

준설매립토 및 화강풍화토의 흙-수분 특성곡선에 관한 연구

A Study on Soil-Water Characteristic Curves of Reclaimed Soil and Weathered Granite Soil

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 이학주²⁾, Hak Joo Lee, 김환준³⁾, Hwan Jun Kim

¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Eng. University of Incheon

²⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사, M.Sc, Dept. of Civil & Environmental System Eng. University of Incheon

³⁾ 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, MS. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng. University of Incheon

SYNOPSIS : Unsaturated soil has a possibility to induce a negative pore water pressure. Until now, saturated soil is mainly focused on the research of soil mechanics. Recently, soil mechanics is researched on two major parts such as saturated and unsaturated soil mechanics. Negative pore water pressure has a non-linear relationship with the water content changes. Soil-water characteristic curves of soil in Korea are not determined. There is no proper characteristic value such as air-entry value and residual water content. In this study, the characteristic curves of reclaimed soil, sand, and weathered granite soil were determined by laboratory tests. Air-entry value and residual water content were determined by fitting methods. Soil-water characteristic curves were estimated based on the particle-size distribution and compared with the laboratory test results. The results of soil-water characteristic curves estimation indicated that Fredlund and Wilson's model is excellent for sand and weathered granite soil. Arya and Paris's model is excellent for reclaimed soil.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Air-entry value, Residual water content

1. 서론

지금까지 토질역학 분야의 연구는 포화토를 중심으로 이루어져 왔으나, 최근에는 지반을 포화토와 불포화토로 나누어 연구가 진행되고 있다. 불포화토의 침투거동특성을 규명하기 위하여 함수비의 변화에 따른 부간극수압을 측정을 하여야 하며, 이 관계를 흙-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)이라 하며, 비선형적인 거동을 보인다. 현재까지 우리나라의 흙에 대한 흙-수분 특성의 연구결과는 전무한 실정이기 때문에 불포화 지반의 침투해석 시에 입력할 계수나 특성값이 없다. 본 연구에서는 준설매립지의 주요토사인 준설토와 그 하부층에 존재하는 모래, 그리고 복토재로 사용되는 화강풍화토에 대한 흙-수분 특성곡선을 결정하고 예측모델에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구의 주요 내용은 모래, 준설토, 화강풍화토에 대하여 각각 흙-수분 특성곡선을 결정하기 위하여 압력셀 실험과 데시게이터 실험을 실시하였다. 실험결과를 제안된 경험방정식을 적용하여, 각각의 시료에 대한 방정식의 계수를 결정한 다음 공기함입저항값과 잔류함수비를 결정하였다. 또한, 세 가지 시료에 대한 입도분포곡선을 결정하고, 그 결과를 이용하여 기존의 흙-수분 특성곡선 예측모델로부터 각 시료별 흙-수분 특성곡선을 예측하고 앞서 실증한 특성곡선과 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 압력셀 실험

본 실험은 압력셀에 공기함입저항값이 큰 세라믹판을 설치한 후 그 위에 시료를 올려놓고 셀 내부에 공기압을 가해주어 압력셀에서 추출되는 물의 양을 측정하여 변화하는 함수비를 측정하는 방법이며, 실험장치는 그림 1에 나타내었다. 이 때 가해진 공기압이 부간극수압이 되고, 이 압력으로 추출된 물의 양을 측정하면 체적함수비가 얻어진다. 본 실험에서는 공기함입저항값이 500kPa인 세라믹판을 사용하여 실험하였으며, 실험초기 시료성형 조건은 표 1에 나타내었다.

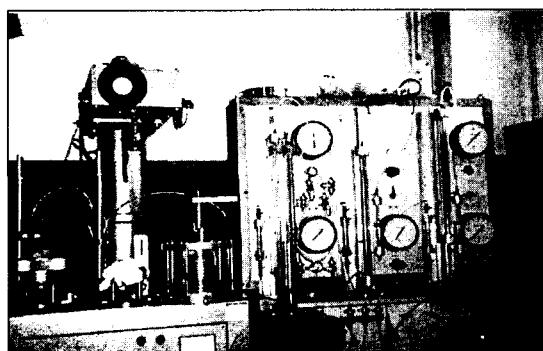


그림 1. 압력셀과 가압장치

표 1. 시료의 성형조건

시료 특성	모래	준설토	화강풍화토
w (%)	21.09	27.07	21.09
θ (%)	35.85	41.96	35.85
S (%)	100.0	100.0	100.0
n (%)	35.85	41.96	35.85
e	0.559	0.723	0.559
v_d (t/m^3)	1.70	1.55	1.70

2.2 데시게이터 실험

1,500kPa 이상의 높은 흡인력 범위에서 흙-수분 특성곡선을 얻기 위하여 삼투 데시게이터(desiccator) 실험을 실시하였다. 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. 본 실험에서는 마그네슘 클로라이드와 마그네슘 니트레이트 두가지의 포화염용액을 사용하였으며, 데시게이터를 항온기에 넣어 20°C를 유지시킨다. 마그네슘 클로라이드의 경우의 전체흡인력이 150,000kPa, 마그네슘 니트레이트의 경우는 91,000kPa이다. 본 실험에서는 4주 후부터 시료의 무게를 정기적으로 측정하여 평형상태에 이르는 시점을 결정하였다.

3. 실험 결과

3.1 지반공학적 특성시험결과

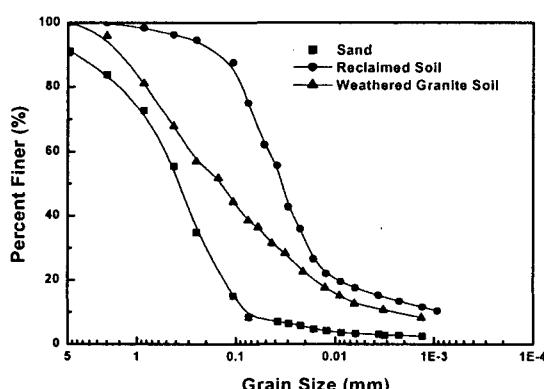


그림 2. 입도분포곡선

표 2. 지반공학적 특성

시료 특성	모래	준설토	화강풍화토
G_s	2.65	2.67	2.65
$v_d \max$ (t/m^3)	1.95	1.72	1.88
w_{opt} (%)	11.1	16.2	12.4
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
USCS	SW-SM	ML	SM

3.2 광물학적 특성시험결과

화강풍화토의 XRD 시험결과는 그림 3에 나타낸 바와 같이, 모래와 준설토에서 나타난 석영(Quartz), 소다장석(Albite), 카리장석(Orthoclase), 무스코바이트(Muscovite)의 주요광물외에 점토광물인 카올리나이트(Kaolinite)를 포함하고 잔피크가 많이 나타나는 것으로 유기물을 많이 포함하는 것으로 판단된다. XRF 시험결과는 표 3에 나타내었으며, XRD 시험결과와 같이 모래와 준설토는 거의 비슷한 화학성분을 나타내고 화강풍화토는 상대적으로 산화규소의 함유량이 적은 것으로 나타났다.

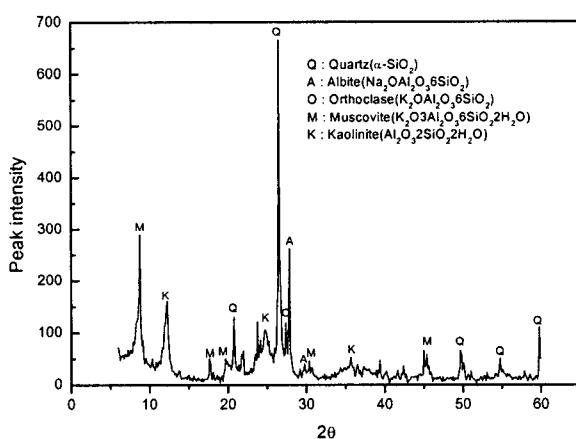


그림 3. 화강풍화토의 XRD 시험결과

표 3. XRF 시험결과(중량백분율, %)

화학성분	모 래	준설토	화강풍화토
SiO ₂	71.731	77.471	59.293
Al ₂ O ₃	14.848	12.03	24.574
Fe ₂ O ₃	4.673	3.124	6.661
TiO ₂	0.945	0.602	0.744
MnO	0.033	0.025	0.065
CaO	1.649	0.243	1.703
MgO	0.87	0.984	1.514
Na ₂ O	2.194	2.294	1.845
K ₂ O	3.249	2.854	3.272
P ₂ O ₅	0.219	0.129	0.243
ZrO ₂	0.148	0.075	0.069
합 계	100	100	100

3.3 흙-수분 특성실험결과

압력셀 실험과 데시케이터 실험으로 각 시료의 흙-수분 특성곡선을 결정하였다. 메트릭 흡인력의 증가에 따른 함수비의 감소는 No. 200체 통과량이 적고 상대적으로 조립질인 모래에서 가장 급격하게 나타났으며, 준설토와 화강풍화토에서는 완만하게 감소하였다. 모래의 경우, 메트릭 흡인력이 2kPa까지는 함수비의 변화가 없었고, 그 이상의 메트릭 흡인력에서는 급격한 함수비의 감소를 보였으며, 100kPa 정도에 이르러서는 함수비의 감소가 다소 줄어들며 잔류함수비상태로 진행되었다. 준설토의 경우, 메트릭 흡인력이 10kPa까지는 거의 포화상태를 유지하다가 그 이상의 메트릭 흡인력에서 급격한 함수비의 감소가 발생하였으며, 400kPa까지도 어느정도의 함수비를 유지하면서 계속적으로 함수비가 감소하였다. 화강풍화토의 경우는 8kPa 정도의 메트릭 흡인력에서 급격한 함수비 감소가 일어났으며 높은 흡인력 범위까지 함수비의 감소가 가장 적었다. 메트릭 흡인력이 20kPa까지는 화강풍화토에 비하여 준설토의 함수비 감소율이 적었으나, 그 이상의 범위에서는 준설토의 함수비 감소율은 계속적으로 증가하였고 화강풍화토는 상대적으로 적은 함수비 감소율을 보였다. 이러한 결과는 화강풍화토가 함유한 점토의 흡착현상으로 인하여 100kPa이상의 높은 흡인력단계에서 저류능력을 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다. 메트릭 흡인력이 91,000kPa과 150,000kPa인 범위에서 실증한 데시케이터 실험결과, 모래의 함수비가 가장 작게 나타났고, 준설토와 화강풍화토에서는 거의 비슷한 함수비로 모래의 함수비보다 높게 나타났다.

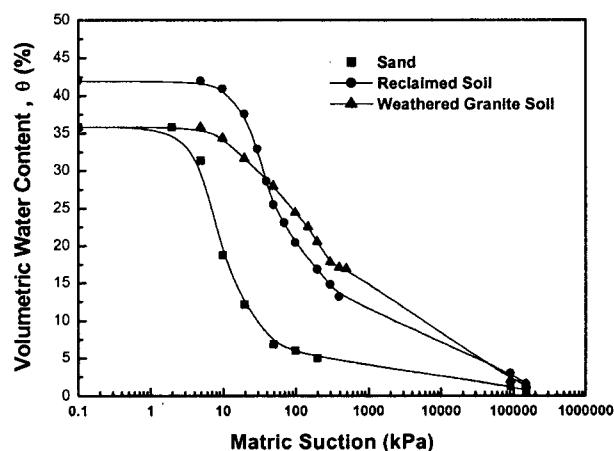


그림 4. 흙-수분 특성실험결과

4. 실험결과 분석

4.1 흙-수분 특성곡선의 경험방정식

실험으로 결정한 흙-수분 특성을 현재까지 제안된 Fredlund와 Xing(1994), van Genuchten(1980), van Genuchten과 Mualem(1976), van Genuchten과 Burdine(1953), Gardner(1964), Brooks와 Corey(1964)의 경험방정식으로 최적화 시키면 각 방정식의 계수, 공기함입저항값과 잔류함수비를 결정할 수 있다.

Fredlund and Xing(1994)	$\omega_w = \omega_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left[\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \right]$	(1)
van Genuchten(1980)	$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{1}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \right]$	(2)
van Genuchten and Mualem(1976)	$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{1}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^{(1-\frac{1}{n})}} \right]$	(3)
van Genuchten and Burdine(1953)	$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{1}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^{(1-\frac{2}{n})}} \right]$	(4)
Gardner(1964)	$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{1}{[1 + \alpha\Psi^n]} \right]$	(5)
Brooks and Corey(1964)	$\omega_w = \omega_r + (\omega_s - \omega_r) \left[\frac{1}{[1 + \alpha\Psi^n]} \right]$	(6)

여기서, ω_w 는 메트릭 흡인력 단계별 중량함수비, ω_s 는 포화중량함수비, ω_r 는 잔류중량함수비, a 는 공기 함입저항값과 관련된 계수(kPa), n 은 공기함입저항값을 초과한 후의 경사와 관련된 계수, m 은 잔류함수비와 관련된 계수, h_r 는 잔류함수비에 대응하는 메트릭 흡인력(kPa), Ψ 는 메트릭 흡인력(kPa)을 나타낸다.

4.2 흙-수분 특성곡선의 분석결과

모래에 대한 분석결과는 표 4와 그림 5에 나타내었으며, 분석에 사용된 모든 경험방정식은 결정계수(R^2)가 0.97이상의 높은 정확도를 나타내었다. 분석결과, Fredlund와 Xing의 경험방정식의 결정계수가 0.999762로 가장 높은 정확도를 나타내었으며, Fredlund와 Xing의 경험방정식으로 결정한 공기함입저항값은 4.05kPa이고, 잔류체적함수비는 6.80%로 나타났다. 분석에 사용한 모든 방정식의 결과로부터 결정한 공기함입저항값의 범위는 2.81~4.05kPa이고, 잔류체적함수비의 범위는 0.0~6.80%로 나타났다.

준설토에 대한 분석결과는 표 5와 그림 6에 나타내었으며, 모든 경험방정식의 결정계수는 0.97이상의 높은 정확도를 나타내었다. 분석결과, van Genuchten의 경험방정식의 결정계수가 0.999748로 가장 높은 정확도를 나타내었고, van Genuchten의 경험방정식으로부터 결정한 공기함입저항값은 10.95kPa이고, 잔류체적함수비는 4.85%로 나타났다. 모든 경험방정식의 결과로부터 결정된 공기함입저항값의 범위는 8.35~14.44kPa이며, 잔류체적함수비의 범위는 0.48~15.50%로 나타났다.

화강풍화토에 대한 분석결과는 표 6과 그림 7에 나타내었으며, 분석에 사용된 모든 경험방정식은 결정계수가 0.98이상의 높은 정확도를 나타내었다. Fredlund와 Xing의 경험방정식의 결정계수가 0.999989로 가장 높은 정확도를 나타내었으며, 가장 높은 정확도를 나타내는 Fredlund와 Xing의 경험방정식으로 회귀분석한 결과로부터 공기함입저항값은 13.74kPa이고, 잔류체적함수비는 10.20%로 나타났다. 분석에 사용된 모든 방정식의 결과로부터 결정한 공기함입저항값의 범위는 13.74~23.0kPa로 나타났고, 잔류체적함수비의 범위는 0.00~10.20%로 나타났다. Fredlund와 Xing의 경험방정식은 모래, 준설토, 화강풍화토 모두에 대하여 결정계수가 0.999 이상의 높은 적합성을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 데시케이터 실험에 적용된 높은 메트릭 흡인력 범위에서는 다른 방정식에 비하여 높은 정확도를 나타내었다.

표 4. 모래의 회귀분석 결과

예측모델	경험 계수	분석 결과
Fredlund & Xing	a 5.572556 kPa	공기 합입 저항값 4.05 kPa
	n 4.651409	잔류체적 합수비 6.80 %
	m 0.5940426	결정계수(R^2) 0.999762
	hr 18.16769	
van Genuchten	a 0.233702 (1/kPa)	공기 합입 저항값 2.81 kPa
	n 2.7232	잔류체적 합수비 0.00 %
	m 0.2470251	결정계수(R^2) 0.9745289
van & Mualem	a 0.148939 (1/kPa)	공기 합입 저항값 3.18 kPa
	n 2.067693	잔류체적 합수비 0.52 %
	m 0.9886007	결정계수(R^2)
van & Burdine	a 0.2018858 (1/kPa)	공기 합입 저항값 3.17 kPa
	n 2.83312	잔류체적 합수비 0.41 %
	m 0.9932677	결정계수(R^2)
Gardner	a 0.01397021 (1/kPa)	공기 합입 저항값 3.43 kPa
	n 1.78695	잔류체적 합수비 0.70 %
	m 0.9826091	결정계수(R^2)
Brooks & Corey	a 3.780277	공기 합입 저항값 3.63 kPa
	n 0.6188237	잔류체적 합수비 0.06 %
		결정계수(R^2) 0.9946837

표 5. 준설토의 회귀분석 결과

예측모델	경험 계수	분석 결과
Fredlund & Xing	a 20.23831 kPa	공기 합입 저항값 14.44 kPa
	n 3.457321	잔류체적 합수비 15.50 %
	m 0.3854137	결정계수(R^2) 0.999728
	hr 113.2461	
van Genuchten	a 0.03097618 (1/kPa)	공기 합입 저항값 10.95 kPa
	n 1.360989	잔류체적 합수비 4.85 %
	m 0.4712268	결정계수(R^2) 0.999748
van & Mualem	a 0.04172636 (1/kPa)	공기 합입 저항값 10.29 kPa
	n 1.492059	잔류체적 합수비 0.57 %
	m 0.9909415	결정계수(R^2)
van & Burdine	a 0.0608804 (1/kPa)	공기 합입 저항값 11.14 kPa
	n 2.414243	잔류체적 합수비 0.48 %
	m 0.9961394	결정계수(R^2)
Gardner	a 0.01322375 (1/kPa)	공기 합입 저항값 11.29 kPa
	n 0.9554688	잔류체적 합수비 0.86 %
	m 0.9787314	결정계수(R^2)
Brooks & Corey	a 8.541229	공기 합입 저항값 8.35 kPa
	n 0.2846181	잔류체적 합수비 9.79 %
		결정계수(R^2) 0.990924

표 6. 화강풍화토의 회귀분석 결과

예측모델	경험 계수	분석 결과
Fredlund & Xing	a 40.91631 kPa	공기 합입 저항값 13.74 kPa
	n 1.051779	잔류체적 합수비 10.20 %
	m 0.7263589	결정계수(R^2) 0.999989
	hr 1111.902	
van Genuchten	a 0.01432195 (1/kPa)	공기 합입 저항값 15.26 kPa
	n 0.9507448	잔류체적 합수비 1.40 %
	m 0.4546549	결정계수(R^2) 0.9978937
van & Mualem	a 0.02918294 (1/kPa)	공기 합입 저항값 15.10 kPa
	n 1.308854	잔류체적 합수비 0.00 %
	m 0.995791	결정계수(R^2)
van & Burdine	a 0.0441088 (1/kPa)	공기 합입 저항값 16.27 kPa
	n 2.268725	잔류체적 합수비 0.004 %
	m 0.9905529	결정계수(R^2)
Gardner	a 0.01070219 (1/kPa)	공기 합입 저항값 23.0 kPa
	n 0.8073546	잔류체적 합수비 0.38 %
	m 0.9931406	결정계수(R^2)
Brooks & Corey	a 15.59267	공기 합입 저항값 15.58 kPa
	n 0.2342949	잔류체적 합수비 0.00 %
		결정계수(R^2) 0.982946

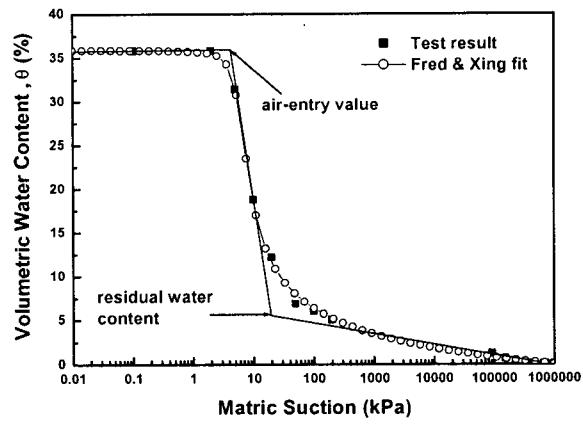


그림 5. Fredlund와 Xing의 최적곡선
(모래)

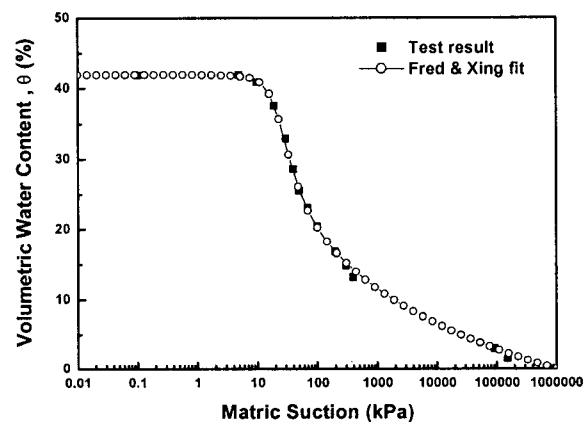


그림 6. Fredlund와 Xing의 최적곡선
(준설토)

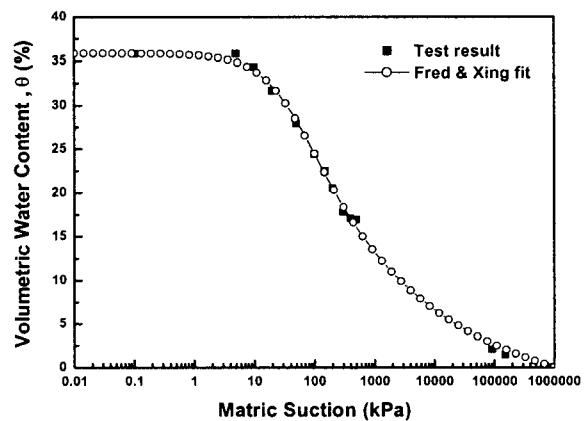


그림 7. Fredlund와 Xing의 최적곡선
(화강풍화토)

4.3 흙-수분 특성곡선의 예측모델

(1) Fredlund and Wilson(1997)

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

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

(2) Arya and Paris(1981)

$$\Psi_i = 2v \cos \theta / \rho_w g v_i \quad (8)$$

여기서, Ψ_i 는 메트릭 흡인력, v 는 물의 표면장력, θ 는 접촉각, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, r_i 는 간극반경을 나타낸다.

(3) Scheinost(1997)

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

$$\text{여기서, } a = a_o + a_1 \cdot d_g, \quad n = n_o + n_1 \cdot \sigma_g^{-1}, \quad \theta_s = s_1 \cdot F + s_2 \cdot clay_x, \\ \theta_r = r_1 \cdot clay_x + r_2 \cdot C_{org}, \quad m = (-1) \text{로 가정}$$

여기서, F 는 간극률, C_{org} 는 유기물 함유량, d_g 는 입도분포곡선에서 평균 입경, σ_g 는 입도분포곡선의 표준편차, $clay_x$ 는 점토 함유율이다.

(4) Vereecken(1989)

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

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), a , n , m 은 계수이다.

4.4 흙-수분 특성곡선의 예측결과

입도분포를 이용한 흙-수분 특성곡선 예측모델을 이용하여 모래에 대하여 예측한 결과는 표 7과 그림 8에 나타내었다. 실험결과는 모든 시료의 흙-수분 특성곡선을 나타내는데 높은 정확도를 갖는 Fredlund 와 Xing의 방정식으로 최적곡선을 나타내었으며, 분석결과, Fredlund와 Wilson의 예측모델은 결정계수

가 0.9188423으로 가장 높은 정확도를 나타내었다. 그러나 다른 세 가지의 방법은 0.8이하의 낮은 정확도를 나타내어 모래의 흙-수분 특성곡선을 예측하는데 부적절한 모델로 판단된다. Fredlund와 Wilson의 모델로 예측한 결과, 공기함입저항값은 1.57kPa로 나타났으며, 이 결과는 실험결과로부터 얻은 공기함입저항값, 2.81~4.05kPa의 값보다 작은 것으로 나타났다. 준설토에 대하여 예측한 결과는 표 8과 그림 9에 나타내었다. Arya와 Paris의 예측모델의 결정계수가 0.9562479로 가장 높은 정확도를 나타내었고, Fredlund와 Wilson의 예측모델도 결정계수가 0.9138993으로 높은 정확도를 나타내었다. 그러나 다른 두 가지의 방법은 0.8이하의 낮은 정확도를 나타내었다. 가장 높은 정확도를 나타낸 Arya와 Paris의 모델로 예측한 결과 공기함입저항값은 9.36kPa이고, Fredlund와 Wilson의 모델은 2.15kPa로 나타났다. Arya와 Paris의 모델로 예측한 공기함입저항값은 실험결과 나타난 8.35 ~ 14.44kPa의 범위의 값을 나타내었으나, Fredlund와 Wilson의 모델로 예측된 공기함입저항값, 2.15 kPa은 실험결과보다 상당히 작게 나타났다.

화강풍화토에 대하여 예측한 결과는 표 9와 그림 10에 나타내었다. Fredlund와 Wilson의 예측모델의 결정계수가 0.9690288으로 가장 높은 정확도를 나타내었고, Scheinost의 모델은 0.9067796, Vereecken의 모델은 0.859893로 어느 정도 만족할 만한 정확도를 나타내었다. 한편, Arya와 Paris의 모델은 결정계수가 -1.053359로 나타나 화강풍화토의 흙-수분 특성곡선을 예측하는데는 부적절한 방법으로 판단된다. Fredlund와 Wilson의 모델로 예측한 결과, 공기함입저항값은 4.84kPa로 나타났으며, Scheinost 모델의 결과는 6.70kPa, Vereecken 방법의 결과는 8.43kPa로 나타났다. 이 결과는 실험결과로부터 얻은 공기함입저항값, 13.74 ~ 23.0kPa의 값보다 상당히 작은 것으로 나타났다.

표 7. 입도분포를 이용한 모래에 대한 흙-수분 특성곡선 예측결과

예측 모델	예 측 결 과	
Fredlund & Wilson	공기함입저항값	1.57 kPa
	결정계수(R^2)	0.9188423
Arya & Paris	공기함입저항값	0.16 kPa
	결정계수(R^2)	0.3174613
Scheinost	공기함입저항값	4.45 kPa
	결정계수(R^2)	0.6896599
Vereecken	공기함입저항값	8.0 kPa
	결정계수(R^2)	0.7249264

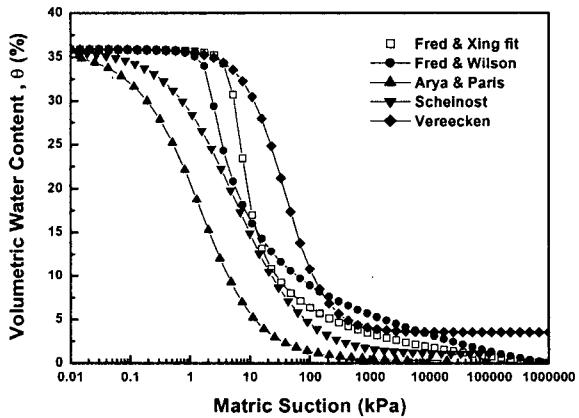


그림 8. 모래에 대한 예측결과

표 8. 입도분포를 이용한 준설토에 대한 흙-수분 특성곡선 예측결과

예측 모델	예 측 결 과	
Fredlund & Wilson	공기함입저항값	2.15 kPa
	결정계수(R^2)	0.9138993
Arya & Paris	공기함입저항값	9.36 kPa
	결정계수(R^2)	0.9562479
Scheinost	공기함입저항값	26.71 kPa
	결정계수(R^2)	0.3808126
Vereecken	공기함입저항값	8.78 kPa
	결정계수(R^2)	0.7883174

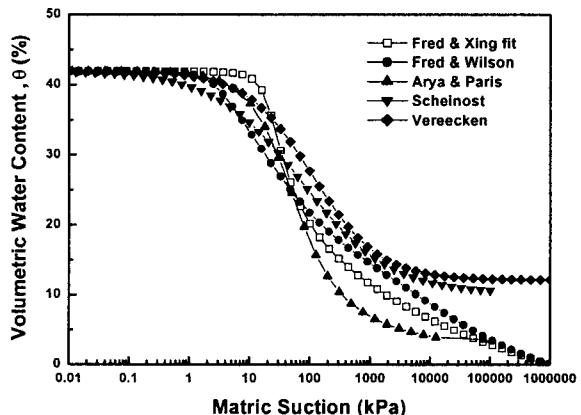


그림 9. 준설토에 대한 예측결과

표 9. 입도분포를 이용한 화강풍화토의 흙-수분 특성곡선 예측결과

예측 모델	예측 결과	
Fredlund & Wilson	공기함입저항값	4.84 kPa
	결정계수(R^2)	0.9690288
Arya & Paris	공기함입저항값	0.18 kPa
	결정계수(R^2)	-1.053359
Scheinost	공기함입저항값	6.70 kPa
	결정계수(R^2)	0.9067796
Vereecken	공기함입저항값	8.43 kPa
	결정계수(R^2)	0.859893

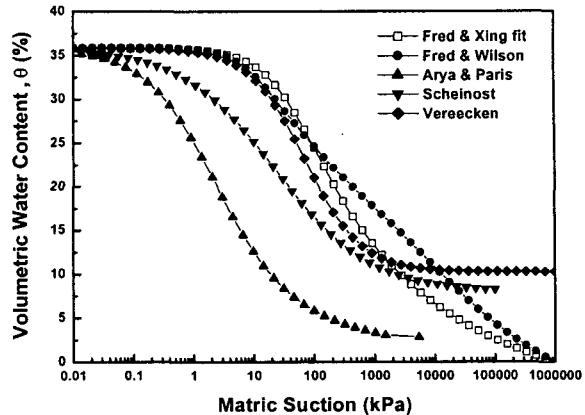


그림 10. 화강풍화토에 대한 예측결과

5. 결론

- 흙-수분 특성실험 결과를 가장 적합하게 나타내는 방법으로 모래와 화강풍화토는 Fredlund과 Xing의 경험방정식이며, 준설토의 경우는 van Genuchten의 경험방정식으로 나타났다. 또한, Fredlund과 Xing의 방정식은 세 가지 시료 모두에 대하여 높은 정확도로 실험 결과값을 나타내었다.
- 최적의 경험방정식으로부터 결정한 공기함입저항값은 모래와 화강풍화토의 경우 Fredlund과 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 나타났으며, Fredlund과 Xing의 경험방정식에 의해 도출된 공기함입저항값은 14.44kPa, 잔류체적함수비는 15.50%로 나타났다.
- 입도분포를 이용한 예측모델로 결정한 흙-수분 특성곡선과 실험결과를 비교한 결과, 모래와 화강풍화토에 대해서는 Fredlund과 Wilson의 예측모델이 가장 높은 정확도를 나타내었으며, 준설토의 경우는 Arya와 Paris의 예측모델이 가장 높은 정확도를 나타내었다. Fredlund과 Wilson의 예측모델은 모래, 준설토, 화강풍화토에 대하여 결정계수가 0.9이상의 높은 정확도로 예측하였으며, 실험결과로 결정된 공기함입저항값은 예측모델로 결정된 값보다 과대평가 되었다.

참고문헌

- 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.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Fredlund, D. G., Xing, A (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., 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.
- Scheinost, A.C., Sinowski, W., 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.