 택지와 공업단지를 건설하고 있다. 준설매립지역은 지하수위보다 높은 불포화 지반을 형성한다. 특히, 지하수위가 높고 조위에 따라 그 변위가 클 것으로 예상되어 다른 어떤 지반보다도 흙수분 특성에 관한 연구가 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 준설매립지의 주요 토사인 준설토와 그 하부층에 존재하는 모래, 그리고 복토재로 사용되는 화강풍화토에 대한 흙수분 특성을 규명하여 불포화 지반의 침투해석과 강도특성

결정 시 필요한 계수를 제공하고, 입도분포곡선으로부터 흙수분 특성 예측모델을 적용하고 실험결과와 비교하였다. 또한, 흙수분 특성시험결과와 Fredlund and Wilson(1997)의 예측결과로부터 불포화 투수계수를 예측하고 그 결과를 비교 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 불포화토의 특성

2.1 흙수분 특성곡선

흙수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)은 불포화토의 거동을 이해하는데 가장 중요한 관계이다. 흙수분 특성곡선의 정의는 함수비와 흡인력의 관계 또는 응력상태 변수로 규정할 수 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 함수비는 흙의 간극사이에 채워진 물의 양으로 규정되며, 응력 평형상태에서 유지되는 함수비는 간극 크기와 물로 채워진 간극부피의 함수이다. 기본적으로 흙수분 특성곡선은 가해진 흡인력상태에서 흙이 물을 저류할 수 있는 능력을 나타낸다. 수십 년 동안 흙수분 특성곡선은 다른 불포화토의 특성계수를 예측하는데 기초적인 자료로 이용되어 왔으며, 현재에는 불포화의 거동을 이해하는데 가장 중요한 시작이라고 할 수 있다(Barbour, 1998). 실트질 흙에 대한 대표적인 흙수분 특성곡선은 그림 1에 나타난 바와 같다. 함수비로 체적함수비(θ), 중량함수비(ω)를 사용할 수 있다. 또한 간극과 물로 포화된 간극의 부피비로 표현되는 포화도(S)를 사용할 수도 있으며, 위의 변수들은 함수비를 잔류함수비(residual water content)로 나타낼 때 정규상태로 나타내기도 한다. 이때 흡인력은 흙의 매트릭 흡인력($u_a - u_w$) 또는 전체 흡인력으로서 높은 흡인력 단계에

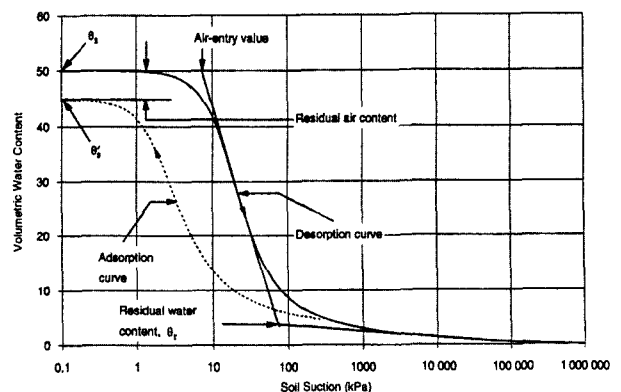


그림 1. 실트질 흙의 대표적인 흙수분 특성곡선(Fredlund and Xing, 1994)

서는 매트릭 흡인력이 지배적인 것으로 가정하여 전체 흡인력은 매트릭 흡인력에 대응하는 것으로 한다. 그림 1에서 직선은 건조곡선, 점선은 습윤곡선을 나타낸다. 흡수곡선은 히스테리시스 현상으로 인하여 건조곡선과 다르지만, 두 가지의 곡선은 유사한 형태를 나타낸다. 흙의 공기함입저항값(air-entry value)은 흙의 가장 큰 간극으로 공기가 침입할 때의 매트릭 흡인력이다.

2.2 흙-수분 특성곡선의 예측

불포화 영역에서 유체의 흐름이나 오염물질 이동에 수치모델이 널리 사용되고 있다. 수치해석의 적용을 위해서는 불포화토의 특성을 나타내는 모델에 필요한 계수의 결정이 요구된다. 따라서, 연구자들은 불포화토의 공학적 특성이 흡인력에 영향을 받는 것에 착안하여 흙-수분 특성을 나타내는 모델에 사용되는 계수를 결정하는 방법에 많은 노력을 기울여왔다. 현재까지 연구된 흙-수분 특성곡선의 예측방법은 크게 두가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 압력셀, 텐지오미터 시험등과 같은 흙-수분 특성시험을 통한 경험적 예측방정식을 이용하는 방법이 있으며, 두 번째는 흡입자의 구조 및 걸조적인 입도분포와 습윤 단위중량으로부터 흙-수분 특성곡선을 예측하는 방법이 있다.

흙-수분 특성시험을 통한 결과를 바탕으로 흙-수분 특성곡선을 예측하는 경험방정식은 Fredlund and Xing(1994), van Genuchten(1980), Mualem(1976), Burdine(1953), Gardner(1956), Brooks and Corey(1964)에 의하여 발표되었으며, 각 연구자에 의해 제안된 경험방정식은 식 (1)~(6)에 나타낸 바와 같다.

$$\omega_w = \omega_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \times \left[\frac{1}{\left[\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f} \right] \right]^{m_f}} \right] \quad (1)$$

여기서, ω_w 는 매트릭 흡인력 단계별 중량함수비, ω_s 는 포화중량함수비, a_f 는 공기함입저항값과 관련된 계수(kPa), n_f 는 공기함입저항값을 초과한 후의 경사와 관련된 계수, m_f 는 잔류함수비와 관련된 계수, h_r 는 잔류함수비에 대응하는 매트릭 흡인력(kPa), ψ 는 매트릭 흡인력(kPa)을 나타낸다.

$$\omega_w = \omega_{rvg} + (\omega_s - \omega_{rvg}) \left[\frac{1}{\left[1 + (a_{vg}\psi)^{n_{vg}} \right]^{m_{vg}}} \right] \quad (2)$$

$$\omega_w = \omega_{rm} + (\omega_s - \omega_{rm}) \left[\frac{1}{\left[1 + (a_m\psi)^{n_m} \right]^{(1 - \frac{1}{n_m})}} \right] \quad (3)$$

$$\omega_w = \omega_{rb} + (\omega_s - \omega_{rb}) \left[\frac{1}{\left[1 + (a_b\psi)^{n_b} \right]^{(1 - \frac{2}{n_b})}} \right] \quad (4)$$

$$\omega_w = \omega_{rg} + (\omega_s - \omega_{rg}) \left[\frac{1}{\left[1 + a_g\psi^{n_g} \right]} \right] \quad (5)$$

$$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{a_c}{\psi} \right]^{n_c} \quad (6)$$

여기서, ω_{rvg} , ω_{rm} , ω_{rb} , ω_{rg} , ω_r 는 잔류중량함수비, a_{vg} , a_m , a_b , a_c 는 공기함입저항값과 관련된 계수(kPa), n_{vg} , n_m , n_b , n_c 는 공기함입저항값을 초과한 후의 경사와 관련된 계수, m_{vg} 는 잔류함수비와 관련된 계수를 나타낸다

또한, 흙의 입도분포와 습윤밀도를 바탕으로 흙-수분 곡선을 예측하는 모델은 Fredlund and Wilson(1997), Arya and Paris(1981), Scheinost et al.(1997), Vereecken et al.(1989)에 의하여 제안되었으며, 각각의 연구자에 의한 흙-수분 특성곡선 예측모델은 식 (7)~(10)에 나타낸 바와 같다.

$$P_p(d) = \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{g_a}{d}\right)^{g_n + g_m} \right]} \times \left[1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{d_r}{d}\right)}{\ln\left(1 + \frac{d_r}{d_m}\right)} \right]^7 \right] \quad (7)$$

여기서, $P_p(d)$ 는 특정 입자크기(d)에서의 통과백분율, g_a 는 방정식의 초기 변곡점에 대응하는 계수, g_n 는 방정식의 경사에 대응하는 계수, g_m 는 방정식의 곡률에 대응하는 계수, d 는 입자 크기(mm), d_r 는 잔류 입자 크기(mm), d_m 는 최소 입자 크기(mm)를 나타낸다.

$$\Psi_i = 2\gamma \cos \theta / \rho_w g r_i \quad (8)$$

여기서, Ψ_i 는 매트릭 흡인력, γ 는 물의 표면장력, θ 는 접촉각, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, r_i 는 간극 반경을 나타낸다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (1 + (ah)^n)^m \quad (9)$$

여기서, 계수 $a = a_0 + a_1 \cdot d_g$, $n = n_0 + n_1 \cdot \sigma_g^{-1}$, $\theta_s = s_1 \cdot F + s_2 \cdot clay_x$, $\theta_r = r_1 \cdot clay_x + r_2 \cdot C_{org}$, $m = (-)1$ 로 가정, F 는 간극률, C_{org} 는 유기물 함유량, d_g 는 입도분포곡선에서 평균 입경, σ_g 는 입도분포곡선의 표준편차, $clay_x$ 는 점토 함유율이다.

$$S_e = \{1 + (\alpha h)^n\}^{-m} \quad (10)$$

여기서, S_e 는 $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, θ 는 체적함수비, θ_r 는 잔류체적함수비, θ_s 는 포화 체적함수비, h 는 수두 (cm), α , n , m 은 계수이다.

본 연구에서는 상기 기술한 여섯 가지의 흡수분 특성시험을 통한 경험방정식으로 실험결과를 나타내고, 각각의 방정식별 계수를 결정하여 모래, 준설토, 화강풍화토에 대하여 실험결과를 분석하였다. 또한, 각각의 시료에 대하여 입도분포실험을 실시하여 입도분포에 따른 예측모델을 흡수분 특성시험결과와 비교 분석하였으며, 각각의 방정식의 결정계수를 구하여 시료별로 가장 높은 정확도를 나타내는 방정식을 결정하였다.

2.3 불포화 투수계수의 예측

흡수분 특성곡선은 다른 불포화도에 관한 계수를 예측하기 위한 기본요소로 사용된다. Childs and Collis-George(1950)는 흡수분 특성곡선에 포함된 정보가 불포화도의 특성을 판단하는데 유용하다고 설명하고 간극크기의 다양한 변화에 기초한 투수계수방정식의 예측 모델을 제안하였다. 그 이후로 이 모델은 Marshall (1958)에 의해 수정되었고 Kunze et al.(1968)에 의해 더욱 발전되었다. 흡수분 특성곡선이 제공하는 정보에 기초하여 부피변화, 전단강도, 투수계수, 확산, 흡착, 증기확산 등 많은 다른 불포화도의 성질을 예측하는 방법이 제안되었다. 불포화도의 성질을 예측하기 위한 가장 기초적인 조건은 불포화도에 포함된 간극수의 분포와 구조적 역할을 이해하는 것이다. 흡수분 특성곡선의 적용성은 그 곡선으로부터 투수계수 방정식을 유추할 수 있다는 것이다. 가장 최근에 발표된 불포화 투수계수 방정식 중 식 (11)은 Fredlund et al.(1994)에 의해 제안된 식이다.

$$k_r(\Psi) = \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\Psi_{ave})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (11)$$

여기서, b 는 $\ln(1,000,000)$, y 는 흡인력을 대표하는 적분변수, Ψ_{ave} 는 공기함입저항값, θ' 는 흡수분 특성방정식의 도함수, k_r 은 상대투수계수(k_i/k_s)를 나타낸다.

3. 실내시험

3.1 시험시료의 특성

시험에는 인천 해안 준설토에서 채취한 시료를 사용하였으며, 시료의 공학적 특성 분석을 위한 지반공학 특성시험과 광물학적 특성을 분석하기 위한 X-선 회절분석 및 형광분석을 실시하였다. 그림 2는 각각의 시료에 대한 입도분포곡선을 나타낸 것이며, 지반공학 특성시험 결과는 표 1에 나타낸 바와 같다. X-선 회절분석 및 형광분석결과 모래와 준설토는 거의 비슷한 광물조성을 나타내는데 석영, 소다장석, 카리장석이 주

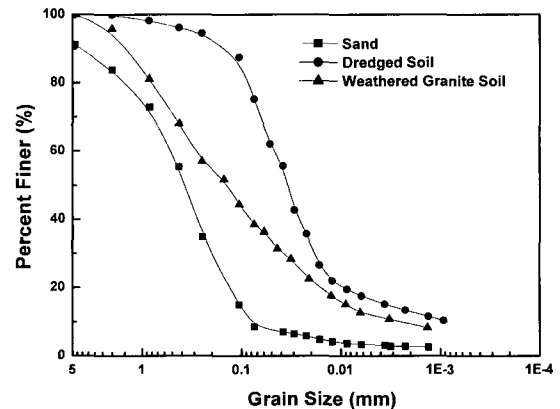


그림 2. 시험시료의 입도분포곡선

표 1. 시료의 지반공학 특성

특성	시료	모래	준설토	화강풍화토
비중		2.65	2.67	2.65
최대건조단위중량 (γ_{dmax} , tf/m^3)		1.95	1.72	1.88
최적함수비 (ω_{opt} , %)		11.1	16.2	12.4
유효입경 (mm)		0.0572	0.0007	0.0028
균등계수 (C_u)		9.90	66.29	120.43
곡률계수 (C_c)		1.22	12.07	1.52
포화투수계수 (k_s , cm/sec)		2.1×10^{-4}	1.7×10^{-5}	2.0×10^{-6}
No. 200체 통과량 (%)		8.51	75.2	38.5
통일분류법		SW-SM	ML	SM

요광물로 나타났으며, 화학성분은 산화규소(SiO_2)가 70% 이상을 차지하고 있다. 화강풍화토는 모래와 같은 3가지의 광물외에 점토광물인 카올리나이트(Kaolinite)를 포함하고 있으며, 화학성분은 산화규소(SiO_2)의 함량은 상대적으로 적고, 산화알루미늄(Al_2O_3)의 함량은 상대적으로 많이 포함하는 것으로 나타났다.

3.2 흡·수분 특성시험

메트릭 흡인력 측정방법은 장력을 받아 흡 입자에 흡착되어 있는 수압을 직접 측정하는 방법과 불포화토에 압력을 가하여 흡 입자에 부착되어 있는 수분추출에 요구되는 압력을 측정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 압력셀 실험, 데이게이터 실험, 텐시오미터 실험을 실시하였다. 압력셀 시험은 압력셀에 공기함입저항값이 큰 세라믹판을 설치한 후 그 위에 시료를 올려놓고 셀 내부에 공기압을 가해주어 압력셀에서 추출되는 물의 양을 측정하여 변화하는 체적함수비를 측정하는 방법이며, 시험 장비는 그림 3에 나타낸 바와 같다. 본 시험에서는 공기함입저항값이 500kPa, 간극률이 31%인 세라믹판을 사용하였으며, 이 세라믹판은 상당히 작고 균일한 크기의 간극을 가지고 있어서 세라믹판이 포화되어 있을 때 물은 통과시키고 공기는 통과시키지 않는 역할을 한다. 본 연구의 세라믹판의 경우는 시간당 $1.0kg/cm^2$ 의 공기압 조건에서 60ml 정도의 물을 통과시키는 것으로 나타났다. 실험방법은 시료를 높이가 2cm이고, 직경이 10cm인 몰드에 시료의 포화도 100%에 해당하는 포화중량함수비와 일정 단위중량으로 시료를 성형한 후 실험을 실시하였다. 공기압이 $1.0kg/cm^2$ 이하인 단계에서는 약 48시간 이상의 지체시간을 두었고, 그 이상의 압

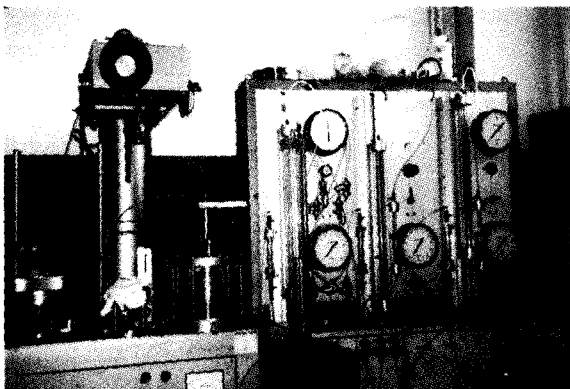


그림 3. 압력셀과 가압장치

력단계에서는 약 24시간의 지체시간을 두었다. 그러므로 압력셀 실험은 단계적으로 탈수를 시키면서 수행됨으로 결과적으로 건조곡선(drying curve)이 얻어진다. 시험초기 단계의 시료성형 조건은 표 2에 나타낸 바와 같다.

1,500kPa 이상의 높은 흡인력 범위에서 흡·수분 특성곡선을 얻기 위하여 삼투 데시게이터 실험을 실시한다. 실험방법은 압력셀 실험을 완전히 끝낸 시료를 포화염용액과 함께 데시게이터 안에 넣어서 일정한 상대습도 상태에서 시료를 건조시킨다. 이때 포화염용액은 데시게이터 안의 공기와 시료에 특정 상대습도와 증기압을 유지시킨다(Young, 1967).

본 실험에서는 두가지의 포화염용액을 사용하였으며 표 3은 포화염용액이 조절할 수 있는 상대습도와 등가의 전체흡인력을 나타낸다. 본 실험을 실시하는 동안 데시게이터를 항온기에 넣어 20°C를 유지시킨다. 열역학 원리에 기초하여 시료에 가해지는 등가의 전체흡인력(ψ)은 다음의 식 (12)로 계산할 수 있다.

$$\psi = - \frac{RT}{v_{wo}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{vo}}\right) \quad (12)$$

여기서, ψ 는 전체 흡인력, R 은 기체상수, 8.31432 J/(mol K), T 는 절대온도($K=273.16+t^\circ C$), v_{wo} 는 물의 비체적(m^3/kg), ω_v 는 수증기의 분자량(18.016kg/kmol), \bar{u}_v 는 간극수의 부분증기압(kPa), \bar{u}_{vo} 는 순수한 물의 포화증기압(kPa), \bar{u}_v/\bar{u}_{vo} 는 상대습도(%)를 나타낸다. 그림 4

표 2. 시료의 성형조건

특성	시료	모래 및 화강풍화토	준설토
중량함수비(%)		21.09	27.07
체적함수비(%)		35.85	41.96
포화도(%)		100	100
간극률(%)		35.85	41.96
간극비		0.56	0.72
건조단위중량 (tf/m^3)		1.70	1.55
비중		2.65	2.67

표 3. 포화염용액의 상대습도와 등가 전체흡인력

포화염용액	상대습도(%)	온도(°C)	등가전체 흡인력(kPa)
마그네슘 클로라이드 ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	33	20	150,000
마그네슘 니트레이트 ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)	51	20	91,000

는 실험에 사용된 데시게이터와 포화염용액을 나타낸다.

텐지오미터(tensiometer)는 Soil Moisture Co. Ltd.의 제품으로 공식명칭은 Jet-Fill Tensiometer이다. 길이가 45.72cm이며, 100kPa의 공기함입저항값을 가진 세라믹 컵과 플라스틱 튜브 및 100kPa까지 측정가능한 게이지 등 세 부분으로 구성된다. 측정방법은 텐지오미터 내에 공기를 제거시킨 증류수를 채우고 게이지를 영점 조정 한 후 팁을 불포화토를 담은 용기안으로 관입시킨다. 그러면 메트릭 흡인력이 측정된다. 본 실험은 함수비를 조금씩 증가시키면서 메트릭 흡인력을 측정하므로 측정 결과로부터 습윤곡선을 얻을 수 있다. 실험장면은 그림 5에 나타난 바와 같다.

간극수와 텐지오미터 내의 물이 다공성 막을 통하여 평형을 이루었을 때의 함수비를 측정하게 된다. 흡과 측정기구 사이에 평형상태가 도달되면, 텐지오미터 내의

물은 흡에 존재하는 간극수와 같은 부압을 가지며, 공기압이 대기압일 때 측정되는 부압은 수치적으로 흡인력 값과 같게 된다. 간극공기압이 대기압 보다 클 때 흡의 흡인력은 텐지오미터의 읽음값에 주위의 간극공기압 읽음값을 더하여야 하며 측정된 흡인력 값은 세라믹 팁의 공기함입저항값을 넘지 않아야 한다. 실험방법은 시료를 높이가 13.0cm이고, 직경이 10.0cm인 다짐몰드에 압력셀실험과 같은 조건의 건조단위중량으로 다져서 넣고 텐지오미터를 삽입한다. 게이지의 부압은 계속증가하게 되는데 평형상태에 도달하게 되면 게이지의 읽음값은 간극수의 부압과 같게 된다. 평형상태에 도달하기 위한 시간은 보통 24시간이면 충분하므로 각 함수비 단계별로 24시간 후의 게이지 읽음값을 부간극수압으로 측정하였다. 함수비를 단계별로 증가시키기 위하여 전 함수비 단계의 실험이 끝나면 흡에 물을 첨가시켜 교반한 후, 다음 실험단계를 진행하였다.

4. 실내실험 및 해석 결과분석

4.1 흡-수분 특성실험 결과 및 분석

본 연구의 압력셀 실험에서는 500kPa의 공기함입저항값을 갖는 세라믹판을 사용하였고 압력셀 내부로 가해지는 공기압은 최대 490kPa이하로 제한하여 실험하였다. 데시게이터 실험에서 시료에 적용된 메트릭 흡인력은 91,000kPa과 150,000kPa이다. 그림 6~그림 8은 실험으로 얻은 흡-수분 특성곡선을 세가지 변수로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 메트릭 흡인력의 증가에 따른 함수비의 감소는 No. 200체 통과량이 적고 상대적으로 조립질인 모래에서 가장 급격하게 나타났으며, 준설토와 화강풍화토에서는 완만한 곡선을 그리며 감소하였다. 메트릭 흡인력이 20kPa까지는 화강풍화토에 비하여 준설토의 함수비 감소율이 적었으나 그 이상의 범위에서는 준설토의 함수비 감소율은 계속적으로 증가하였고 화강풍화토는 상대적으로 적은 함수비 감소율을 보였다. 시료의 상대적인 차이를 알 수 있는 포화도에 대하여 나타난 그림에서 보면 No. 200체 통과량이 상대적으로 많은 준설토가 화강풍화토보다 급격한 포화도의 감소를 보이는데 이에 대한 원인으로 화강풍화토에 함유되어 있는 점토광물과 높은 건조단위중량에 의한 것이라 판단된다. 점토는 흡착현상으로 인하여 높은 흡인력단계에서 저류능력을 증가시키므로, 모세관현상에 지

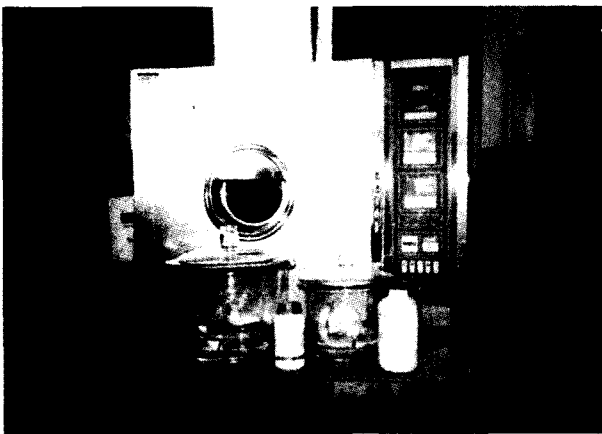


그림 4. 데시게이터 실험

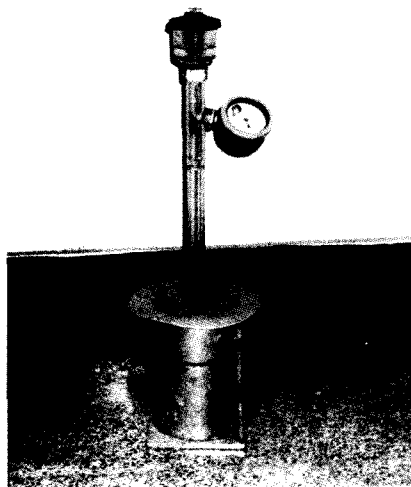


그림 5. 텐지오미터의 부압측정

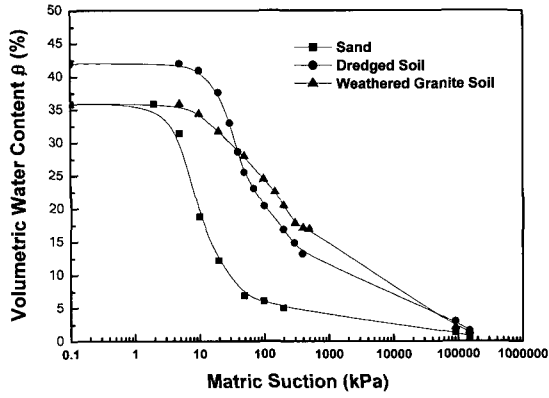


그림 6. 매트릭 흡인력에 대한 체적함수비

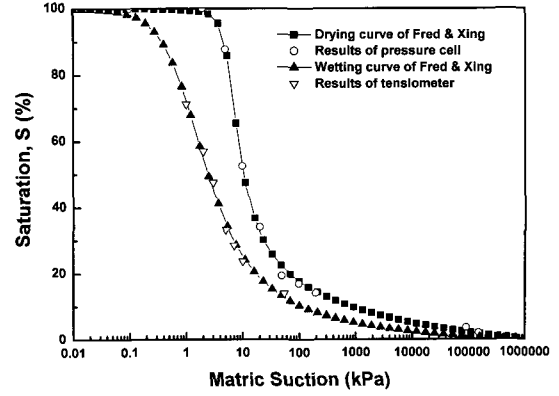


그림 9. 모래의 히스테리시스 현상

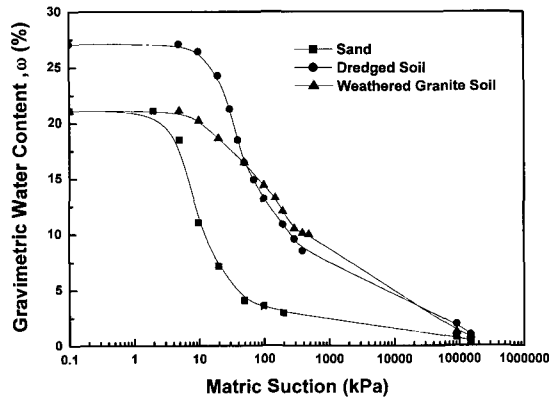


그림 7. 매트릭 흡인력에 대한 중량함수비

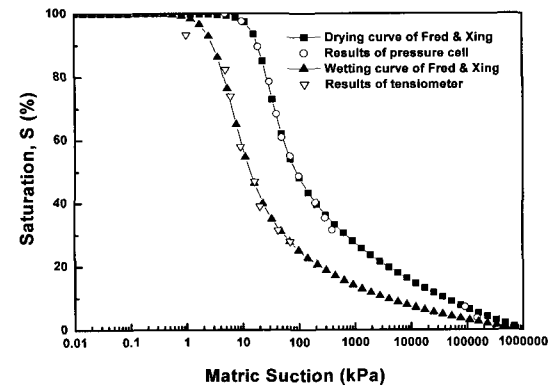


그림 10. 준설토의 히스테리시스 현상

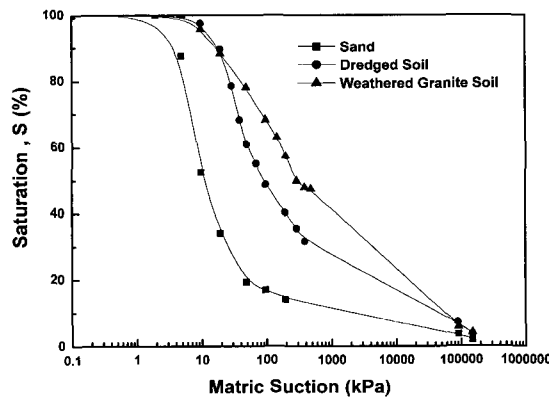


그림 8. 매트릭 흡인력에 대한 포화도

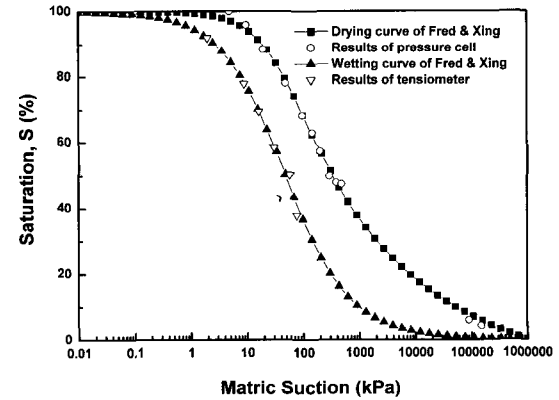


그림 11. 화강풍화토의 히스테리시스 현상

배를 받는 낮은 매트릭 흡인력 범위인 100kPa 이하에서는 세립분 함유율이 높은 준설토의 저류능력이 크지만, 그 이상의 매트릭 흡인력에서는 점토를 포함하는 화강 풍화토의 저류능력이 크게 나타난 것으로 판단된다. 매트릭 흡인력이 91,000kPa과 150,000kPa인 범위내에서 실험한 데시게이터 실험결과, 모래의 함수비가 가장 작게 나타났고, 준설토와 화강풍화토에서는 거의 비슷한 함수비로 모래의 함수비보다 높게 나타났다.

그림 9~그림 11는 각각의 시료에 대하여 압력셀 실험으로부터 얻은 건조곡선과 텐지오미터 실험결과로부터 얻은 습윤곡선을 Fredlund and Xing의 경험방정식을 사용하여 최적화한 곡선으로 히스테리시스현상을 나타낸 것이다. 건조곡선과 습윤곡선을 함께 나타낸 결과, 분류상 모래와 실트인 세 가지 시료 모두에서 히스테리시스 현상을 확인할 수 있다. 모래는 흡인력이 낮기 때문에 흡수분 특성은 주로 모세관 현상과 간극크기 분

포에 따라 영향을 크게 받는다. 실험결과에서 No. 200 체 통과량이 많은 준설토와 화강풍화토의 흡-수분 특성 곡선이 완만하게 변화하고 높은 흡인력에서도 많은 수분을 보유하는 것을 알 수 있으며, 거의 유사한 정도의 히스테리시스 현상을 나타내는 것을 알 수 있다.

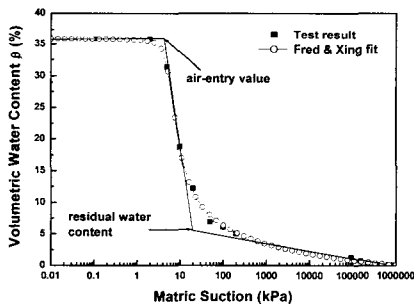
4.2 흡-수분 특성곡선 분석

흡-수분 특성곡선 분석을 위하여 SoilVision Professional ver 3.04를 사용하여 분석하였으며, 각 경험방정식별 계수를 결정하기 위하여 최소제곱회귀분석을 이용하였다. 그 결과로부터 각 경험방정식의 적합성을 판

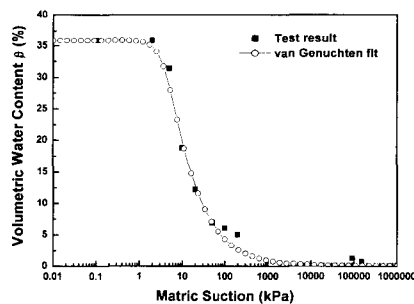
단하여 시료별로 적절한 경험방정식을 판별할 수 있다. 각각의 시료에 대한 분석결과는 표 4에 나타난 바와 같으며, 그림 12~그림 14는 대표적 경험식에 대한 회귀 분석결과와 흡-수분 특성시험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 각각의 시료에 대한 분석결과에서 보는 바와 같이 분석에 사용된 모든 경험방정식은 결정계수(R^2)가 0.97이상의 높은 정확도를 나타내었다. 모래와 화강풍화토의 경우는 Fredlund and Xing의 방정식 결정계수가 가장 높은 정확도를 나타내었고, 준설토의 경우는 van Genuchten의 방정식 결정계수가 가장 높은 정확도를 나타내었다. 모래와 화강풍화토의 경우, 가장 높은 정확도를 나타내는 Fredlund and Xing의 방정식으로 회귀

표 4. 각 시료에 대한 회귀분석결과

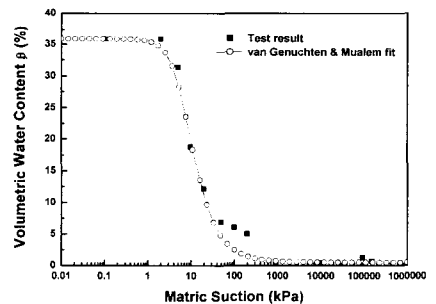
예측모델	경험 계수		분석결과	모래	준설토	화강풍화토
Fredlund & Xing	a_f	5.572556kPa	공기함입저항값(kPa)	4.05	14.44	13.74
	n_f	4.651409	잔류체적함수비(%)	6.80	15.50	10.20
	m_f	0.5940426	결정계수(R^2)	0.999762	0.999728	0.999989
	h_r	18.16769				
van Genuchten	a_{vg}	0.233702(1/kPa)	공기함입저항값(kPa)	2.81	10.95	15.26
	n_{vg}	2.7232	잔류체적함수비(%)	0.00	4.85	1.40
	m_{vg}	0.2470251	결정계수(R^2)	0.9745289	0.999748	0.9978937
Mualem	a_m	0.148939(1/kPa)	공기함입저항값(kPa)	3.18	10.29	15.10
	n_m	2.067693	잔류체적함수비(%)	0.52	0.57	0.00
			결정계수(R^2)	0.9886007	0.9909415	0.995791
Burdine	a_b	0.2018858(1/kPa)	공기함입저항값(kPa)	3.17	11.14	16.27
	n_b	2.83312	잔류체적함수비(%)	0.41	0.48	0.004
			결정계수(R^2)	0.9932677	0.9961394	0.9905529
Gardner	a_g	0.01397021(1/kPa)	공기함입저항값(kPa)	3.43	11.29	23.0
	n_g	1.78695	잔류체적함수비(%)	0.70	0.86	0.38
			결정계수(R^2)	0.9826091	0.9787314	0.9931406
Brooks & Corey	a_c	3.780277	공기함입저항값(kPa)	3.63	8.35	15.58
	n_c	0.6188237	잔류체적함수비(%)	0.06	9.79	0.00
			결정계수(R^2)	0.9946837	0.990924	0.982946



(a) Fredlund and Xing



(b) van Genuchten



(c) Mualem

그림 12. 모래의 최적곡선분석 결과

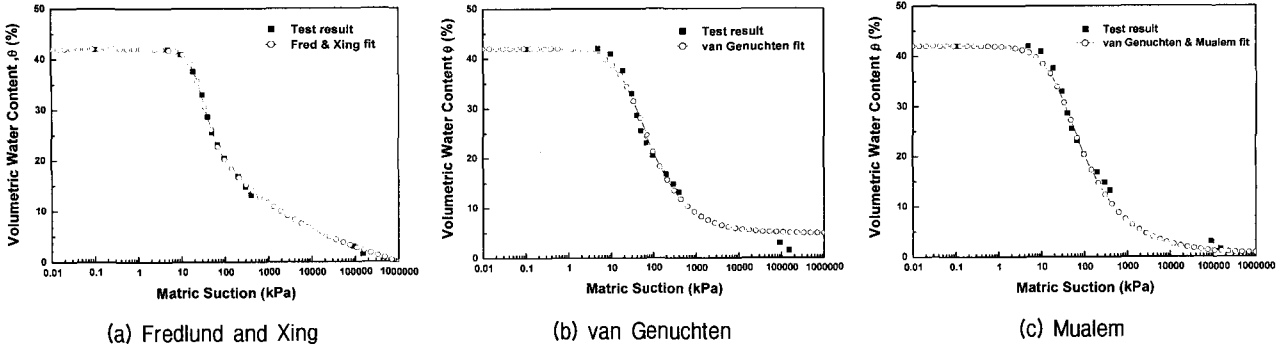


그림 13. 준설토 최적곡선분석 결과

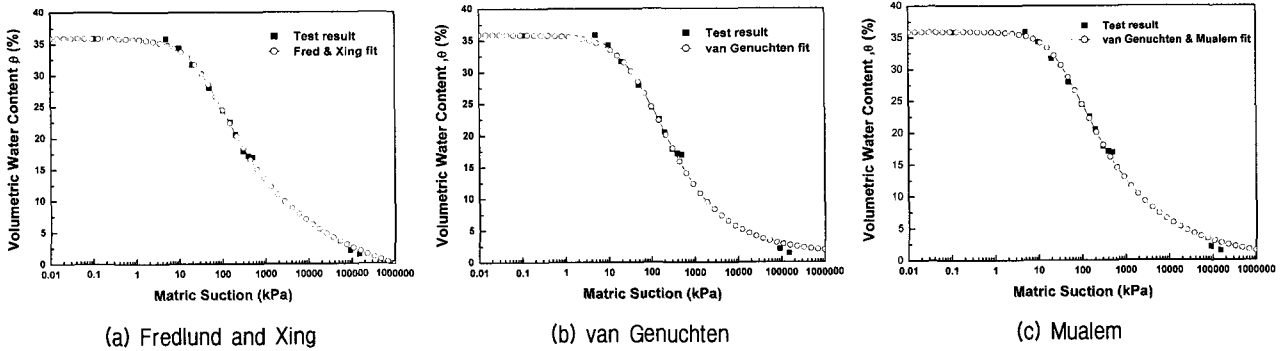


그림 14. 화강풍화토의 최적곡선분석 결과

분석한 결과로부터 결정한 공기함입저항값은 4.05kPa, 13.74kPa이고, 잔류체적함수비는 6.80%, 10.20%로 나타났다. 준설토의 경우, van Genuchten의 방정식으로 회귀분석한 결과 공기함입저항값은 10.95kPa, 잔류체적함수비는 4.85%를 나타냈었다.

Fredlund and Xing의 경험방정식은 모래, 준설토, 화강풍화토 모두에 대하여 결정계수가 0.999 이상의 높은 적합성을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 데시게이터 실험에 적용된 높은 메트릭 흡인력 범위에서는 다른 방정식에 비하여 상당히 정확한 결과를 나타내었다. 모든 시료에 대하여 높은 정확성을 보이는 Fredlund and Xing

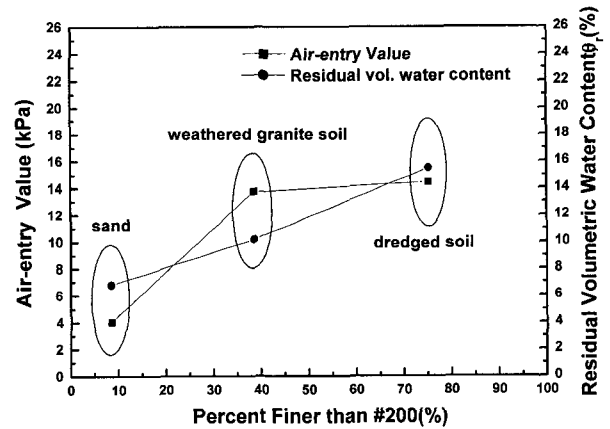


그림 15. No. 200체 통과량에 따른 공기함입저항값과 잔류체적함수비

표 5. 입도분포에 따른 흡-수분 특성 예측결과

예측모델	흡-수분 특성값	예측결과		
		모래	준설토	화강풍화토
Fredlund & Wilson	공기함입저항값	1.57 kPa	2.15 kPa	4.84 kPa
	결정계수(R ²)	0.9188423	0.9138993	0.9690288
Arya & Paris	공기함입저항값	0.16 kPa	9.36 kPa	0.18 kPa
	결정계수(R ²)	0.3174613	0.9562479	-1.053359
Scheinost	공기함입저항값	4.45 kPa	26.71 kPa	6.70 kPa
	결정계수(R ²)	0.6896599	0.3808126	0.9067796
Vereecken	공기함입저항값	8.0 kPa	8.78 kPa	8.43 kPa
	결정계수(R ²)	0.7249264	0.7883174	0.859893

의 방정식으로 회귀분석하여 결정한 공기함입저항값과 잔류체적함수비는 No. 200체 통과량에 대하여 그림 15와 같은 관계를 갖는다. 그림에서 보느냐와 같이 No. 200체 통과량에 대한 잔류체적함수비는 거의 완전한 선형관계를 보인다. 그러나 공기함입저항값은 통과량이 가장 많은 준설토와 화강풍화토의 경우 입도 및 점토세립분의 함량의 영향으로 거의 같은 값을 나타내었다.

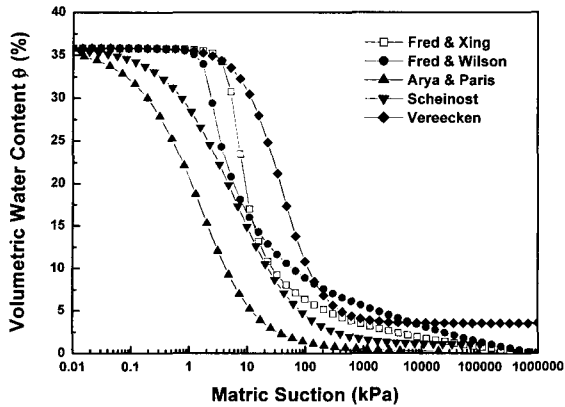


그림 16. 모래의 흡-수분 특성곡선 예측결과

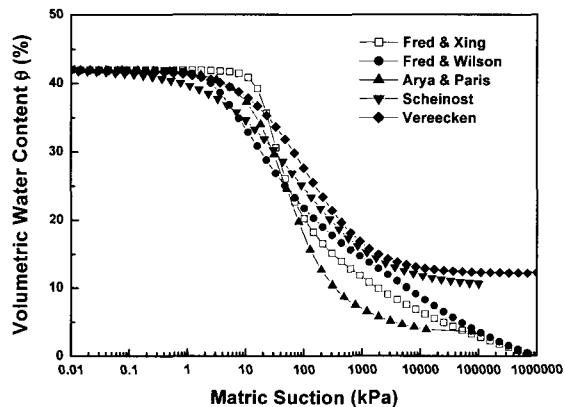


그림 17. 준설토의 흡-수분 특성곡선 예측결과

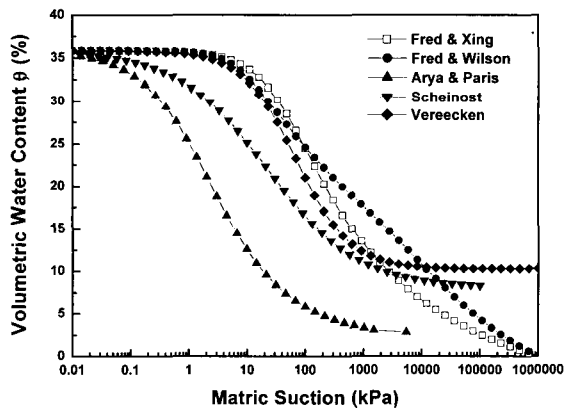


그림 18. 화강풍화토의 흡-수분 특성곡선 예측결과

또한, 입도분포를 이용하여 흡-수분 특성곡선을 예측하는 모델을 이용하여 모래에 대하여 예측한 결과는 표 5와 그림 16~그림 18에 나타낸 바와 같다. 실험결과에는 세 가지 시료의 흡-수분 특성곡선을 나타내는데 높은 정확도를 갖는 Fredlund and Xing의 방정식으로 최적곡선을 나타내었다. 분석결과, Fredlund and Wilson의 예측 방정식은 결정계수가 0.9188423으로 가장 높은 정확도를 나타내었다. 그러나 다른 세 가지의 방법은 0.8이하의 낮은 정확도를 나타내어 모래의 흡-수분 특성곡선을 예측하는데 부적절한 모델로 판단된다.

4.3 불포화 투수계수의 예측분석

각 시료별 불포화 투수계수의 예측결과는 표 6과 그림 19~그림 21에 나타내었다. 세 가지 시료에 대하여 불포화 투수계수는 공기함입저항값 부근에서 투수계수가 감소하기 시작하였으며 차수층의 불투수 기준이 되는 1.0×10^{-7} cm/sec를 기준으로 하면, 모래는 메트릭 흡인력이 30.0kPa, 준설토는 73.0kPa, 화강풍화토는 17.0kPa에서 불투수특성을 갖는 것으로 예측되었다. 흡-수분 특성시험결과와 Fredlund and Wilson의 예측방법 및 Arya and Paris의 방법으로 불포화 투수계수를 예측하여 상호 비교한 결과, 모래와 화강풍화토는 Fredlund and Wilson의 방법, 준설토는 Arya and Paris의 예측모델이 높은 정확도를 나타내었다.

표 6. 불포화 투수계수의 예측결과 비교

시료	흡-수분 특성곡선 예측모델	결정계수(R ²)
모래	Fred & Wilson 예측모델	0.825641026
	Arya & Paris 예측모델	0.821410952
준설토	Fred & Wilson 예측모델	0.422792304
준설토	Arya & Paris 예측모델	0.821410952
화강풍화토	Fred & Wilson 예측모델	0.987161594

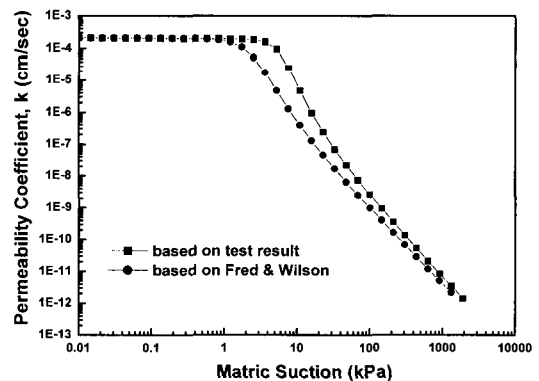


그림 19. 모래의 불포화 투수계수 예측결과

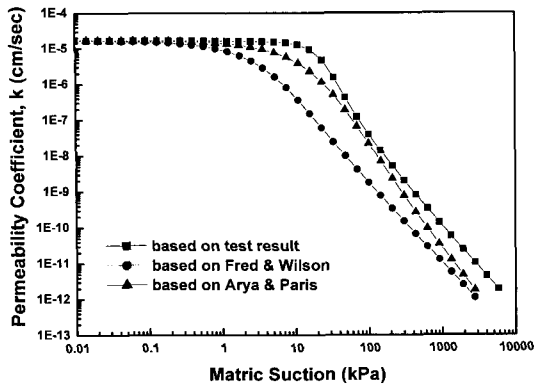


그림 20. 준설토의 불포화 투수계수 예측결과

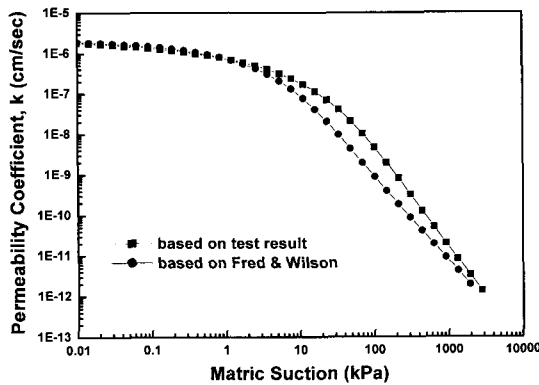


그림 21. 화강풍화토의 불포화 투수계수 예측결과

5. 결론

본 연구에서는 준설토지역에서 채취한 모래, 준설토 및 화강풍화토에 대하여 흡-수분 특성시험을 실시하여 각각의 흡-수분 특성곡선을 결정하였으며, 기존에 제안된 흡-수분 특성곡선의 방정식에 실험값을 적용시켜 각 경험방정식별 계수를 결정하였다. 또한 기존의 입도분포를 이용한 예측모델을 이용하여 흡-수분 특성곡선을 예측하고, 그 예측한 결과와 실험값을 비교 분석하였다. 실험과 입도분포를 이용한 예측모델로부터 얻은 흡-수분 특성곡선으로 불포화 투수계수를 예측하고 상호 비교 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 각 시료별로 흡-수분 특성시험 결과를 가장 적합하게 나타내는 방법은 모래와 화강풍화토에 대해서는 Fredlund and Xing의 경험방정식이며, 준설토의 경우는 van Genuchten의 경험방정식으로 나타났다. 또한, Fredlund and Xing의 방정식은 세 가지 시료 모두에 대하여 높은 정확도로 실험결과 값을 나타낼

수 있다.

- (2) 각 시료별로 적합한 경험방정식으로부터 결정한 공기함입저항값은 모래와 화강풍화토의 경우 Fredlund and Xing의 경험방정식으로부터 공기함입저항값은 각각 4.05kPa, 13.74kPa로 나타났으며, 잔류체적함수비는 6.80%, 10.20%로 나타났다. 준설토는 van Genuchten의 경험방정식으로부터 공기함입저항값은 10.95kPa, 잔류체적함수비는 4.85%로 나타났다.
- (3) 준설토와 화강풍화토의 실험결과로부터 모세관현상에 의해 지배되는 낮은 흡인력단계에서는 세립분 함유율이 많은 준설토의 저류능력이 크게 나타났으며, 흡착현상에 의해 지배되는 100kPa이상의 높은 흡인력단계에서는 점토광물인 카올리나이트를 함유하는 화강풍화토의 저류능력이 큰 것으로 나타났다.
- (4) 분류상 모래와 실트인 세 가지 시료에서 히스테리시스현상을 확인할 수 있으며, 세립분 함유율이 가장 적은 모래에서 가장 확실한 히스테리시스를 확인할 수 있다.
- (5) 입도분포를 이용한 예측모델로부터 예측된 흡-수분 특성곡선과 시험결과를 비교 분석한 결과, 모래와 화강풍화토에 대해서는 Fredlund and Wilson의 예측모델이 가장 높은 정확도를 나타내었으며, 준설토의 경우는 Arya and Paris의 예측모델이 가장 높은 정확도를 나타내었다. Fredlund and Wilson의 예측모델은 모래, 준설토, 화강풍화토에 대하여 결정계수가 0.9이상의 높은 정확도로 예측하였다.
- (6) 불포화 투수계수를 흡-수분 특성시험으로 결정한 흡-수분 특성곡선으로부터 예측한 결과, 대략 공기함입저항값에서 투수계수가 감소하기 시작하였다. 실험결과와 Fredlund and Wilson의 예측방법 및 Arya and Paris의 방법으로 불포화 투수계수를 예측하여 상호 비교한 결과, 모래와 화강풍화토는 Fredlund and Wilson의 방법, 준설토는 Arya and Paris의 예측모델이 높은 정확도를 나타내었다.

참고 문헌

- 류지협 (1997), "불포화 화강풍화토의 투수 및 강도특성", 공학박사 학위논문, 동국대학교.
- 이인모, 이형주, 김기섭, 김영욱 (2000), "체적이 변하는 흙의 흡-수분특성곡선식 개발 비교", 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제6호, pp.15-21.
- 이형주, 이인모, 이영남, 성상규 (2003), "준설토점토 지반에서의 증발이론개발", 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제4호, pp.55-64.

4. Arya, L. M. and Paris, J. F. (1981), "A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-size Distribution and Bulk Density Data", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, pp.1023-1030.
5. Barbour, S. L. (1998), "The Soil-water Characteristic Curve : A Historical Perspective", *Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium*.
6. Brooks R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic Properties of Porous Media", Colorado State University, *Hydrology Paper*, No.3, 27, pp.71-78.
7. Burdine, N. T. (1953), "Relative Permeability Calculation from Pore Size Distribution Data", *Petroleum Trans. AIME*, Vol.198, pp.71-77.
8. Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950), "The Permeability of Porous Materials", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol.201, pp.392-405.
9. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
10. Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532.
11. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.533-546.
12. Fredlund, M. D., Wilson, G. W., and Fredlund, D. G. (1997), "Predicting of the Soil-water Characteristic Curve from Grain-size Distribution and Volume-mass Properties", *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, Rio de Janeiro, Brazil.
13. Gardner, W. R. (1956), "Mathematics of Isothermal Water Conduction in Unsaturated Soils", Highway Research Board Special Report, *40th International Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in soils*, Washington D.C., pp.78-87.
14. Kunze, R. J., Uehara, G., and Graham, K. (1968), "Factors important in the Calculation of Hydraulic Conductivity", *Proceedings of Soil Science Society of America*, Vol.32, pp.760-765.
15. Marshall, T. J. (1958), "A Relation Between Permeability and Size Distribution of Pores", *Journal of Soil Science*, Vol.9, pp.1-8.
16. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resource Research*, Vol.12, pp.513-522.
17. Scheinost, A.C., Sinowski, W., and Auerswald, K. (1997), "Regionalization of Soil Water Retention Curves in a Highly Variable Soilscape, I". *Developing a new pedotransfer function*, Geoderma, 78, pp.129-143.
18. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989), "Estimating the Soil Moisture Retention Characteristic from Texture, Bulk Density, and Carbon Content", *Journal of Soil Science*, Vol.148, No.6, pp.389-403.
19. van Genuchten, M. T. (1980), "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
20. Young, J. F. (1967), "Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solutions", *Journal of Applied Chemistry*, Vol.17, pp.241-245.

(접수일자 2003. 10. 30, 심사완료일 2004. 2. 13)