



시험도로 노상토의 불포화 함수특성 및 이력현상

Soil-Water Characteristics and Hysteretic Behaviors on Unsaturated Pavement Subgrades in Test Roads

박 성 완* 신 길 호** 김 병 수***
 Park, Seong Wan Shin, Gil Ho Kim, Byeong Soo

Abstract

Hysteresis is a common feature exhibited in hydraulic properties of an unsaturated soil. This study focuses on hysteresis observed in a compacted weathered granite subgrade soils based on the pressure plate laboratory tests. It was found that the Soil-Water Characteristics Curve of a soil is hysteretic and unique. The results also show that the wetting and drying curves predicted using the Fredlund and Xing model is quite close to the laboratory-measured results. For a specific matric suction, water content or coefficient of permeability on a wetting curve is always lower than those found on a drying curve.

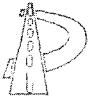
Keywords : soil-water characteristic curve, weathered granite subgrade soils, hysteresis, coefficient of permeability, test roads

요 지

일반적으로 도로의 하부인 노상층은 불포화토 상태로 존재하기 때문에 함수비의 변동을 예측하기 위해서는 불포화 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)의 추정은 필수적이다. 따라서, 국내 대표적인 노상토인 다짐된 화강 풍화계열 노상토를 대상으로 함수특성을 정량화하기 위하여 pressure plate 장치를 활용하여 건조 및 습윤 이력과정의 실험을 각각 수행한 후 이를 토대로 불포화토 함수특성에 대한 해석을 수행하였다. 실험결과, 화강 풍화 노상토의 함수비를 좌우하는 흡수력이 건조와 습윤 과정에 있어 서로 다른 수치를 나타내었고 흡수력에 따른 불포화 투수계수와 습윤 용적 그리고 확산 등의 흐름특성을 통하여 이력(hysteresis)을 확인하였다. 이를 토대로 도로하부의 연중흡수력을 추정하였다.

핵심용어 : 함수특성곡선, 화강 풍화 노상토, 이력현상, 투수계수, 시험도로

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사
 ** 단국대학교 토목환경공학과 석사과정
 *** 단국대학교 토목환경공학과 석사과정



1. 서론

기존 지반에 대한 공학적인 해석은 완전한 포화 상태의 조건을 가정한 후 이를 기준으로 지반정수를 산출하여 사용하고 있다. 그러나, 이러한 해석은 그 안전성에 있어서 충분히 검증되어 왔지만, 자연 상태의 흙에 대한 보다 더 구체적이고 다양한 상황을 표현하기 위한 해석에는 한계를 보이고 있다. 즉, 기존 토질역학적인 관점에서 완전한 건조토나 포화토의 조건과 같은 이분법적인 해석은 적용성에 있어서 비효율적이라 할 수 있다. 대부분 도로하부 노상의 지반은 불포화 상태이기 때문에 이를 반영한 해석이 필요하다. 또한 흙은 시간 및 외부적인 요인에 따라 끊임없이 상태변화를 이루면서 에너지의 평형을 유지하고 있기 때문에 흡수력에 따른 함수비의 변화를 알기 위한 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)과 같은 불포화 지반정수를 획득하기 위한 실험은 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 다져진 화강 풍화계열의 노상토에 대하여 불포화 지반 정수를 구하기 위한 흡수력 실험을 수행하여 건조 및 습윤 과정에 따른 함수특성을 정량화 하였다.

2. 불포화 지반 정수

2.1 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)

불포화 상태에서 흙에 대한 특성을 판단하기 위한 기본요소는 흡수력(suction)으로서 일반적으로 함수특성곡선은 흙의 흡수력과 함수비와의 관계로 나타낸다. 자연 상태에서 최대 흡수력의 범위는 보통 0~10⁶ kPa까지 나타낼 수 있지만 실험을 통하여 구할 수 있는 흡수력의 범위는 대략 0~1500kPa까지 가능하고 10⁴~10⁶ kPa의 영역은 다른 형태의 흡수력인 삼투 흡수력(osmotic suction)으로 표현되거나 실제 활용 가능한 유효 흡수력의 범위는 보통 0~1000kPa이다. 여러 선행연구결과 함수특성곡선

의 특징은 시료 또는 함유되어 있는 함수비에 따라 다른 모습을 보이고 있다(Vanapalli et al, 1999).

자갈과 모래 같은 비교적 큰 공극을 가지고 있는 시료는 흡수력이 증가함에 따라 함수비의 변화가 급격해진다. 또한 미세하고 균등한 입자들의 함유여부에 따라서도 흡수력의 변화에 영향을 미친다. 반면에 점토와 실트 섞인 세립질의 시료는 흡수력이 증가함에 따라 비교적 작은 함수비의 변화를 보이는데 이는 공극을 채우고 있는 간극수와 흙 입자와의 결합이 단순 조합이 아닌 화학적이고 전기적인 이온상태의 강한 결합에 의한 것으로 추정된다.

그림 1과 같이 시료 또는 성분비에 따라 다양한 형태에 대한 곡선의 유형을 보이므로 흙의 모관흡수력의 변화에 따른 함수비에 대한 시료별 특징을 수치적으로 정량화하기 위한 노력이 진행 중이다. 이러한 함수특성곡선의 유형 변화에 대하여 다양한 형태의 방정식이 제안되었는데, 표 1은 본 연구에 적용된 대표적인 제안식을 나타낸 것이다. BC(Brooks & Corey, 1964) 모델의 경우 변수 λ 값에 의해 일차원적인 거동특성을 보이는 반면 VG(Van Genuchten, 1980) 모델은 a 와 n 의 2개의 계수에 의해 곡선의 변화를 보이는데 이때 m 은 n 에 종속된 값이다. 또한, FX(Fredlund & Xing, 1994) 모델은 a , n , m 인 3개의 계수에 의한 비선형 곡선의 모양이 결정된다.

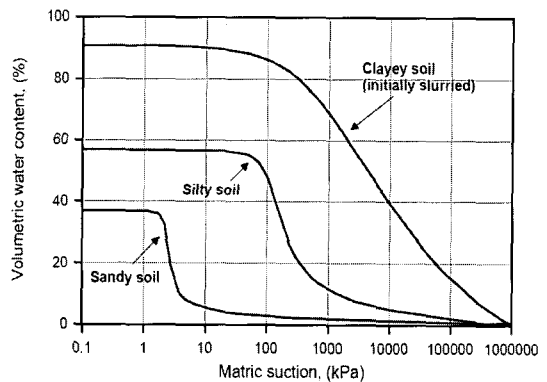


그림 1. 흙 종류별 함수특성곡선의 유형 (Fredlund and Xing, 1994)



표 1. 함수특성곡선에 대한 제안 식

Model	Formula
Brooks and Corey (BC) (1964)	$\Theta = S_e = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\eta & \psi > \psi_b, \eta = 2 + 3\lambda \end{cases}$
Van Genuchten (VG) (1980)	$\Theta = S_e = \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m$ $m = 1 - \frac{1}{n} \text{ or } m = 1 - \frac{1}{2n}$
Fredlund and Xing (FX) (1994)	$S = \frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m}$

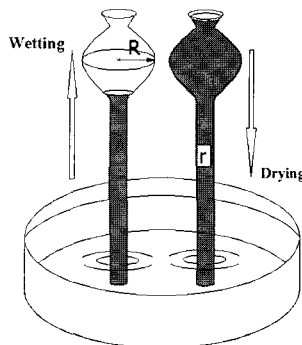


그림 2. 잉크병 효과

2.2 이력(hysteresis)

하나의 물리적인 현상으로 표현될 수 있는 이력(hysteresis)은 흙의 거동에 있어서도 예외가 아니다. 그 대표적인 예가 함수특성곡선 상에서 보이는 건조과정(drying process)과 습윤과정(wetting process)에 대한 경로가 서로 다르게 나타나는 것이다. 흙의 이력현상을 고려함으로써 불포화도에 관한 흐름 또는 변형 등의 공학적인 특성을 이해하는 기초가 될 수 있다. 흙의 이력에 대한 광범위한 원인에 대해서 정확히 알려지진 않았지만 많은 이들의 이론적이고 실험적인 방법을 통해서 관찰되어 왔다.

이력(hysteresis)의 대표적인 두 원인으로 잉크병 효과와 접촉각의 변화를 들 수 있다. 그림 2의 잉크병 효과는 물의 배수에 대한 건조과정에서는 작은 간극이 영향을 미치지만 이와는 대조적으로 습윤과정의 흡수에 있어서는 큰 간극의 영향이 절대적이기 때문에 물이 들어가고 나가는 물리적인 과정이 전혀 다른 모습으로 나타나게 된다. 그림 3에서의 기체와 액체의 접촉면을 기준으로 한 접촉각의 변화 또한 이력현상에 있어서 중요한 요인이다. 모관 상승과 수직 침투에 대한 모래의 실험적 연구에 의하면 습윤 접촉각은 약 60°~80°의 범위로 나타나며(Letey et al, 1962 ; Kumar et al, 1990) 건조 접촉각은 0°~20° 내지 30°의 범위로 습윤 접촉각에 비해 작은 것을 확인하였다(Laroussi et al, 1979).

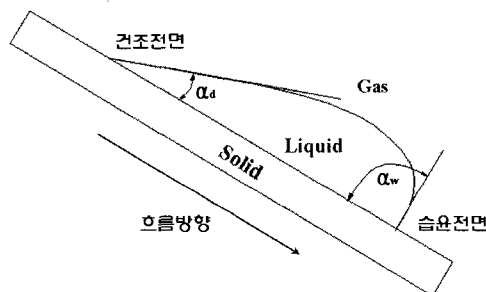


그림 3. 접촉각의 변화

3. 실험 및 방법

본 연구에 사용된 시료는 중부내륙고속도로 시험도로구간에서 채취한 노상토로 교란상태로 채취하였다. 시료의 특성은 아래의 표 2와 그림 4와 같으며 통일분류법(USCS)에 의한 SW계열의 흙으로 판단되었다.

표 2. 시료의 입도 분포 판정

D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _g	W/P
0.16	0.95	2.6	16.3	2.2	W
G/S/M/C등의 함유율(%)					
자갈(G)4.75	모래(0.075<S(4.75)		실트질이하(<0.075)		통일분류
15.06	Coarse(0.475~4.75)	Fine(0.075~0.425)	4.29		SW
	67.69	14.42			

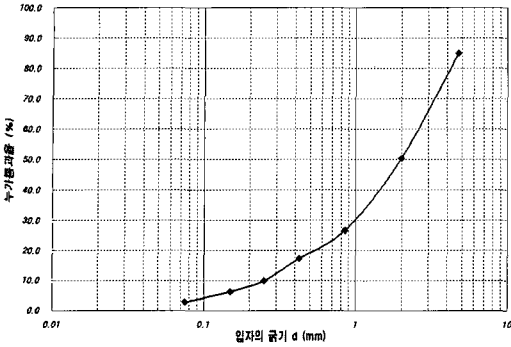


그림 4. 입도 분포 곡선

본 실험에 앞서 시료를 준비과정에서 교란된 SW 계열의 화강풍화 노상시료를 단위중량 1.85kg/cm³로 재성형한 후 증류수를 사용하여 최소의 함수비

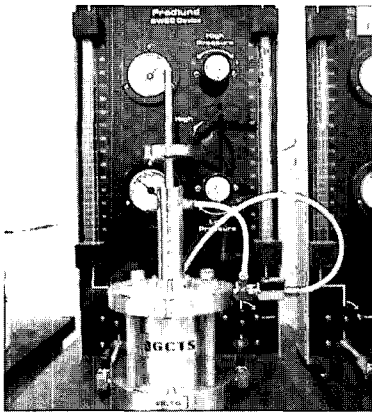


그림 5. 축변이 압력판 장치

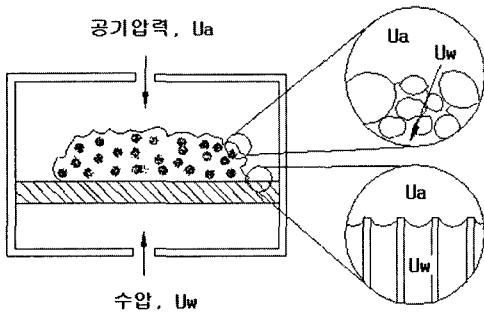


그림 6. 시료의 공기압력과 수압의 관계

(약 3~5%)로 포화시키는 과정을 선행하였다. 실험을 수행하는데 있어 사용한 장치는 그림 5와 같이 축변이기법(axis-translation technique)을 기본원리로 하는 압력판 장치를 사용하여 시료의 흡수력을 각각 측정하였고 기본 원리는 그림 6과 같다.

그림 6에서 시료와 다공판은 접촉되어 있으며 간극의 공기압과 간극수압 간에 물리적인 힘이 작용한다. 즉, 공기압력을 조절하여 시료의 모관흡수력($U_a - U_w$)을 변화시켜 그에 상응하는 간극수압의 변화를 획득하는 원리이다. 모관흡수력에서 부의 간극수압을 제어하는 것이 어려워 양의 간극공기압을 조절하여 모관흡수력을 변화시키는 방법이 비교적 용이하다.

실험 장치는 크게 패널부와 압력 셀로 나누어진다. 공기압축펌프로 연결되어진 패널부는 압력을 제어할 수 있는 조절 밸브와 게이지가 있고 최대 2000kPa 까지 제어가 가능하며 양 쪽의 두 volume tube가 있어 시료에서 빠져나온 물의 양을 체크한다. 양 volume tube의 수위가 같아지면 평형상태에 도달하였음을 나타낸다. 또한, 다공판과 volume tube를 연결하는 과정에 있어서 기포가 섞이지 않고 물로만 채워질 수 있도록 하여야 한다. 이후 5, 10, 50, 100, 200kPa로 압력게이지를 조정하여 그에 따른 함수비의 증감을 확인하고 이를 토대로 하여 산정한 흡수력 대비 함수비의 증감을 통해 함수특성곡선을 구할 수 있다.

다양한 시료 종류에 따라 작용하는 흡수력의 양상과 범위는 다르기 때문에 시료마다 각기 다른 다공판을 사용하여야 한다. 다공판의 압력범위가 1500 kPa 이하인 경우 모든 실험에 사용할 수도 있지만

표 3. 흡 상태에 따른 다공판의 종류

흡의 종류	다공판의 종류
sand	100 kPa
silty sand, clayey sand	300 kPa
sand silt, sandy clay	500 kPa
clay	1500 kPa



본 실험에는 시료의 특성을 고려하여 300kPa의 다공관을 사용하였다.

4. 결과 분석

표 3과 표 4는 흡수력 시험에 따른 결과를 나타내었다. 실험은 건조과정에서 같은 조건의 다른 시료를 이용, 반복 수행하여 오차를 줄이려 하였으며 순차적으로 압력을 감압하는 습윤과정에서 건조과정에 비해 한 데이터 당 2~3배 많은 시간을 필요로 하는 어려움에도 불구하고 흡수력에 따른 변화를 최대한 구현하려 노력하였다.

흡수력에 따라 압력 값을 조정하여 volume tube의 눈금을 읽어 빠져나온 만큼의 함수비를 보정하였고 각각에 대한 체적함수비와 포화도를 산출해 낼 수 있었다. 압력을 순차적으로 가해 줌에 따라 건조과정에 대한 흡수력을 조정할 수 있었고 최고로 가해주었

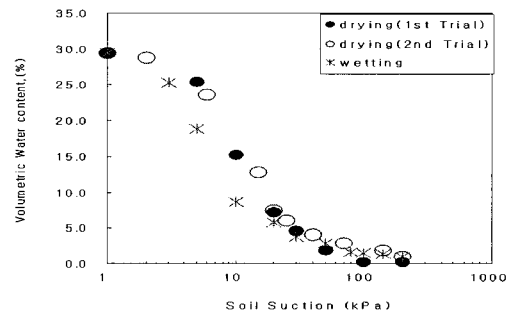
표 4. 건조 과정 데이터

흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	포화도 (S)
1	31.002	0.94
2	30.056	0.921
3	28.565	0.897
5	24.750	0.812
6	22.801	0.754
10	16.287	0.488
15	11.378	0.408
20	8.543	0.230
25	6.764	0.194
30	5.562	0.150
40	4.062	0.132
50	3.174	0.061
70	2.181	0.095
100	1.463	0.026
140	1.003	0.060
200	0.672	0.035

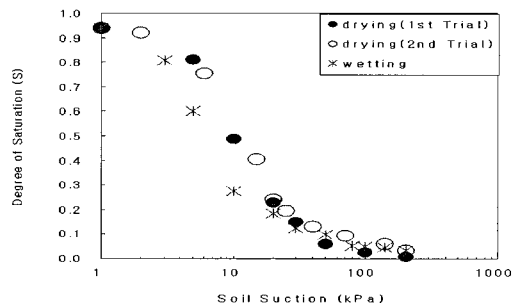
표 5. 습윤과정 데이터

흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	포화도 (S)
1	29.623	0.940
3	25.427	0.807
5	18.993	0.603
10	8.643	0.274
20	5.846	0.186
30	3.888	0.123
50	3.049	0.097
80	1.650	0.052
100	1.511	0.048
140	1.371	0.044
200	1.091	0.035

던 압력을 다시 단계적으로 감압시켜 주면서 습윤과정에 대한 실험을 실시하였다. 건조과정과 습윤과정을 비교해 보면 같은 흡수력에 대한 함수비가 서로 다른 것을 알 수 있다.



(a) 체적함수비



(b) 포화도

그림 7. 흡수력에 따른 함수특성 변화



그림 7(a)는 흡수력에 따른 체적함수비의 관계를 그림 7(b)는 흡수력에 따른 포화도의 분포를 나타낸 것이다. 체적함수비의 최대치는 약 30%를 보였고 포화 상태일 때 시료의 포화도는 0.94임을 보였다. 또한 습윤과정에서 단위 흡수력에 대하여 상대적인 변화가 더 있음을 보여주고 있다.

그림 8에서는 curve fitting으로 구한 시료의 함수 특성곡선을 건조과정과 습윤과정에 대하여 나타낸 것이다. 실제 흡수력의 변화구역인 전이구간 (transition zone)을 비교해 볼 때 서로 다른 흡수력을 나타내었으며 습윤경로가 건조경로에 비해 비교적 낮은 흡수력을 나타내었다. 또한, 포화도에 대한 함수특성곡선을 BC 모델과 VG 모델 그리고 FX 모델로 적용해 본 결과, 함수특성곡선의 효과적인 구현에 있어서 BC model은 그 특성상 일차식의 한계를

보였으나 VG 모델과 FX 모델의 경우, 데이터의 분포를 효과적으로 나타낼 수 있는 함수특성곡선이 그 효용성에 있어 적합함을 알 수 있었다. 표 6은 각 모델에 따른 계수(parameter)를 나타낸 것이다.

표 6. 모델에 따른 계수

	계 수	건조(drying)	습윤(wetting)
Brooks & Corey (1964)	λ	1.03	0.95
	Ψ_b	4.75	3.05
	γ	5.08	5.08
van Genuchten (1980)	a	0.15	0.25
	n	2.13	2.18
	m	0.53	0.54
Fredlund & Xing (1994)	a	8.60	4.80
	n	1.95	2.42
	m	1.80	1.37

그림 8의 결과와 같이 함수특성의 이력에 따른 흡수력이 서로 다름을 확인하였고 이를 기본으로 불포화 화강 풍화 노상토에 대한 흐름특성을 분석하였다. 불포화 투수계수는 Fredlund & Xing(1994)이 제안한 식(1)을 활용하여 수치적분으로 추정하였다.

$$K_r = \Theta^q(\psi) \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\Psi_{av})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (1)$$

여기서,

K_r = 포화 투수계수에 대한 불포화 투수계수에 대한 비 ($K_r = K_w / K_s$)

K_s = 실험에 의한 포화 투수계수 ($4.151 \times 10^3 \text{ cm/sec}$)

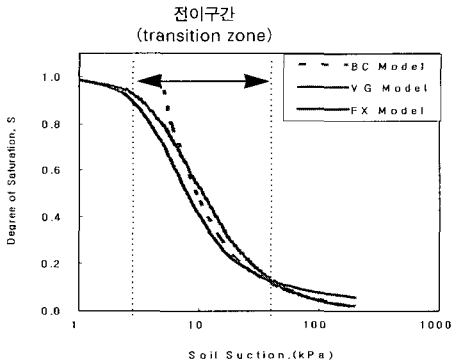
K_w = 불포화 투수계수

$\Theta^q(\psi)$ = 보정계수

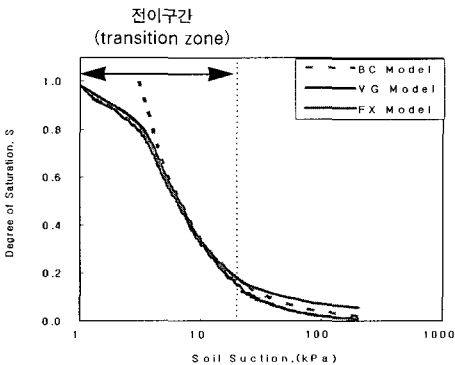
$b = \ln(10^6)$

θ' = 불포화 체적함수비 (Θ)를 모관흡수력 (ψ)에 대해 미분한 값

y = 모관흡수력 (ψ)을 대수(logarithm)로 나타낸 변수



(a) 건조과정



(b) 습윤과정

그림 8. 함수특성곡선의 산정



θ_s = 포화 체적함수비

ψ_{aev} = 공기함입치 (air entry value)

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial h_m} \quad (2)$$

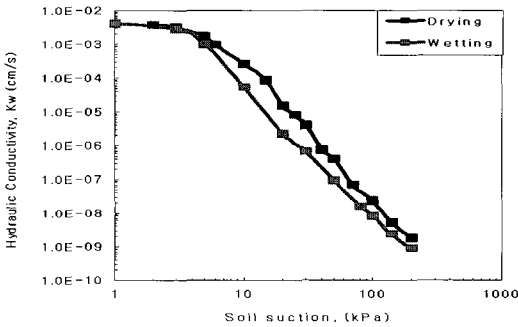
여기서, θ = 체적함수비
 h_m = 흡수력 (수두, cm)

그림 9는 FX 모델을 이용하여 구한 함수특성곡선을 기본으로 산정한 불포화 투수계수를 이력에 따라 포화투수계수 약 $4.51 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 로 적용하여 이력에 관한 영향을 흡수력과 함수비에 대하여 각각 비교해 보았다. 체적함수비에 따른 차이는 미비하나 흡수력 별 불포화 투수계수에 대한 건조과정과 습윤과정의 차이가 확연함을 알 수 있다.

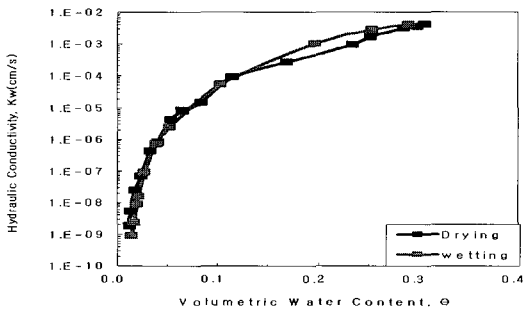
단위 습윤용적당 불포화 투수계수의 비율인 확산 (hydraulic diffusivity)은 식(3)을 이용하여 산출할 수 있는데, 불포화 상태에서의 흐름을 나타낸다.

$$D(\theta) = \frac{k(\theta)}{C(\theta)} \quad (3)$$

여기서, $k(\theta)$ = 어느 체적함수비 상태에서의 불포화 투수계수
 $C(\theta)$ = 습윤용적 (specific moisture capacity)



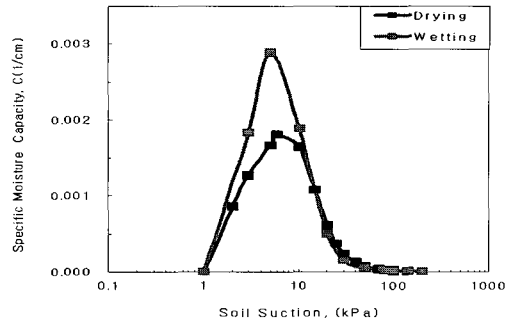
(a) 흡수력과 투수계수와의 관계



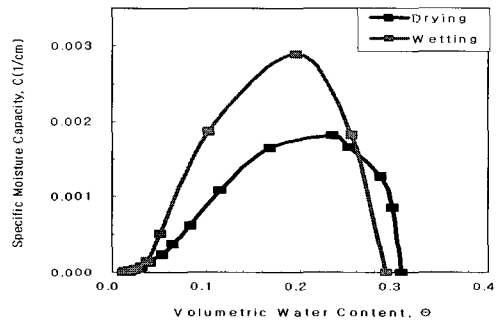
(b) 체적함수비와 투수계수와의 관계

그림 9. 이력에 따른 불포화 투수계수의 비교

또한 단위 흡수력 당 체적함수비의 변화는 습윤용적 (specific moisture capacity)으로 나타낼 수 있으며 식(2)와 같다.



(a) 흡수력과 습윤용적과의 관계



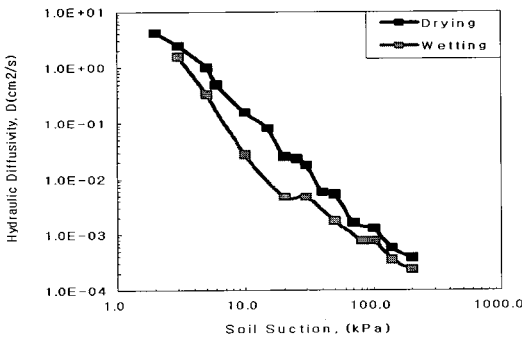
(b) 체적함수비와 습윤용적과의 관계

그림 10. 이력에 따른 습윤용적의 비교

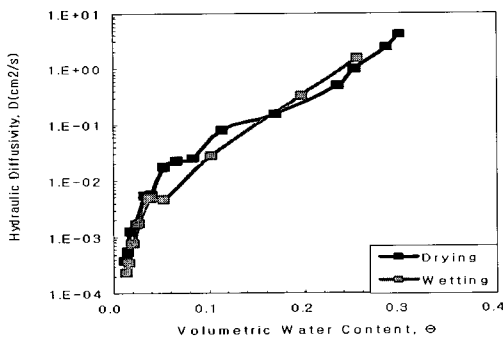


그림 10(a)와 10(b)는 습윤용적(specific moisture capacity)을 흡수력과 체적함수비에 관하여 나타낸 것으로서 이력현상에 의해 건조과정과 습윤과정에서 최대값의 차이를 보이고 있다. 최대값이 증가하면 시료가 흡수력에 의해 물을 함유할 수 있는 능력이 떨어지게 되며 소폭의 흡수력에 대한 변화에도 함수비 차이가 크기 때문에 흙 자체가 물을 보유할 수 있는 능력은 그만큼 작다는 것을 의미한다.

그림 11(a)와 11(b)는 확산(hydraulic diffusivity)에 관하여 흡수력과 체적함수비에 따라 각각 나타낸 것으로 그림 9가 일차원적인 흐름특성인 투수계수에 대하여 나타낸 것이라면 2차원적 흐름특성인 단위면적 당 흡수력에 의한 변화는 체적함수비에 관한 비교에 비하여 서로 다른 모습을 나타낸다.



(a) 흡수력과 확산과의 관계



(b) 체적함수비와 확산과의 관계

그림 11. 이력에 따른 확산의 비교

5. 경험모형을 통한 함수특성곡선 추정

함수특성곡선은 실내 시험을 통해 구하는 방법과 경험 모형을 활용하여 추정하는 방법이 있다. 실내 실험을 통하여 함수특성곡선을 추정하는 방법은 정확한 결과 값을 예측할 수 있으나 시험 시간이 많이 소요되는 단점이 있으며, 경험식을 이용한 방법은 입도분포곡선만을 이용하여 신속하게 함수특성곡선을 예측할 수 있는 장점이 있으나 경험적인 방법으로 함수특성곡선을 구하므로 해당 시료의 특성을 정확하게 반영하지 못하는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서 사용된 시험도로 화강풍화 노상토의 입도분포곡선으로 식(4)인 Arya & Paris(1981)의 경험 모델과 식(5)인 Modified Kovacs(2003)의 경험 모델로 함수특성곡선을 추정하였다.

$$\psi_i = \frac{2T \cos \beta}{\rho_w g r_i} \quad (4)$$

여기서, ψ_i = 흡수력
 T = 물의 표면장력
 β = 접촉각
 r_i = 시료 간극의 직경

$$S_r = \frac{\theta_w}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (5)$$

여기서, S_r = 포화도
 θ_w = 체적함수비
 n = 간극률
 S_c = 모세관 힘에 의한 포화도
 S_a^* = 점착력에 의한 포화도
 $(S_a^* < 1 - S_c > + 1)$

그림 12와 같이 실내 불포화 흡수력 실험으로 구한 함수특성곡선과는 상당히 많은 차이가 나타나 다져진 화강계열 노상토의 특성이 반영하지 못함을 알 수 있다. 이는 경험식이 세립분이 있거나 입경이 상대적으로 작은 입자로 구성된 모래질 시료의 경우에



는 그 적용성이 있으나 다져진 노상토와 같은 지반에는 직접 실험법에 의한 추정치가 보다 정확한 결과를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

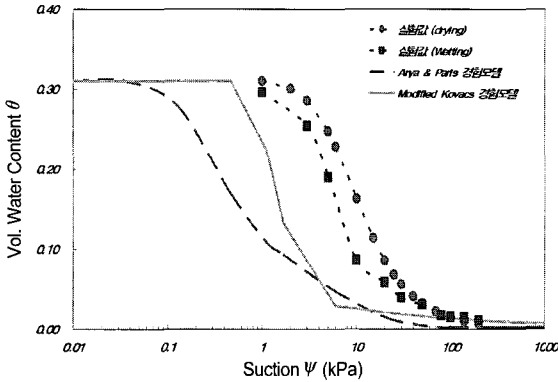


그림 12. 실내 실험과 경험 모델을 통한 함수특성곡선 비교

6. 현장 노상토의 흡수력 변화

도로하부의 현장흡수력이 측정된 자료가 없어 흡수력의 변화 경향과 이력을 확인하기 위하여 2003년 7월부터 2005년 6월까지 측정된 시험도로 노상토의 현장의 체적함수비 결과를 함수특성곡선에 활용하여 간접적으로 살펴보았다. 체적당 함수비가 약 15~20%의 범위 내에서 변동하고 있었으며, 이를 포화도로 나타낼 경우 약 50~70%로 노상토는 연중 불포화상태로 존재함을 확인할 수 있다.

따라서 그림 13과 같이 시험도로 노상토를 대상으로 한 함수특성곡선으로부터 추정된 흡수력의 변화를 관찰한 결과, 높은 함수비에서 낮은 흡수력을 나타내고 낮은 함수비에서는 높은 흡수력 값을 보인다. 이는 상대적으로 낮은 흡수력에서는 간극수압의 영향이 작아 높은 함수비를 보이고 상대적으로 높은 흡수력에서는 작용할 수 있는 부(-)의 간극수압이 커져 낮은 함수비의 특징을 보이기 때문이다. 또한 함수특성 이력 곡선으로 인하여 동일한 함수비에서도 건조과정과 습윤과정의 흡수력이 다르게 나타나므로 함수특성곡선 활용 시 현장 조건을 잘 고려하여야 할 것으로 판단된다.

연중 함수비의 변화는 흡수력의 변화에 관계되는

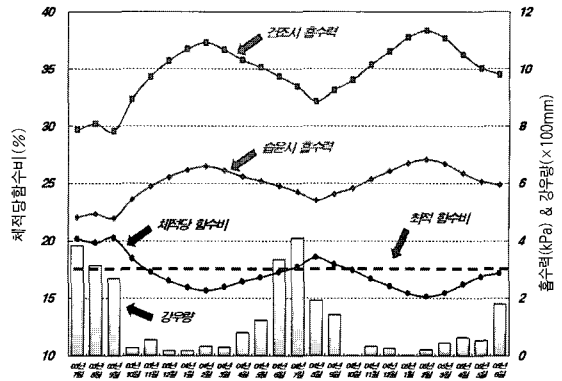


그림 13. 흡수력, 함수비 및 강수량의 연중 변화

경향을 나타내므로 흡수력은 노상토 내 수분이동과 방향을 결정하는 매우 중요한 인자로 판단된다. 그러므로 노상토가 불포화상태로 존재하는 특성으로 인하여 흡에 대한 함수비의 변화들은 흡수력의 특성을 통하여 표현될 수 있다. 전형적으로 환경변화와 적용된 하중의 변화는 노상토의 함수비 변화를 수반하며 이러한 함수비의 변화는 직접적으로 흡수력과의 관계에서 주로 나타난다. 따라서, 함수비 변화는 에너지의 변화로 표현할 수 있는 흡수력으로 나타내어 정량화할 수 있으므로 향후 불포화 흡수력을 이용하여 계절적인 영향을 고려한 노상토의 회복변형 및 탄성 계수와의 관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 다져진 화강풍화 노상토의 불포화 지반정수인 함수특성곡선 이력에 관한 특성을 고려한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 통일 분류상의 SW인 다져진 시험도로 풍화계열 노상토에 대한 건조와 습윤과정에 대한 시험 결과 최대 흡수력의 범위는 약 200kPa 정도 이하로 확인 되었다.
2. 건조 시와 비교해 볼 때 습윤 시의 함수특성 변화 과정에 대하여 에너지 평형에 따른 측정시간은 동일하지 않으며 약 2배~3배의 시간이 더 경과됨



을 알 수 있었다. 풍화토 시료에 대한 맞춤 곡선화의 경우 선형인 BC model 보다는 비선형인 VG model과 FX model이 적합할 것으로 판단된다.

3. 시료의 건조과정(drying process)과 습윤과정(wetting process)을 비교해 본 결과, 이력현상에 의하여 함수특성곡선의 전이구간(transition zone)이 상이하여 습윤과정에서 상대적으로 작은 흡수력 범위를 나타내었다. 이는 흙에서 나타나는 함수특성 이력을 고려해야 하는 근거라 할 수 있다.
4. 이를 토대로 함수특성곡선상에서 나타나는 이력(hysteresis)은 불포화 투수계수, 습윤 용적, 확산 등의 흐름특성이 함수비 보다는 오히려 흡수력에 따라 상대적으로 많은 변화를 보임을 확인할 수 있다.
5. 실내 시험과 경험 모델을 활용하여 획득한 함수특성곡선을 비교한 결과 경험 모델을 이용한 함수특성곡선은 화강풍화 노상토의 시료특성을 잘 반영하지 못하고 있다. 따라서 다져진 노상토에 적합한 경험식의 산정이 필요하다.

불포화 해석에 필요한 지반정수로서 함수특성곡선(SWCC)은 그 활용에 있어서 필요성이 증대되고 있다. 그러나 실제 도로하부 상태에 대하여 매년 실험의 과정을 수행해야 하는 것은 비효율적으로 여러 지반상태 즉, 시료의 조건에 따른 정량화 과정이 필수적이라 판단된다. 그와 더불어 이력현상에 대한 이해와 실험이 병행되어야 함은 물론, 그 활용에 있어서도 엄연하게 구별되어야 하는 건조곡선과 습윤곡선의 산정이 불포화 도로하부 해석에 있어서 중요하다 판단된다.

참고문헌

1. 박성완, 황규영(2005), "화강 풍화 노상토의 함수특성 거동", 한국도로학회 학술발표회 논문집
2. Arya, L. M and Paris, J. F(1981), "A Physico-empirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-size Distribution

and Bulk Density Data", *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030

3. Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussiere, B., and Chapuis, R.P. (2003). "A Physically Based Model to Predict the Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties. *Accepted for publication in the Canadian Geotechnical Journal*.
4. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic Properties of Porous Medium", *Colorado State Univ., Hydrology Paper 3*.
5. Fredlund, D. G. and Xing, A (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical journal*, VOL. 31, No. 4, pp.521-532.
6. Kumar, S., and Malik, R. S.(1990), "Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture", *Soil Science*, 150(6), pp.883-888
7. Laroussi, C. H., and DeBacker, L. W.(1979), "Relations between geometrical properties of glass bead media and their main hysteresis loops", *Soil Science Society of America Journal*, 43, pp.646-650
8. Letey, J., Osborn, J., and Pelishek, R. E.(1962), "Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand", *Soil Science*, 93, pp.149-153
9. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. and Pufahl, D. E. (1999), "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till", *Geotechnique* 49, No. 2, pp143-159.
10. van Genuchten, M. T. (1980), "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soils Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp892-898

〈접수 : 2006. 4. 10〉