

불포화토의 함수특성 측정

Measurements of Soil-Water Characteristics
for Different Unsaturated Soils

김 상 규*¹

Kim, Sang-Kyu

류 지 협*²

Ryu, Chi-Hyob

송 진 규*³

Song, Jin-Kyu

Abstract

In order to treat flow problems for unsaturated soils, it is necessary to obtain the soil-water characteristic curves which show nonlinear relationship between matric suction and volumetric water content. With two different measuring devices, measurements of the matric suction were taken for Jumoonjin sand, Hangang sand, and weathered granite soils with different fines. Experimental parameters which can describe experimental formulas for the soil-water characteristics were determined by using the data obtained from the experiment.

Among experimental formulas of previous researchers, that of van Genuchten(1980) agreed well with the results of experiments. For weathered granite soils, the parameters increased with the increase of fine contents. Therefore, the soil-water characteristic for a weathered soil can be estimated by using parameters corresponding to its fine contents.

요 지

불포화토에 대한 흐름문제를 해석하기 위해서는 비선형으로 표시되는 부간극수압과 함수비 사이의 관계를 알아야 한다. 본 논문에서는 주문진 표준사, 한강모래 및 세립함유율이 다른 몇가지 화강풍화토에 대하여 2가지 실험기구로 이 관계를 측정하고 그 특성을 규명하였다. 여기서 얻은 자료를 이용하여 이 관계를 실험없이 추정가능한 경험식에 쓰이는 경험상수들을 얻었다.

몇가지 경험식중 van Genuchten(1980)의 것이 실험곡선과 잘 부합된다. 화강풍화토에 대해서는 세립함유율(No.200체 통과율)의 증가에 따라 경험상수들도 거의 일정하게 증가하는 경향을 보

*¹ 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 동국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*³ 정희원, 동국대학교 대학원 토목공학과 석사

인다는 것을 알게 되었다. 따라서 이 관계를 이용하여 화강풍화토에 대한 함수특성곡선의 추정이 가능하다.

Keywords : Matric suction, Weathered granite soil, Air-entry value

1. 서론

자연 지반은 지하수위의 위치에 따라 포화 영역과 불포화영역으로 나누인다. 불포화토의 간극에는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력과 물분자를 결합하는 표면력이 발생한다. 이들은 각각 모세관 현상과 흡착 현상의 원인이 되고 이 현상으로 말미암아 불포화영역에서 부의 간극수압이 발생되어 유효응력을 증가시킨다. 따라서 완전포화토에 사용되는 파괴기준과 흐름법칙을 불포화토에 적용하는 것은 불합리하다.

불포화토내 공기와 물의 흐름현상을 신뢰성 있게 해석하기 위해서는 수리특성(예: 투수계수 K , 확산계수 D)을 정량화 하는 것이 필요하다. 이러한 정수들을 실험을 통하여 결정하는데 있어서는 많은 시간과 비용이 든다. 따라서 불포화토에 대한 흐름 문제를 해석하기 위한 방법으로 부간극수압과 함수비사이의 관계로부터 투수계수를 추정할 수 있는 간접적인 접근방법이 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다.

본 논문에서는 불포화토의 함수특성을 측정하는 실험기구인 장력계(tensiometer)와 템페압력셀(tempe pressure cell)을 이용하여 우리나라의 대표적 토질인 표준사, 모래, 풍화토에 대한 함수특성곡선을 얻고 그 영향요인을 분석하였다. 이중 템페압력셀의 실험결과를 이용하여 함수특성을 모델링하는 Brooks와 Corey(1964), van Genuchten(1980) 및 Fredlund와 Xing(1994)의 경험식에 사용되는 계수(λ , α , n , m)를 결정하였다. 이 계수들은 불포화토의 투수계수와 강도정수를 추정하는데 이용된다.

2. 불포화토의 기본적인 성질

2.1 불포화토의 특성

2.1.1 함수포텐셜의 개념

물은 흙의 간극 속에서 물리 화학적 작용에 의하여 보유된다. 이와 같이 흙이 물을 보유하게 되는 것은 간극내 공기와 물의 접촉면에서 발생하는 모관력과 물분자를 흡착하는 흡입자의 표면력 때문이다(그림 1). 점토는 특히 표면력이 우세하다.

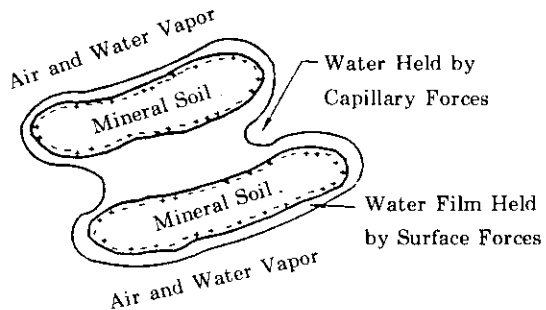


그림 1. 모관력과 표면력에 의해 흡입자에 보유되는 물 (Guymon, 1994)

불포화토를 다루는 토질역학에서는 이 모관력을 모관흡수력(matric suction)이라고 한다. 그런데 토양용액(soil solution)의 차이가 있으면 흡수력이 더 추가되는데 이것을 삼투흡수력(osmotic suction)이라고 한다. 따라서 흡수력은 모관흡수력과 토양용액의 삼투흡수력으로 나누인다.

이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o = (u_a - u_w) + \Psi_o \quad (2.1)$$

여기서,

Ψ_i = 전흡수력

Ψ_m = 모관흡수력

Ψ_s = 삼투흡수력

u_a = 간극공기압

u_w = 간극수압

모관흡수력은 간극공기압(u_a)과 간극수압(u_w)의 차($u_a - u_w$)로 나타낸다. 간극공기압이 대기압과 같다면 이것은 부간극수압이 된다. 모관흡수력은 전흡수력의 주요성분을 이루고 표면장력을 일으켜 모관현상을 발생시키는 대표적 성분이 된다. 상대습도가 낮아져서 간극수의 염분도가 증가하면 삼투성분이 증가하여 결과적으로 삼투흡수력이 증가하게 된다. 사막과 같은 건조지역 및 반건조지역에서 삼투력의 측정치가 크게 나타나는 것은 이로 기인한 것이다(Fredlund et al., 1988).

흙이 보유하는 물을 에너지로 표현할 수도 있다. 대기압보다 낮은 압력에서 토중수가 평형상태에 있거나 흙이 물을 받아들이기 위하여 발휘하는 힘을 간극수의 자유에너지 상태로 정의한다(Edlefsen and Anderson, 1943). 이 자유에너지는 흙속에 존재하는 물의 부분증기압(partial vapor pressure)으로 측정될 수 있다(Richards, 1965). 흡수력과 간극수의 부분증기압 사이의 열역학적 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi_i = -\frac{RT}{v_w w_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.2)$$

여기서,

Ψ_i = 전 흡수력 (kPa)

R = 기체 상수 (8.31432 J / (mol K))

T = 절대온도 ($T = (273.16 + t^\circ)$ (K))

v_w = 물의 비체적 ($1/\rho_w$ (m³/kg))

ρ_w = 물의 밀도 (998 kg / m³ (20°C))

w_v = 수증기의 분자량 (18.016 kg / kmol)

\bar{u}_v = 간극수의 부분증기압 (kPa)

\bar{u}_{v0} = 순수한 물의 포화증기압 (kPa)

2.1.2 불포화토의 함수특성과 이력현상

함수비와 모관흡수력과의 관계를 함수특성이라 한다(Childs, 1940). 그림 2는 대표적인 함수특성곡선을 보인다. 이 그림에서 포화시($\psi = 0$) 체적함수비($\theta = V_w / V$)는 간극비와 같고($\theta_s = n$), 포화된 간극은 흡수력의 증가에도 불구하고 간극이 비기 시작하는 일정한 한계 값이 초과될 때까지는 아무런 유출도 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 임계흡수력을 흙이 가지는 공기유입값(air-entry value, $u_a - u_w$)라 하고 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다.

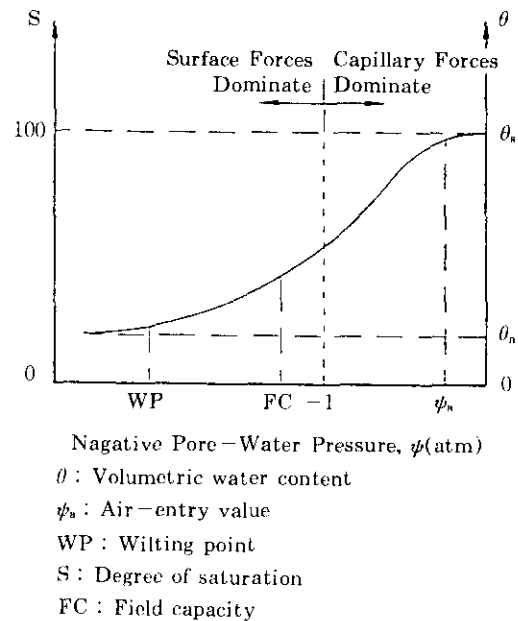


그림 2. 대표적인 함수특성곡선(Guymon, 1994)

흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류함수비(θ_r)라 한다. 이 함수비에서 잔류한 물은 열에 의해서만 제거될 수 있다. 그림 2에서 FC(field capacity)는 중력에 의해 배수되는 함수비에 대한 간극수압을 나타내고, WP(wilting point)는 증산작용으로 인해 식물이 물을 더이상 추출할 수 없는 함수비에 대한 간극수압으로 정

의된다. FC, WP는 각각 농업분야에서 곡물의 생산시 물의 공급량을 정하는 기준으로서 사용되어 왔다.

비교적 낮은 모관흡수력(0~1bar)에서 보유된 수분 함량은 주로 모세관 효과와 간극치수의 분포에 따라 좌우되므로 흙 구조의 영향이 크다. 반면에, 더 큰 흡수력 범위에서 보유된 수분은 흡착작용에 점차적으로 더 좌우되므로 흙의 비표면적과 흙의 성질에 큰 영향을 받는다.

습윤과정(wetting process)과 건조과정(drying process)을 거치는 동안 함수특성곡선의 같은 함수량에 대한 흡수력값은 다르게 나타난다. 이를 함수특성곡선의 이력현상(hysteresis)이라 한다(그림 3). 이력현상의 원인은 주로 잉크병효과 때문이라고 설명하고 있다(Guymon, 1994). 즉, 건조과정에서는 물이 배수되는데 더 작은 간극의 영향을 받으며 습윤과정에서 물의 흡수는 큰 간극의 영향을 받는다.

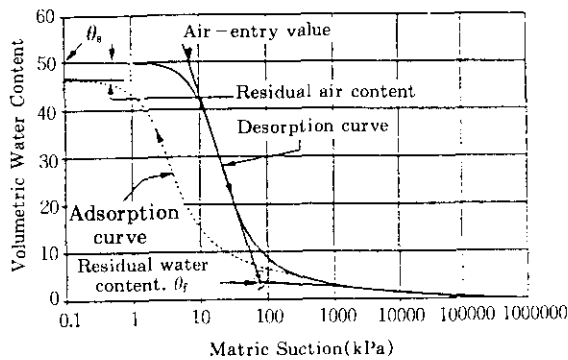


그림 3. 이력현상 곡선(Gorzalez and Adams, 1980)

2.1.3 불포화토내의 흐름

불포화토내의 물과 공기는 동일한 유체로 취급된다. 유체의 흐름은 포텐셜 기울기에 의해 발생하는 추진포텐셜(driving potential) 때문에 흐른다. 추진포텐셜은 수두의 개념으로 표시할 수 있으며 위치수두와 압력수두를 합친 전수두의 동수경사의 차에 의해 발생한다.

불포화토내 물의 흐름에는 Darcy의 법칙을 확장 적용한다(Buckingham, 1907; Richard, 1931; Childs and Collis-George, 1950). 그러나 불포화토의 투수계수는 일정하지 않고 함수비 및 모관흡수력과 함수관계를 가지는 변수이다. Childs(1969)는 불포화토내의 공기가 흡입자와 비슷한 거동을 한다고 가정하고 흙을 함수비가 줄어든 포화토로 취급하였다.

불포화토의 투수계수는 포화도와 체적함수비가 중요한 함수이다. 모관흡수력의 변화가 함수비와 포화도의 변화에 영향을 끼친다. 불포화토의 투수계수에 대한 많은 반경험적 공식은 흡수력과 포화도곡선이나 함수특성곡선을 사용하여 유도될 수 있다. 또한 흡입경의 분포도 불포화 투수계수를 예측하기 위해 사용된다(Mualem, 1976, 1978).

2.2 불포화토의 함수특성을 정하는 경험식

불포화 영역에서 유체의 흐름이나 오염물질 이동에 수치모델이 널리 사용되고 있다. 수치해석의 적용을 위해 불포화토의 구성모델에 필요한 계수의 결정이 요구된다. 따라서 연구자들은 불포화토의 공학적 특성이 흡수력에 영향을 받는 것에 착안하여 함수특성에서 구성모델에 사용하는 계수를 예측하는 방법에 많은 노력을 기울여왔다. 불포화토의 특성을 표현하는데 적합한 함수특성은 구성모델을 결정하는데 매우 중요하다.

2.2.1 불포화토의 함수특성 산정

함수특성을 표현하는 대표적인 경험식은 다음과 같다.

1) Brooks and Corey(1964)는 흙의 함수특성을 수식으로 묘사할 수 있는 경험식을 식(2.3)과 같이 제안하였다.

$$\Theta = S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left[\frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right]^2 \quad (2.3)$$

여기서,

Θ = 정규함수비

- λ =간극크기분포지수
- S_e =유효포화도
- S_r =잔류포화도
- S =각 측정점의 포화도
- $(u_a - u_w)_b$ =공기유입값
- $(u_a - u_w)$ =모관흡수력

여기서 유효포화도는 식(2.3)에 보인 바와 같이 잔류포화도를 기준하여 정의하고 정규화된 함수비(normalized water content, 이하 정규함수비라고 말할)라고도 말한다. 식(2.3)에서 계수, λ 와 공기유입값, $(u_a - u_w)_b$ 를 알면 모관흡수력과 정규함수비간의 관계곡선을 얻을 수 있다. 그런데 여기서 이 값들은 그림 4에 보인 바와 같이 실험값을 이용하여 그린 유효포화도와 모관흡수력의 관계(대수곡선)로부터 얻는다. 그 방법은 다음과 같다.

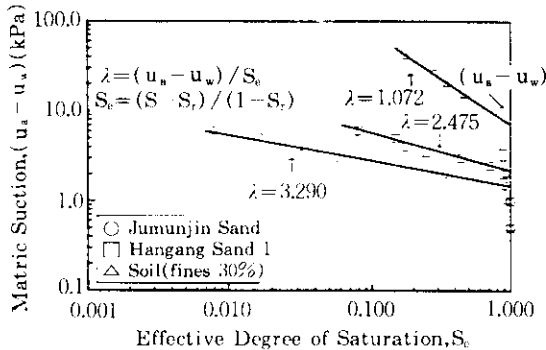


그림 4. 실험결과로부터 얻은 유효포화도와 모관흡수력의 관계곡선 (Fredlund and Rahardjo, 1993)

(1) 먼저 잔류포화도를 가정한다. 잔류포화도는 함수곡선에서 모관흡수력이 거의 일정하게 수렴되기 시작하는 함수비를 포화도로 변환한 것이다.

(2) 잔류포화도가 결정되면 유효포화도는 식(2.3)을 이용하여 흙의 임의 포화도에 대해 정해진다.

(3) 그러면, 유효포화도와 모관흡수력과의 관계를 대수눈금으로 나타낼 수 있다(그림 4

참조). 이 그림에서 모관흡수력이 증가하였을 때의 측정점들이 일직선상에 있는가 확인한다. 그렇지 않을 때에는 잔류포화도를 다시 가정해야 한다.

(4) 그림 4에서 이 직선이 유효포화도, S_e 가 1인 횡축과 만났을 때의 모관흡수력이 공기유입값가 되고 그 경사가 계수, λ 가 된다. 그림 4는 주문진표준사, 한강모래1, 화강토(세립함유율 30%)의 실험결과로부터 얻은 유효포화도와 모관흡수력의 관계곡선으로 공기유입값과 간극크기분포지수, λ 를 나타낸다.

2) Van Genuchten(1976)은 식(2.4)에 보인 새로운 경험식을 제안하여 실험값을 잘 묘사할 수 있음을 보였다.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a(u_a - u_w))^n} \right]^m \quad (2.4)$$

여기서,

Θ =정규함수비

$(u_a - u_w)$ =흡수력

a =공기유입값과 관계된 계수

n =변곡점의 경사에 관계된 계수

m =잔류함수비에 관계된 계수

이 식의 계수들은 다음과 같이 구할 수 있다.

(1) 실험값을 이용하여 그림 5에 보인 바와 같은 S 모양의 압력수두와 함수비간의 관계곡선을 얻는다. 여기서 압력수두는 모관흡수력을 수두로 나타낸 것이다.

(2) 이 그림에서 포화함수비와 잔류함수비가 명백하게 정해지므로 그 중간점 P를 쉽게 찍을 수 있다. 이 점에 대한 압력수두가 h_p 가 되고 그 기울기가 S_p 가 된다.

(3) 이들을 알면 다음식에 의해 m 을 결정할 수 있다.

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1)$$

$$= 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \quad (S_p > 1) \quad (2.5)$$

여기서, S_p 는 $(\theta_s + \theta_r)/2$ 의 점 P에서의 경사 h_p =점 P에서의 흡수력

(4) n 은 다음식에서 구한다.

$$n = \frac{1}{(1-m)} \quad (2.6)$$

여기서, n, m=계수

(5) a는 다음식에서 구할 수 있다.

$$a = \frac{1}{h_p} (2^{(1/m)} - 1)^{(1-m)} \quad (2.7)$$

여기서, a, m=계수

h_p 는 $(\theta_s + \theta_r)/2$ 의 점 P에서의 흡수력

이들 계수들을 모두 식(2.4)에 대입하면 정균함수비와 모관흡수력과의 관계곡선을 얻을 수 있다. 그림 5는 한강모래2의 실험결과로부터 계수를 결정하는 방법을 보여준다.

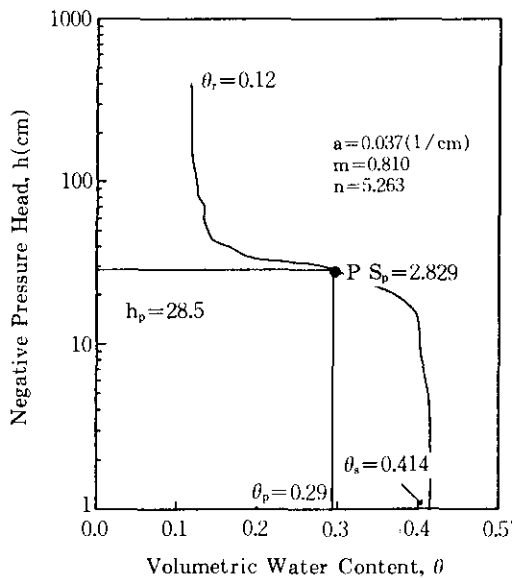


그림 5. 한강모래2의 실험결과에서 계수(a, m, n)의 결정 (van Genuchten, 1980)

3) Fredlund와 Xing(1994)는 0부터 1,000,000 kPa까지 이르는 넓은 범위의 흡수력의 함수특성을 묘사할 수 있는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\Theta = C(u_s - u_w) \left[\frac{1}{\ln(e + \frac{(u_s - u_w)^n}{a})} \right]^m \quad (2.8)$$

여기서,

a=공기유입값과 관계된 계수

n=변곡점의 경사에 관계된 계수

m=잔류함수비에 관계된 계수

e=자연수, 2.71828

$(u_s - u_w)$ =흡수력

$C(u_s - u_w)$ =보정함수

여기서 보정함수 $C(u_s - u_w)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$C(u_s - u_w) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{(u_s - u_w)}{(u_s - u_w)_r})}{\ln(1 + \frac{1,000,000}{(u_s - u_w)_r})} \right]$$

여기서,

$(u_s - u_w)_r$ =잔류함수비의 흡수력

$(u_s - u_w)$ =각 측정점의 모관흡수력

보정함수는 함수비의 감소에 따라 흡수력값이 커졌을 때의 함수특성곡선을 보정하기 위한 것이다. 체적함수비 θ 는 모관흡수력이 0일 때에는 포화함수비와 동일하나, 이것이 무한대가 되면 함수비는 0이 된다고 가정한다. 이때의 모관흡수력이 1,000,000kPa이라고 가정하여 위의 식이 유도되었다. 흡수력이 낮을수록 보정계수는 1에 가까워진다. 식(2.8)의 여러계수를 얻는 방법은 다음과 같다.

(1) 그림 6에 보인 바와 같은 실험곡선으로부터 변곡점을 정하고 이 변곡점에 대한 함수비, θ_i 와 모관흡수력, $(u_s - u_w)_i$ 를 결정한다.

(2) 여기서 계수 a는 다음과 같이 정한다.

$$a = (u_s - u_w)_i \quad (2.9)$$

여기서,

a=계수

$(u_s - u_w)_i$ =변곡점의 흡수력

3) m을 다음식으로 계산한다.

$$m = 3.67 \ln\left(\frac{\theta_i}{\theta_s}\right) \quad (2.10)$$

여기서,

m=계수

θ_s =포화체적함수비

θ_i =변곡점에서의 체적함수비

4) n을 다음식으로 계산한다.

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72S(u_a - u_w)_i \quad (2.11)$$

여기서,

n, m = 계수

θ_s = 포화체적함수비

$(u_a - u_w)_i$ = 변곡점에서의 흡수력

S = 변곡점에서의 경사

이와 같이 얻은 계수들을 식(2.8)에 대입하면 모관흡수력과 정규함수비간의 관계식을 얻을 수 있다. 그림 6은 한강모래2의 실험결과에서 위의 절차에 의한 계수의 결정과정을 보인다.

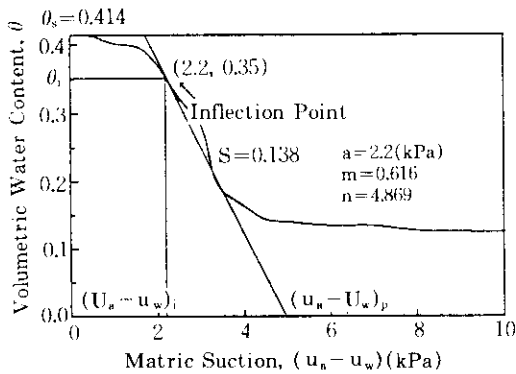


그림 6. 한강모래2의 실험결과에서 계수(a, m, n)의 결정(Fredlund and Xing, 1994)

위에서 결정한 계수들은 불포화토의 투수함수를 얻는데 사용된다. 이에 대해서는 다음 기회에 보고될 논문에서 언급될 것이다.

3. 실험

우리 나라 흙이 가지는 불포화토의 함수특성을 파악코자 주문진 표준사, 한강 하구에서 채취한 모래, 안성직업훈련원 부지 조성 현장에서 채취한 풍화토를 사용하여 실험을 수행하였다. 모래와 표준사는 No.4체를 통과한 입도가 균등하고 자갈 또는 세립이 거의 함유되지 않은 것으로 통일 분류법으로 SP로 분류된다. SM-SC로 분류되는 풍화토는 No.200체의 통

과중량백분율을 10%, 30%, 50%로 구분하여 시료를 조제하였다. 그림 7은 실험에 사용된 표준사, 모래, 풍화토의 입도분포곡선이다.

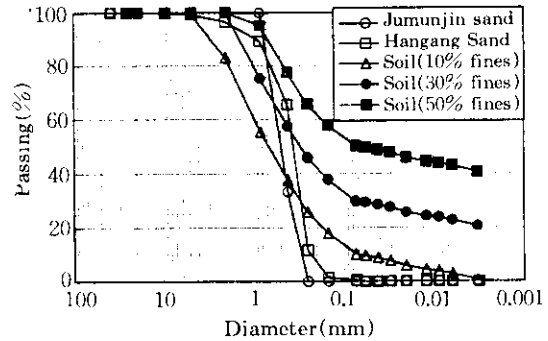
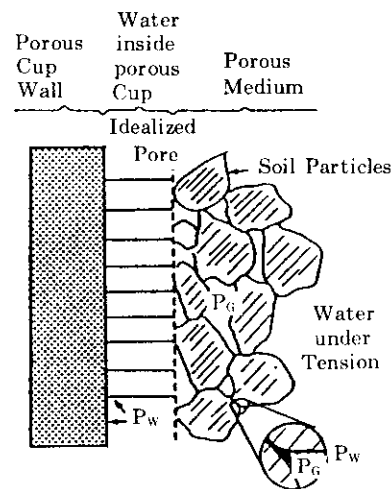


그림 7. 표준사, 모래, 풍화토의 입도분포곡선

3.1 실험기구

불포화토에 대한 함수특성을 장력계와 온도 압력셀로 측정하였다. 미국 Soil moisture사에서 제작된 장력계는 압력을 측정하는 기구와 튜브에 연결된 높은 공기저항 세라믹점으로 이루어져 있다. 흡과 측정기구 사이에 평형상태가 도달하면 장력계의 물은 흡에 존재하는 간



P_w : Absolute Pressure of Soil Water

P_g : Absolute Pressure of Soil Gas

그림 8. 장력계의 측정원리

극수와 같은 부간극수압을 가진다(그림 8).

장력계내 공동현상의 발생으로 인해 이 기구로 측정되는 부압은 약 90kPa가 한계이다. 공기압이 대기압일 때 측정되는 부간극수압은 수치적으로 모관흡수력값과 같다. 측정된 흡수력값은 세라믹컵의 공기유입값을 넘지 않아야 한다.

실험은 다음과 같이 수행하였다. 높이 10cm, 직경 10cm의 둥근 용기에 장력계를 세우고 흙을 채워 다짐 붐을 이용하여 0.13 kg-cm/cm³의 다짐 에너지로 3층으로 다진다. 시간과 함께 게이지에 나타나는 부간극수압값을 읽고 평형에 도달하면 실험을 마친다.

템페압력셀에 의한 흡수력의 측정원리는 다음과 같다. 흙이 들어있는 압력실(pressure chamber)에 대기압보다 높은 공기압을 가하여 간극수가 배수되면 배수된 물의 양은 가해진 공기압 즉, 흡수력에 대응한다. 흙은 흡수력값에 대응하는 함수비를 가지기 때문이다.

템페압력셀은 사용되는 다공판의 공기유입값에 따라 측정범위가 달라지는데 본 실험에서는 100kPa까지의 흡수력 값을 측정하였다. 다공판은 비교적 균일한 크기의 작은 간극을 가지고 그림 9와 같이 공기과 물 사이에 있는 수축면(air-water interface)의 계류역할을 한다. 다공판은 주로 kaolin을 원료로 제조된 세라믹 판이며 다공판이 물에 포화되면 공기의 흐름을

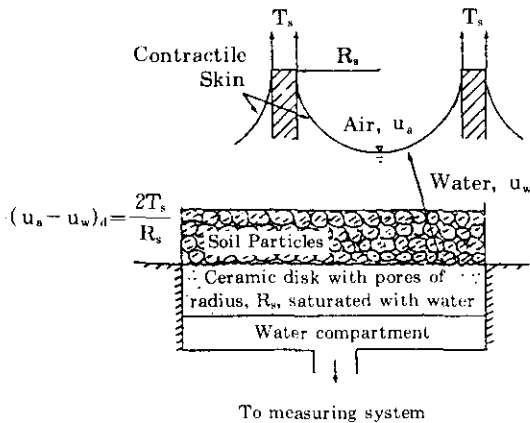


그림 9. 템페압력셀의 측정원리

방해하는 수축면의 힘에 의해 공기가 디스크를 통과할 수 없다. 장력계와 템페압력셀에 관한 측정방법은 문(1993)에 의해 자세히 언급되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 부간극수압의 반응시간

장력계의 반응에 대한 안정화 시간은 다공판의 투수성과 관내 기포의 존재에 영향을 많이 받는다. 평형상태의 함수비에 대한 반응시간은 그림 10과 11에 보인바와 같이 모래보다는 세립질의 양이 많은 풍화토 일수록 더욱 빠르다. 또한 함수비가 높거나 흡수력값이 낮을수록 반응시간은 빠르고 함수비가 낮거나 흡수력값이 높을수록 그만큼 지체되었다.

장력계를 설치한후 관내에 기포가 발생하였는데 기포가 발생하는 원인은 다음의 두 가지로 추정할 수 있다. 첫째는, 간극수압이 부의 값으로 감소하면서 물에 녹아있던 공기가 발생하기 시작한다. 즉 부간극수압으로 인해 압력이 저하되어 기포가 생겨 기체로 가득한 공동이 발생한다. 둘째는 흙에 있는 공기가 세라믹 컵내의 물을 통하여 확산이 발생한다.

부간극수압을 정확히 측정하기 위해서는 다공판은 높은 공기함입저항치를 가져야 한다.

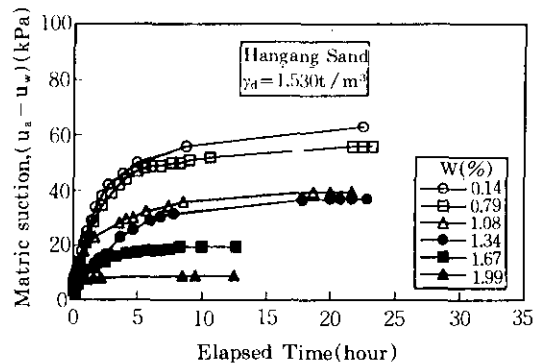


그림 10. 장력계를 이용한 함수비의 변화에 따른 모래의 반응시간

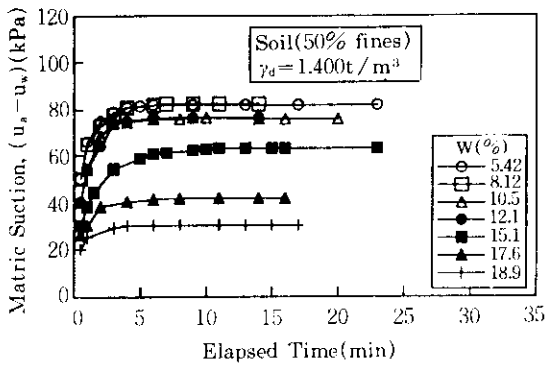


그림 11. 장력계에 대한 평형상태의 풍화토 흡수력값 결정

즉, 공기압보다 공기함입저항치가 낮을 경우 다공판내로 공기가 유입하여 측정이 불가능하게 된다. 반면, 높은 공기함입저항치를 가진 다공판은 부간극수압의 측정시간을 지체시켜 측정값의 오차를 가져온다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 종류의 흙에 대한 적절한 공기유입값을 가진 다공판의 사용을 시도하여야 하는데, 본 템페압력셀의 다공판은 1 bar의 공기유입값을 갖는다.

템페압력셀은 가해진 공기압에 의해 시료로부터 간극수가 배수되어 함수비가 평형상태가 되는 원리를 이용한 것이다. 평형에 도달하기 위한 시간은 시료의 두께와 투수성, 공기저항 다공판의 투수성에 달려있다. 그림 12는 템페압력셀의 공기압 증, 모관흡수력을 증가시키면

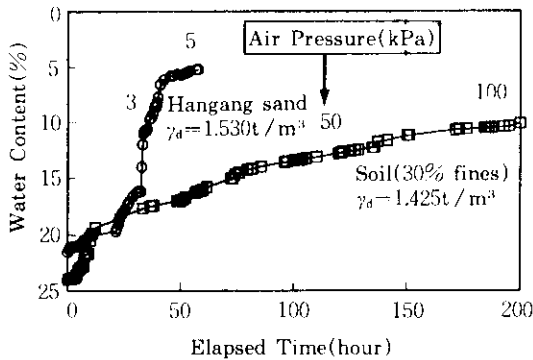


그림 12. 모래와 풍화토의 템페압력셀 반응시간

서 경과시간에 따른 함수비의 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과를 보면 각각의 흡수력에 대응하는 평형함수비에 도달하기 위한 경과시간이 흙의 종류에 따라 일정하지 않다는 것을 알 수 있다. 세립질이 풍부한 흙일수록 흡수력이 100kPa까지의 평형함수비에 도달하는데 많은 시간을 필요로 한다.

4.2 함수특성과 이력현상

불포화영역에서는 모세관현상과 흡착현상으로 인하여 함수비와 모관흡수력 사이의 관계는 비선형적인 변화를 보인다는 것은 이미 언급되었다.

그림 13, 14는 주문진표준사, 한강모래와 No.200체 통과율에 따라 구분한 풍화토의 함수특성을 장력계와 템페압력셀로 측정된 실험

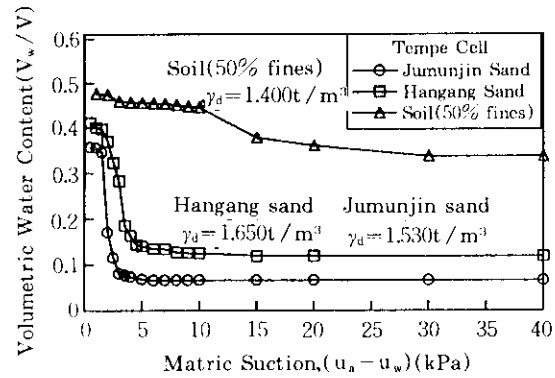


그림 13. 템페압력셀을 사용한 함수특성 측정

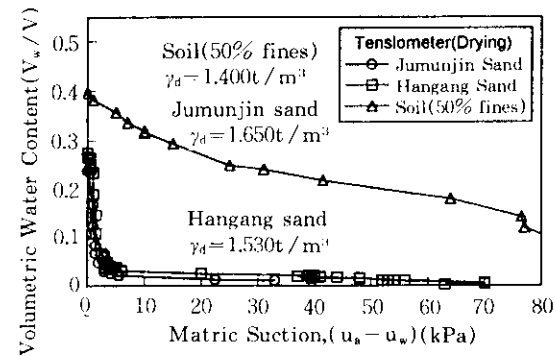


그림 14. 장력계를 사용한 함수특성 측정

결과를 보여준다. 모래와 표준사는 흡수력 값이 비교적 낮다. 따라서 함수특성은 주로 모세관 효과와 간극치수의 분포에 따라 좌우되므로 흙구조의 영향을 크게 받는다.

표준사는 아주 균등한 입경을 가지므로 한강 모래보다 더 급한 경사를 보인다. 풍화토는 No.200체 통과율에 따라 10%, 30%, 50%의 세립함유율을 갖는 시료로 구분하여 실험하였다. 이 실험결과에서 두드러진 특징은 세립분이 많을수록 함수특성곡선이 완만하게 변화하고 높은 흡수력에서도 많은 수분을 가지고 있다는 것이다.

템페압력셀은 건조과정만을 측정하나 장력계로는 건조과정과 습윤과정을 동시에 측정하여 이력현상을 관찰할 수 있다. 그림 15는 주문진표준사와 한강모래의 이력현상을 보인다. 표준사와 모래를 비교해보면 입도분포가 양호한 모래가 간극이 더 커서 포화함수량도 증가한다. 포화함수량이 큰 흙일수록 모관흡수력이 전체적으로 증가하고 이력현상의 효과도 약간 더 크게 나타남을 알 수 있다. 본 실험은 함수비 변화에 따른 재혼합된 시료를 사용하였으므로 모세관 현상이 뚜렷한 모래에서는 이력현상을 보였으나 풍화토에서는 건조밀도, 대기온도에 의한 증발, 포화도의 영향으로 뚜렷한 이력현상을 보이지 않았다.

4.3 함수특성의 영향요인

흙의 함수특성은 흙의 구조(간극의 크기, 형

태, 분포), 건조밀도, 포화도 및 체적함수비에 크게 영향을 받는다. 표 1을 보면 모래와 풍화토가 각각 체적함수비가 높을수록 건조밀도는 낮아지고 간극비는 높아지는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 그림 10, 11에서 풍화토의 반응시간이 빠른 반면 모래의 반응시간은 더 오랜시간을 보이며 안정화되었다. 즉, 불포화토 내의 물의 흐름은 사질토보다는 세립토에서 더 빠르게 일어난다(Hillel, 1980). 따라서 굵은 흙입자 보다는 세립질의 작은 흙입자에서 온도의 영향 등에 의해 더 물의 흐름이 빠르게 일어나는 것으로 생각된다.

Hillel(1980)에 의하면 흙이 가지는 온도는 물의 흐름에 큰 영향을 미치나 평형상태에 보유되는 물의 양에 대해서는 영향이 적다고 하였다. 온도가 증가하면 표면장력이 감소하여 흙에 보유되는 물은 감소하나 표면력에 의해 보유되는 물은 온도와 함께 증가한다. 따라서

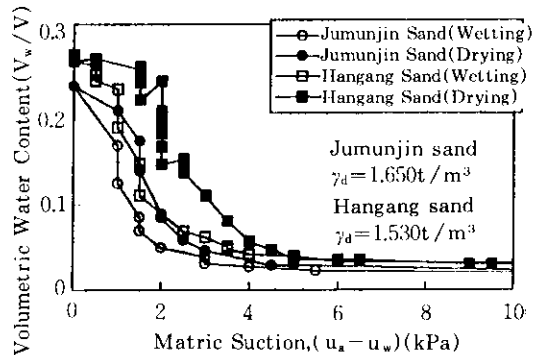


그림 15. 표준사와 한강모래2의 이력현상

표 1. 템페압력셀을 이용하여 실험한 시료의 물리적 특성

사용시료	건조밀도, $\gamma_d(t/m^3)$	간극비, e	포화도, S(%)	체적함수비, θ_s	함수비, w(%)	비중, G_s
표준사	1.650	0.597	96.0	0.360	21.81	2.63
한강모래 1	1.629	0.621	99.7	0.382	23.45	2.64
한강모래 2	1.530	0.720	98.5	0.414	27.07	2.64
풍화토 10%	1.614	0.667	99.9	0.400	24.77	2.69
풍화토 30%	1.425	0.888	98.1	0.461	32.37	2.59
풍화토 50%	1.400	0.921	99.4	0.477	34.08	2.59

흡수의 물 보유는 표면장력과 표면력 모두에 의해 영향을 받으므로 온도의 효과는 상쇄된다.

4.4 불포화토의 함수특성 산정을 위한 계수 결정

실험에서 얻은 부간극수압 측정치와 2.2절에서 기술한 식을 사용하여 Brooks와 Corey (1964), van Genuchten(1976), Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 경험식의 계수들을 결정할 수 있다. 이 계수들을 알면 실험을 하지 않아도 흙의 종류에 따른 함수특성 곡선을 추정할 수 있다. 또한 이 계수들을 이용하여 얻은 경험식과 실험곡선을 비교함으로써 경험식의 적합성도 판별할 수 있다. 그림 16은 실험으로부터 구한 시료의 포화도와 모관흡수력의 관계를 나타낸다.

표 2는 실험으로 얻은 그림 16의 모관흡수력과 포화도곡선으로부터 적합한 잔류포화도를 추정하여 얻은 모관흡수력과 유효포화도 관계 곡선에서 구한 Brooks와 Corey의 계수를 나타낸다. 그림 4는 모관흡수력과 유효포화도의 관계에서 계수를 결정하는 방법을 보여준다. 표 2를 보면 넓은 범위의 간극을 갖는 흙의 λ 는 작고 간극의 크기가 균등하면 할수록 λ 값은 더 커짐을 보인다. 또한 입도가 균등한 모래는 잔류포화도가 작으나 세립질이 풍부한 흙일수록 높은 잔류포화도 값을 보인다는 것을 나타낸다.

표 2. 실험결과로부터 얻은 Brooks와 Corey의 계수

사용시료	S_r (%)	λ	$(u_a - u_w)_b$ (kPa)
표준사	17	3.290	1.4
한강모래 1	20	2.475	2.2
한강모래 2	29	3.271	2.2
풍화토 10%	60	0.445	2.2
풍화토 30%	53	1.072	7.5
풍화토 50%	69	2.145	9.0

S_r : 잔류포화도, λ : 간극크기분포지수

$(u_a - u_w)_b$: 공기함입저항치

다. 간극크기분포지수, λ 는 유효포화도와 모관흡수력의 기울기로 정의되며 이 값을 사용하여 추정된 곡선은 낮은 흡수력에서 실험값을 잘 묘사하지 못했으나 흡수력이 증가함에 따라 잘 일치하였다.

표 3은 van Genuchten(1980)의 경험식에 사용되는 계수를 실험결과에서 얻은 것이다. 그림 5는 한강모래2의 실험결과를 사용하여 계수를 결정하는 방법을 보인다. 계수 m , n 은 모래와 풍화토 각각에서 흡입도분포가 균등할수록 큰 값을 보였고 a 는 세립질의 함유량이 많을수록 작은 값을 갖는 경향을 보였다. van Genuchten의 추정식과 실험결과는 비교적 일치하는 경향을 보였다.

표 3. 실험결과로부터 얻은 van Genuchten의 계수

사용시료	S_p	h_p (cm)	계수		
			a	m	n
표준사	3.783	20.0	0.052	0.855	6.897
한강모래 1	2.510	29.0	0.037	0.788	4.717
한강모래 2	2.829	28.5	0.307	0.810	5.263
풍화토 10%	0.550	90.0	0.032	0.356	1.553
풍화토 30%	1.109	150	0.009	0.581	2.387
풍화토 50%	1.639	120	0.009	0.692	3.247

S_p : P점의 기울기, h_p : P점의 모관흡수력

표 4는 Fredlund와 Xing(1994)의 경험식에 사용되는 계수(a , m , n)를 보인다. 그림 6에서 한강모래2의 실험결과를 사용하여 계수를 결정하는 방법을 나타낸다. 계수 a , m , n 은 풍화토에서 건조밀도가 작아질수록 큰 값을 보였으나 모래는 반대의 경향을 나타냈다. 계수 m , n 은 van Genuchten의 계수 m , n 과 같은 경향을 보인다(그림 19).

실험결과로부터 추정식에 사용되는 계수들을 흙의 종류에 따라 얻었다. 그림 17, 18에서 모래와 풍화토에 대한 템페압력셀의 실험결과와 Brooks와 Corey, van Genuchten 및 Fredlund와 Xing의 경험식으로 산정한 함수특성을 비교하였다. 제안한 세 경험식은 실험

표 4. 실험결과로부터 얻은 Fredlund와 Xing의 계수

구분	θ_i	$(u_a - u_w)_i$ (cm)	S	계수		
				a	m	n
표준사	0.270	1.8	0.250	1.8	1.056	5.087
한강모래 1	0.320	2.5	0.147	2.5	0.650	5.137
한강모래 2	0.350	2.2	0.138	2.2	0.616	4.869
풍화토 10%	0.370	6.0	0.011	6.0	0.341	1.504
풍화토 30%	0.420	10.0	0.010	10.0	0.467	2.645
풍화토 50%	0.415	14.0	0.008	14.0	0.601	3.071

θ_i : 함수특성곡선에서 변곡점의 체적함수비(V_w/V)
 $(u_a - u_w)_i$: 변곡점의 모관흡수력,
 S: 변곡점의 기울기

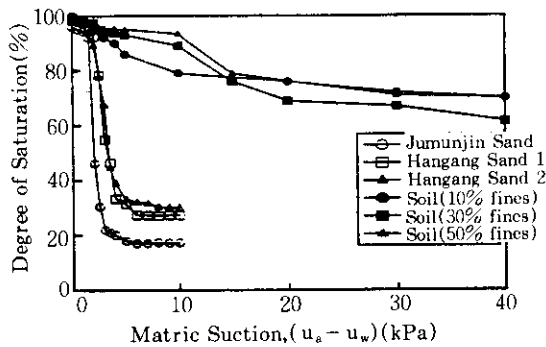


그림 16. 사용시료의 포화도와 모관흡수력의 관계곡선

결과를 비교적 잘 묘사하였으나, 입도가 비교적 균등한 모래보다는 풍화토에서 곡선사이에 약간의 차이를 보였다. 그러나 이 결과로부터 추정식으로 함수특성을 신뢰성 있게 산정할 수 있음을 알 수 있다. 충분한 실험결과로부터 No.200 통과백분율과 이에 따른 추정식에 사용되는 계수의 범위가 정하여 진다면 No.200 통과백분율만으로 추정식에 사용되는 계수를 결정할 수 있어 실험에 의하지 않고도 쉽게 함수특성을 추정할 수 있을 것이다. 또한 추정한 함수특성을 사용하여 불포화토의 침투 및 강도특성까지도 해석이 가능하다(Fredlund et al., 1995). 그림 19는 풍화토의 추정식에 사용되는 계수와 No.200 통과백분율과의 관계를 보인다. 계수와 No.200체 통과율을 안다면 경험식에 이용되는 계수를 결정할 수 있다.

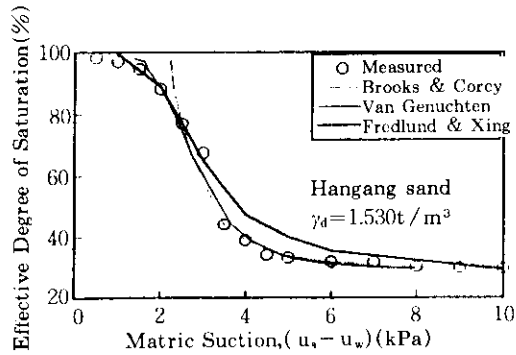


그림 17. 한강모래에 대해 실험결과와 추정식으로 산정한 값의 비교

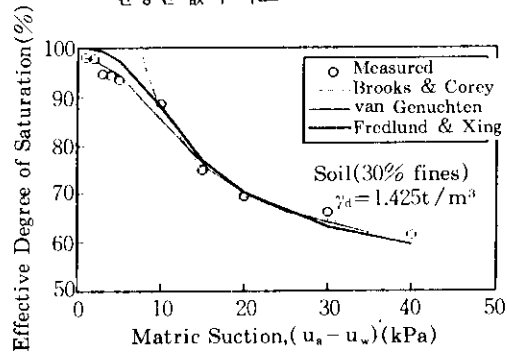


그림 18. 풍화토에 대해 실험결과와 추정식으로 산정한 값의 비교

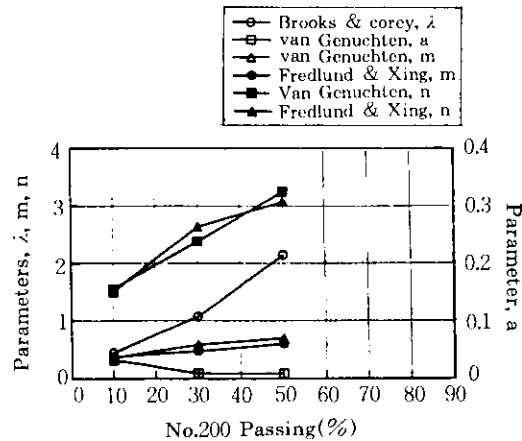


그림 19. No.200 통과백분율과 경험상수의 관계

5. 결론

불포화토의 함수특성을 구하기 위하여 몇가지 흙에 대해 함수비에 따른 부간극수압의 변

화를 측정하였다. 이 측정에 있어서는 장력계와 템페압력셀이 이용되었다. 실험결과를 이용하여 다른 연구자들이 제안한 함수특성 추정식의 경험상수를 결정하고 이로부터 얻은 곡선과 실험곡선과의 일치성을 비교하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 장력계는 관내 공동화 현상 때문에 측정치의 한계(약 70kPa)가 있었다. 모래보다는 세립질이 풍부한 흙일수록, 함수비가 높거나 흡수력값이 낮을수록 안정화에 이르는 반응시간은 빨랐다. 템페압력셀에 의한 측정은 100kPa 까지 가능하였다. 이의 반응시간은 시료의 두께와 투수성, 다공관의 투수성에 영향을 받으며 세립질이 많은 흙일수록 안정화되는데 많은 시간이 소요되었다.
2. 함수비와 모관흡수력 사이의 관계는 비선형적인 변화를 보이며 세립분이 많을수록 곡선은 완만하게 변화하였다. 모세관현상이 뚜렷한 표준사와 모래에서 이력현상을 볼 수 있었다. 또한 함수특성은 건조밀도, 체적함수비가 상호영향을 미침을 확인할 수 있었다.
3. 템페압력셀의 실험결과로 부터 Brooks와 Corey, van Genuchten 및 Fredlund와 Xing의 경험식에 사용되는 경험상수(λ , a , n , m)를 얻었다. 풍화토에 대해서는 No.200 통과중량백분율의 증가에 따라 이 상수들도 대략 선형적으로 증가 하였다. No.200 통과백분율을 알면 함수특성을 추정할 수 있고 더 나아가 투수특성을 추정할 수 있게 된다.

참 고 문 헌

1. 분준배(1993), 비포화흐름 해석을 위한 부간극수압측정용 팁 개발과 활용방안에 관한연구, 석사학위논문, 동국대학교.
2. Brook, R.H. and Corey, A.T.(1964), "Hydraulic Properties of Porous Media", *Hydrology papers*, Colorado state university,

Fort collins, Colorado.

3. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve", *Can. Geotech. J.*, Vol.31, pp.533-546.
4. Fredlund, D.G. and Xing, A.(1994), "Equations for the Soil-water Characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, Vol.31, pp.521-532.
5. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.,(1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, pp.64-117.
6. Gardner, W.R.(1958), "Some Steady State Solution of the Unsaturated Flow Equation with Application to Evaporation a Water Table", *Soil Sci.*, Vol.85, pp.228-232.
7. Jacob Bear(1979), *Hydraulics of Groundwater*, Mcgraw-Hill Inc., Israel, pp.190-206.
8. Krahn, J. and Fredlund, D.G.(1972), "On Total, Matric and Osmotic Suction", *Soil Sci.*, Vol.114, No.5, pp.339-348.
9. Marshall, T.J.(1958), "A Relation between Permeability of Size Distribution of Pores", *Soil Sci.*, Vol. 9, pp.1-8.
10. Mualem, Y.(1978), "Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous media : Generalized Macroscopic Approach", *Water Reso. Res.*, Vol.14, No.2, pp.325-334.
11. Mualem, Y.(1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Reso. Res.*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
12. Mualem, Y.(1984), "A Modified Dependent-domain Theory of Hysteresis", *Soil Sci.*, Vol.137, No.5, pp.283-291.
13. Rogowski, A.S.(1971), "Watershed Physics : Model of the Soil Moisture Characteristic", *Water Reso. Res.*, Vol.7, No.6, pp. 1575-1582.
14. Topp, G.C.(1971), "Soil Water Hysteresis in Silt Loam and Clay Loam Soils", *Water Reso. Res.*, Vol.7, No.4, pp.914-920.

(접수일자 1996. 7. 22)