

불포화 화강풍화토의 함수특성

Soil-water characteristics of Unsaturated Decomposed Granite Soils

신방웅* · 이봉직** · 이종규*** · 강종범****

Shin, Bang-Woong · Lee, Bong-Jik · Lee, Jong-Kyu · Kang, Jong-Beom

Abstract

The suction of unsaturated soil is one of the important variables to influence on volume change behavior. This research was performed to analyze the soil-water characteristic of decomposed granite soils in Chung Cheong area, and showed relationship with grain-size distribution.

Empirical parameters a , n , m are main variables that can be used in the empirical equations in order to predict unsaturated soil. Decomposed granite soils is taken at 12 field, and redistributed due to a , n , m parameters.

The result of Extractor test is showed that matric suction is effected by the grain-size distribution curve's left-right location, degree of an angle and fine contents of a soil.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Matric suction, Volumetric water content

요 지

본 연구에서는 불포화토 지반에 있어 모관흡수력이 지반의 거동특성에 중요한 설계변수이므로, 충청도권의 화강풍화토 지반을 대상으로 함수특성곡선을 제시하고, 입도분포곡선과 함수특성곡선과의 관계를 통하여 함수특성곡선의 추정가능성을 제시하고자 한다.

충청권의 화강풍화토 12군데의 시료를 채취하여 입도별로 분류하고, 불포화토의 경험식에 있어서 a , n , m 계수값이 함수특성을 좌우하는 주요한 변수임을 감안하여 입도분포곡선의 시작점, 기울기 및 세립분의 양에 따라 시료를 재성형하였다.

함수특성시험결과 함수비와 흡수력의 변화는 입도분포곡선의 좌우 위치와 기울기, 세립분의 양에 대한 영향이 큰 것으로 나타나 세립분의 함유량과 입도분포에 따른 상관성을 보여주었고, 매개변수 a , n , m 은 불포화 화강풍화토의 설계변수로서 기초자료가 될 것이다.

주요어 : 함수특성곡선, 모관흡수력, 체적함수비

* 정회원 · 충북대학교 총장

** 정회원 · 충주대학교 건설도시공학과 조교수

*** 정회원 · 충북대학교 대학원 토목공학과 공학박사

**** 정회원 · 충북대학교 대학원 토목공학과 박사수료

1. 서론

자연지반은 지하수위의 위치에 따라 포화토와 불포화토로 나뉘어지며, 지금까지 연구된 토질역학은 일반적으로 포화토에 대한 연구가 대부분이었다. 이는 포화토 측면에서 구조물을 설계하는 것이 안전측이라는 측면과 불포화토를 연구하기 위해 소요되는 비용과 시간 등의 제반 어려움이 많기 때문으로 생각된다.

흙에 있어서 토립자를 제외한 물과 공기가 차지하는 체적을 공극이라고 하고, 이 공극이 물로 채워져 있는 경우를 포화토, 일부만 물로 채워져 있는 경우를 부분포화토 혹은 불포화토로 정의한다. 불포화토의 간극에는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력과 물분자를 결합하는 표면력이 발생하게 되고, 이는 각각 모세관 현상과 흡착 현상의 원인이 되며, 이 현상으로 말미암아 불포화영역에서 부의 간극수압이 발생되어 유효응력과 물의 흐름을 변화시키게 된다.

화강풍화토는 국내건설공사에서 성토재료로 활용하는 경우가 많으며 대부분의 현상이 불포화토 영역에 속하게 된다. 현재까지의 연구동향을 살펴보면 불포화토는 부간극수압의 영향으로 겉보기 점착력을 보임과 동시에 마찰각도 커지며 흐름에 있어서는 간극속에 공기의 함입으로 투수성이 저하하는 등 완전포화토와는 다른 거동특성을 나타내는 것으로 알려지고 있다.

본 연구에서는 충청권의 화강풍화토 지반을 대상으로 Extractor 시험기를 사용하여 불포화지반 관련문제를 해석을 위한 기본 자료인 함수특성곡선을 제시하고자 한다. 또한, 기존의 함수특성곡선의 경험식과 비교 검토하고 충청권 화강풍화토에 대한 입도분포곡선과의 상관성과 매개변수 a , n , m 에 대한 값을 제시하고자 한다.

2. 불포화토의 함수특성

2.1 함수포텐셜의 개념

물은 흙의 간극 속에서 물리·화학적 작용에 의하여 보유되며, 간극 속에 있는 물과 공기의 변화율이나 간극의 체적변화로 인한 함수비의 변화는 물이 중력에 의하여 배수되거나 건조과정에서 증발의 영향을 받기 때문이다. 이러한 물이 가지는 보유력은 간극 속의 공기와 물 접촉면에서 발생하는 모관력이나 흡입자 표면에서 물분자를 결합하는

표면력 때문이다. 여기서 모관력은 간극의 크기에 영향을 받고 표면력은 흡입자 표면의 성질이나 양에 영향을 받는다.

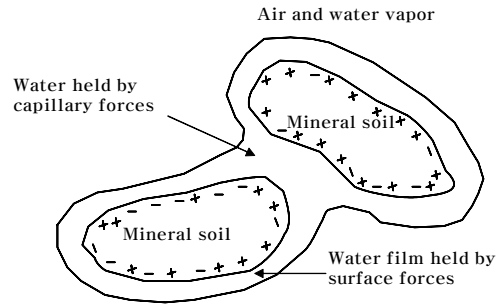


그림 1. 모관수와 흡착수

불포화토를 다루는 토질역학에서는 모관력을 모관흡수력(matric suction)이라고 한다. 모관흡수력은 간극공기압(u_a)과 간극수압(u_w)의 차($u_a - u_w$)로 표현되며 간극공기압이 대기압과 같다면 이것은 부간극수압이 된다. 모관흡수력은 전흡수력의 주요성분을 이루고 표면장력을 일으켜 모관현상을 발생시키는 대표적 성분이 된다.

2.2 불포화토의 함수특성곡선

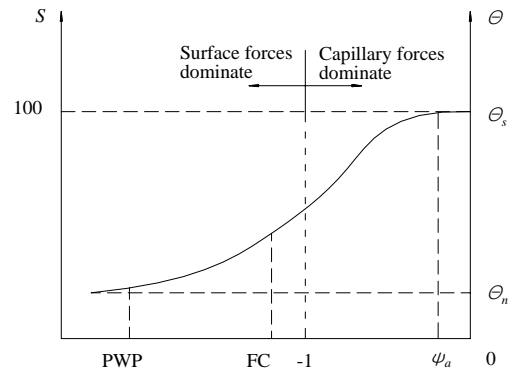


그림 2. 세립토의 함수특성곡선

함수비와 매트릭포텐셜은 기능적으로 서로 관련이 있는데 이러한 관계를 그림 2로 나타낸 것을 함수특성곡선이라 한다. 그림 2에서 초기 포화시 체적함수비는 간극률과 같다($\theta_s = n$). 포화된 간극이 증발로 인한 흡수력이 작용한다면, 흡수력이 증가함에 따라 공극이 비워지기 시작하는 일정한 한계 값이 초과될 때까지는 아무런 유출도 일어

나지 않는다. 이러한 임계흡수력을 흡이 가지는 공기함입 저항치(air-entry value, $-\phi_a$)라 하고 간극사이로 공기가 유입되기 시작하는 시점으로 정의된다. 또한, 흡수력의 증가로 인하여 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류 함수비(θ_r)라 한다. 그림 2에서 FC(Field Capacity)는 중력에 의한 자유배수가 무시되는 함수비에 대응하는 간극수압으로 정의되며, WP(Wilting Point)는 증산작용으로 인한 식물이 물을 더 이상 추출할 수 없는 함수비에 대응하는 간극수압으로 정의된다. FC와 WP사이의 함수비 차이는 식물이 성장하거나 증산을 위해 이용 가능한 물이며, 물 보유능력(soil water-holding capacity)으로 정의된다.

2.3 불포화토의 함수특성 경험식

함수특성을 표현하는 대표적인 경험식은 다음과 같다. Brooks and Corey(1966)는 흡의 함수특성을 수식으로 묘사할 수 있는 경험식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

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

- Θ = 정규함수비(normalized water content)
- λ = 간극크기분포지수(pore size distribution index)
- S_e = 유효포화도(effective degree of saturation)
- S_r = 잔류포화도(residual degree of saturation)
- S = 각 측정점의 포화도
- $(u_a - u_w)_b$ = 공기유입값
- $(u_a - u_w)$ = 흡수력

Van Genuchten(1980)은 식 (2)에서 경험식을 제안하여 실험값을 잘 묘사할 수 있음을 보였다.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a(u_a - u_w))^n} \right]^m \quad (2)$$

- Θ = 정규함수비(normalized water content)
- $(u_a - u_w)$ = 흡수력
- a = 공기유입값과 관계된 계수
- n = 변곡점의 경사에 관계된 계수

m = 잔류함수비에 관계된 계수

이 식의 계수들은 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저, 실험값을 이용하여 압력수두와 함수비간의 관계곡선을 얻는다. 여기서 압력수두는 흡수력을 수두로 나타낸 것이다.

이 관계에서 포화함수비와 잔류함수비가 명백하게 정해지므로 그 중간점 P를 쉽게 찍을 수 있다. 이 점에 대한 압력수두가 h_p 가 되고 그 점의 접선의 기울기가 S_p 가 된다.

이들을 알면 다음 식에 의해 m 을 결정할 수 있다.

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1) \quad (3a)$$

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

여기서, h_p : 점 P에서의 흡수력 (kgf/cm²)

S_p : $(\theta_s + \theta_r)/2$ 의 점 P에서의 경사

n 은 다음 식과 같이 구한다.

$$n = \frac{1}{(1 - m)} \quad (4)$$

여기서, n, m : 계수

a 는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$a = \frac{1}{h_p} (2^{(1/m)} - 1)^{(1 - m)} \quad (5)$$

여기서, a, m : 계수

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

이들 계수들을 모두 식 (2)에 대입하면 정규 함수비와 흡수력과의 관계곡선을 얻을 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 대상시료

아래 그림은 본 연구를 위해 충청권 일대의 12곳의 화강 풍화토를 채취하고, 그림 3과 같이 입도분석을 수행하여 화강풍화토의 입도분포 곡선을 나타낸 것이다. 모든 시료의 체분석을 통해 입경별로 시료를 분류하고, 각각의 기울

기와 분포를 변화시키기 위해 입도를 기준으로 시료를 9가지로 재조성하여 실험하였다.

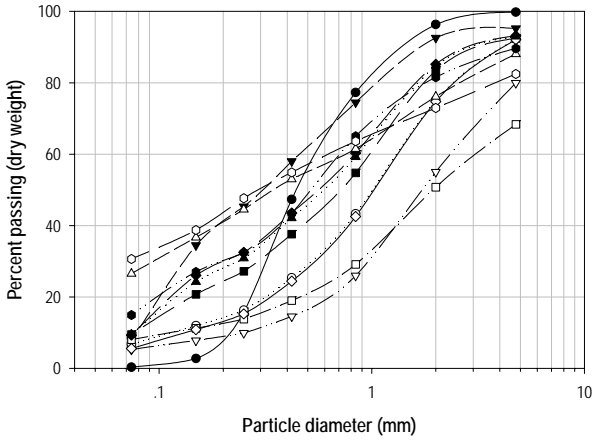


그림 3. 화강풍화토의 입도분포곡선

시료특성에 따른 함수특성을 알아보기 위하여 충청지역에 널리 분포하는 화강풍화토를 12곳에서 채취하여 4.76 mm체, 2.4 mm체, 0.85 mm체, 0.425 mm체, 0.25 mm체, 0.18 mm체, 0.15 mm체, 0.074 mm체, 0.038 mm체를 통해 입경별로 시료를 분류하였다. 분류된 시료를 통하여 입도를 변화시킨 9가지의 시료로 재조성하였으며, 불포화상태에서 흡수력에 따른 함수특성을 살펴보았다.

실험은 3bar의 공기함입저항치를 가지는 다공판인 공기저항디스크와 시료를 포화시킴으로서 시작된다. 시료를 성형하기 위한 구속용 링(높이:1cm, 직경:6cm)에 시료를 조성한 후 포화시킨다. 실험장치를 완료하고 요구하는 흡수력 값이 되도록 공기압을 주입(0.04 kgf/cm²씩 증가)한다. 평형에 도달할 때까지 시료로부터 디스크를 통하여 물이 배수된다. 이때 시간에 따른 평형에 도달하는 함수비의 변화를 체크한다. 평형에 도달하기 위한 시간은 시료의 두께와 투수성, 공기저항디스크의 투수성에 달려 있다. 함수비의 변화는 평형에 도달한 후 시료와 셀의 무게나 체적 변화량을 측정함으로써 얻을 수 있다. 추출시험기를 이용하여 0~2.5 kgf/cm²까지의 공기압에 의한 흡수력을 측정하였다.

본 연구에서는 3 kgf/cm²의 공기함입저항치를 가진 디스크에 시료를 올려놓고 공기압을 이용하여 시료를 포화시킨 후 필요한 공기압을 주어 평형에 도달할 때 대상시료가 가지는 평형함수비와 함수특성을 관찰하였다.

대상시료인 화강풍화토의 입도분포는 그림 4, 5, 6과 같다.

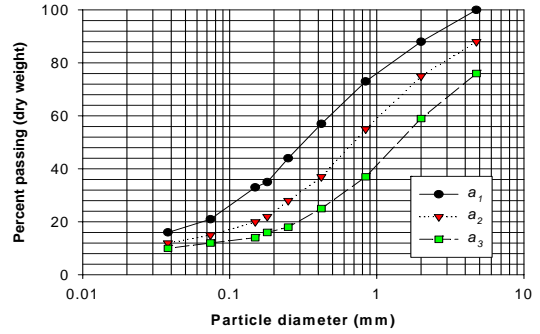


그림 4. a계수 값을 변화시킨 시료

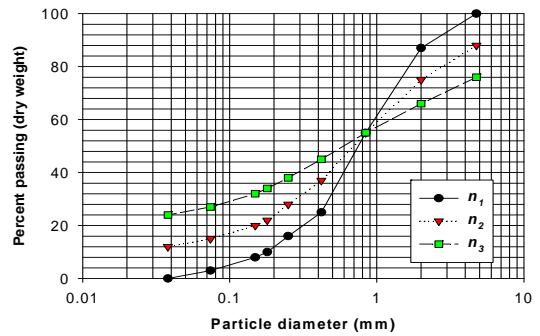


그림 5. n계수 값을 변화시킨 시료

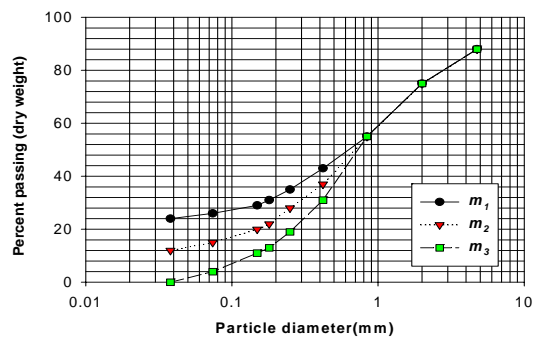


그림 6. m계수 값을 변화시킨 시료

각 시료의 물리적 특성은 표 1에 나타내었다.

표 1. 대상시료의 물리적 특성

대상 항목	a ₁	a ₂	a ₃	n ₁	n ₂	n ₃	m ₁	m ₂	m ₃
비 중	2.7	2.7	2.68	2.7	2.7	2.74	2.7	2.7	2.7
최대건조밀도(tf/m ³)	1.90	1.86	1.90	1.86	1.86	1.86	1.88	1.86	1.86
최 적 함유비(%)	15.5	16.6	14.5	16.7	16.6	16.5	16	16.6	17
0.074 mm 통과(%)	21	15	12	3	15	27	26	15	4
0.038 mm 통과(%)	16	12	10	0	12	24	24	12	0

3.2 실험장치

3.2.1 부간극수압의 측정

부간극수압은 흙의 구조와 종류 및 포화도에 크게 영향을 받으며, 흡입자에 대한 물분자의 인력, 물분자 사이의 인력, 공기-물의 상호접촉 영역의 불규칙한 힘에 의해 발생한다고 알려져 있다. 흙 입자간의 접촉면 사이에는 모관장력에 의해 물이 흡착되어 있다. 이것을 단순화시켜 보면 그림 7과 같다. 물과 공기의 경계면에는 한 막이 있다고 가상할 수 있고 이 막을 수축면이라고 한다면 그 양쪽의 압력의 차 $u_a - u_w$ 가 흡수력이 된다.

흡수력은 다음의 방법으로 측정할 수 있다. 그림 7에 보인 바와 같이 장력을 받아 흙 입자에 흡착되어 있는 수압을 다공판을 통해 측정할 수 있으며, 다공판 위에 불포화도를 조성한 후, 압력을 가하여 흙 입자에 부착되어 있는 수분을 추출하는 일이다.

그러면 추출에 요구되는 압력이 부간극수압이 되며, 이 원리는 Pressure plate extractor 시험에 의한 흡수력 측정에 적용되고 있다.

3.2.2 Pressure Plate Extractor

Extractor는 일반적으로 시료에 다양한 흡인력을 적용

하여 사용하며, 이러한 실험을 Pressure plate test (ASTM D2325)라고 한다.

이 실험장치는 흙의 함수특성곡선을 측정하기 위하여 사용되어지며, 압력실과 고압의 공기흡입저항치를 갖는 세라믹판으로 구성되어 있다. 세라믹판은 포화되어 있어야 하며, 물로 채워진 디스크 아래부분과 연결되어 수압을 "0"으로 유지시켜준다.

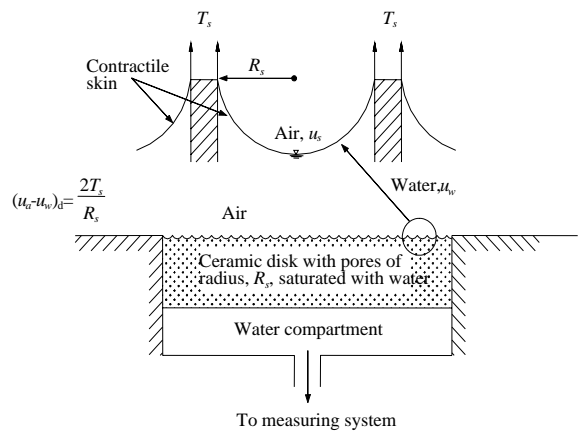


그림 7. 공기흡입저항의 원리

시료를 디스크의 위에 놓고 계획된 흡인력을 압력셀에 가해준다. 이 경우 적용된 흡인력이 디스크의 공기흡입저항치를 초과하지 않는다면 공기는 통과하지 못한다. 디스크의 공기흡입저항치는 디스크내의 미세공극의 지름과 관계되므로, 공기흡입저항치와 압력셀의 강도 조절에 따라 시료에 최대 공기압을 적용할 수 있다.

흡인력의 적용으로 간극수가 디스크 아래부분으로 배출되며, 바닥부분과 연결된 뷰렛을 통하여 물의 체적변화를 측정하게 된다. 평형상태에 도달하게되면 시료는 증가된 흡인력에 부합하여 함수비가 감소될 것이다.

각각의 평형상태의 함수비는 물의 체적변화를 측정함으로써 산출되어진다.

만일, 하나이상의 시료로 시험을 수행하였다면, 각 흡인력에 대한 평형상태 도달후 압력셀을 해체하여 각각의 시료의 무게를 측정하여야 한다.

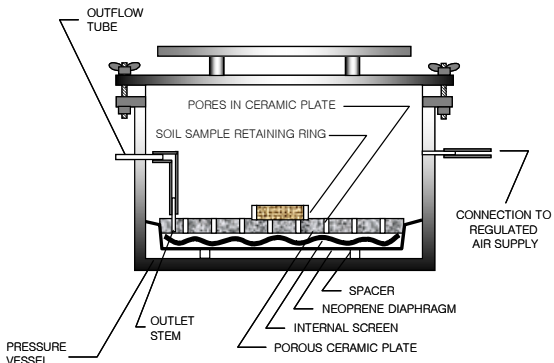


그림 8. Extractor시험기의 단면도



그림 9. Extractor시험기

4. 분석 및 고찰

그림 10은 각 함수특성을 입도분포의 좌우 위치를 변화시킨 시료의 흡수력에 대한 체적함수비의 관계를 나타낸 것이다. 초기 체적함수비는 세 가지 시료가 비슷한 값을 보이며, 흡수력이 커짐에 따라 a_2 시료와 비교하였을 때 a_1 시료의 경우는 높은 함수상태를 보였으며, a_3 시료의 경우는 낮은 함수상태를 보여주고 있다.

그림 11은 각 함수특성을 입도분포의 기울기를 변화시킨 시료의 흡수력에 대한 체적함수비의 관계를 나타낸 것이다. 초기 체적함수비는 세가지 시료가 비슷한 값을 보이며, 흡수력이 커짐에 따라 n_2 시료와 비교하였을 때 n_1 시료의 경우는 높은 함수상태를 보였으며, n_3 시료의 경우는 낮은 함수상태를 보여주고 있다. 따라서, 입도분포곡선 상의 기울기가 작을수록 함수특성에서 흡수력에 따른 함수상태가 높으며, 입도분포곡선 상의 기울기가 클수록 함수특성

에서 흡수력에 따른 함수상태가 낮다는 사실을 알 수 있다.

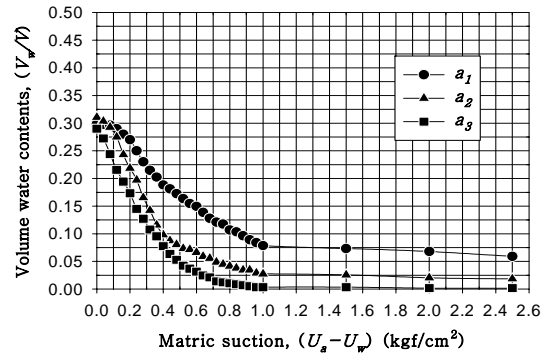


그림 10. a_1, a_2, a_3 시료의 함수특성곡선

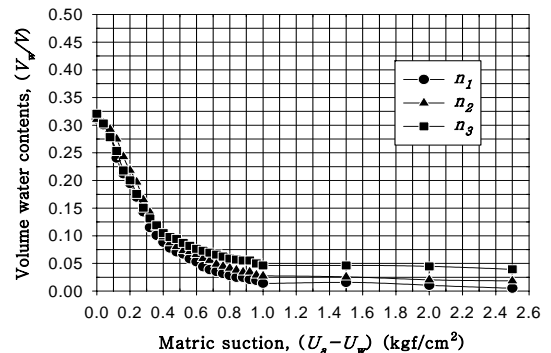


그림 11. n_1, n_2, n_3 시료의 함수특성곡선

그림 12는 각 함수특성을 0.85 mm체 통과시료의 양을 변화시켜 세립분의 입도분포를 변화시킨 시료의 흡수력에 대한 체적함수비의 관계를 비교한 것이다. 초기 체적함수비는 세가지 시료가 비슷한 값을 보이며, 흡수력이 커짐에 따라 m_2 시료와 비교하였을 때 m_1 시료의 경우는 높은 함수상태를 보였으며, m_3 시료의 경우는 낮은 함수상태를 보여주고 있다. 따라서, 입도분포곡선 상의 세립분의 양이 많을수록 함수특성에서 흡수력에 따른 함수상태가 높으며, 입도분포곡선 상의 세립분의 양이 적을수록 함수특성에서 흡수력에 따른 함수상태가 낮다는 사실을 알 수 있다.

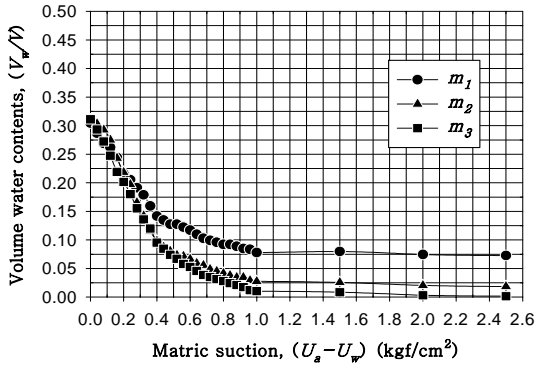


그림 12. m_1, m_2, m_3 시료의 함수특성곡선

표 2. Pressure Plate Extractor 실험결과

대상 항목	a_1	a_2	a_3	n_1	n_2	n_3	m_1	m_2	m_3
간극비	0.424	0.45	0.408	0.452	0.45	0.472	0.438	0.45	0.452
체적 함수비	0.30	0.31	0.29	0.31	0.31	0.32	0.30	0.31	0.31

이상에서, 흙의 흡수력은 입도분포곡선에서의 시작점 및 기울기, 세립분의 양에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이것은 세립분의 함유량과 분포에 따른 간극의 구조와 간극비가 부간극수압에 큰 영향을 미침을 나타내 주고 있다.

표 3. 실험결과에 대한 Brooks & Corey의 계수

구분	S_r	$(U_a - U_w)_b$	λ
a_1	0.1982	0.45	2.95
a_2	0.0597	0.31	3.00
a_3	0.0055	0.30	3.71
n_1	0.0164	0.31	2.91
n_2	0.0597	0.31	3.00
n_3	0.1227	0.32	3.04
m_1	0.2386	0.32	3.00
m_2	0.0597	0.31	3.00
m_3	0.0047	0.30	2.95

표 4. 실험결과에 대한 Van Genuchten의 계수

구분	S_r	S_b	h_p (cm)	계수		
				m	n	α
a_1	0.1982	1.30	460	0.63	2.69	0.0028
a_2	0.0597	1.34	284	0.64	2.75	0.0045
a_3	0.0055	1.36	240	0.64	2.78	0.0053
n_1	0.0164	1.39	257	0.65	2.83	0.0049
n_2	0.0597	1.34	284	0.64	2.75	0.0045
n_3	0.1227	1.25	232	0.62	2.61	0.0056
m_1	0.2386	1.20	289	0.62	2.53	0.0047
m_2	0.0597	1.34	284	0.64	2.75	0.0045
m_3	0.0047	1.45	280	0.66	2.93	0.0044

각 대상시료에 대한 실험값과 이론값을 유효포화도와 흡수력과의 관계 그래프로 비교하여 그림 13~21에 나타내었다.

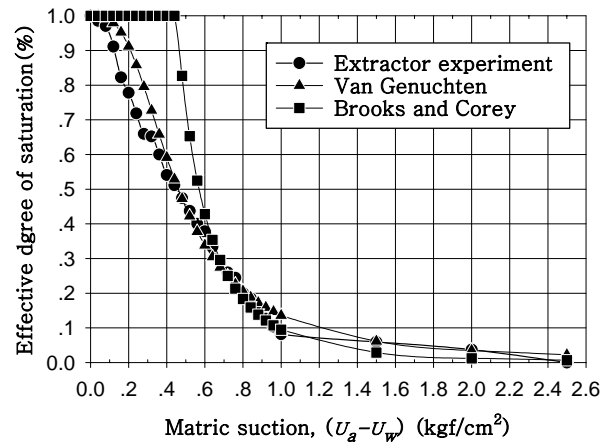


그림 13. a_1 시료의 실험값 및 이론값

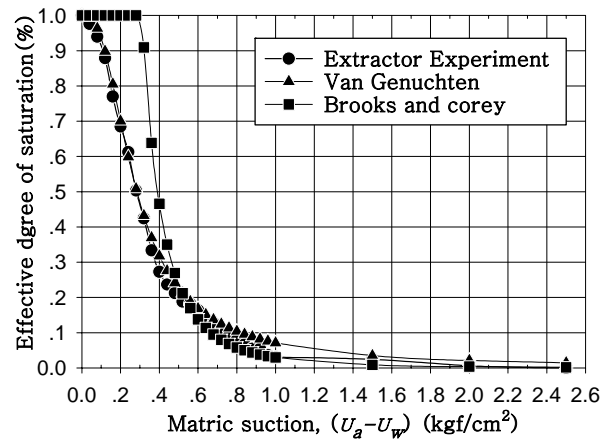


그림 14. a_2 시료의 실험값 및 이론값

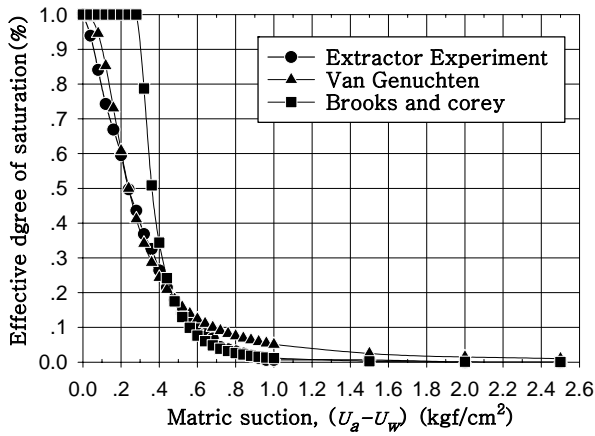


그림 15. a₃ 시료의 실험값 및 이론값

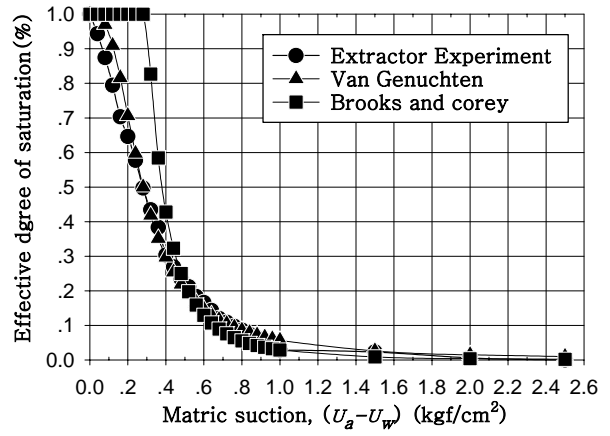


그림 18. n₃ 시료의 실험값 및 이론값

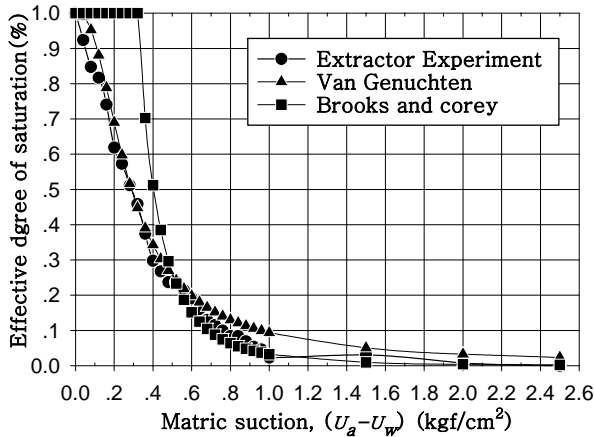


그림 16. n₁ 시료의 실험값 및 이론값

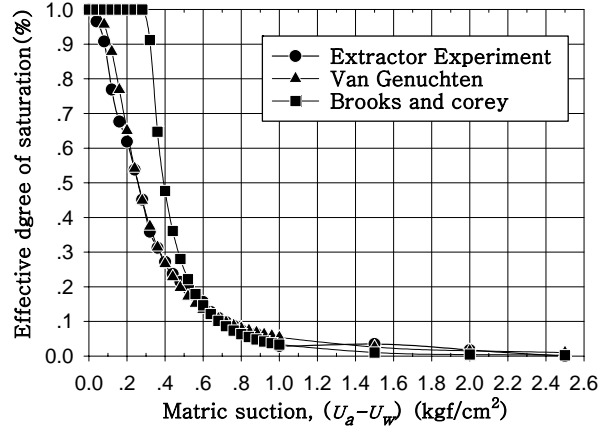


그림 19. m₁ 시료의 실험값 및 이론값

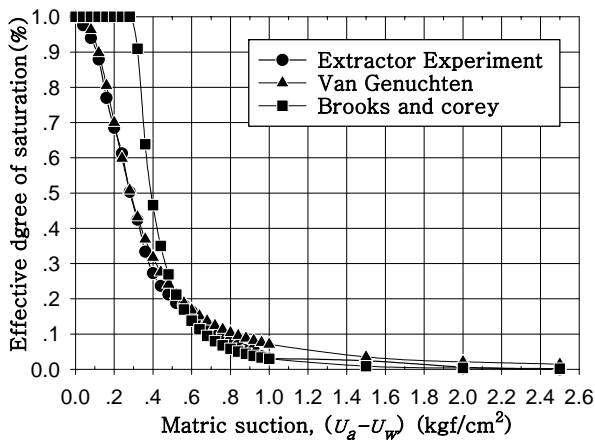


그림 17. n₂ 시료의 실험값 및 이론값

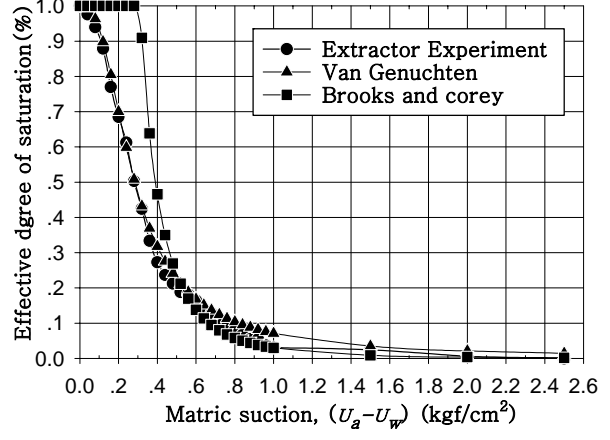


그림 20. m₂ 시료의 실험값 및 이론값

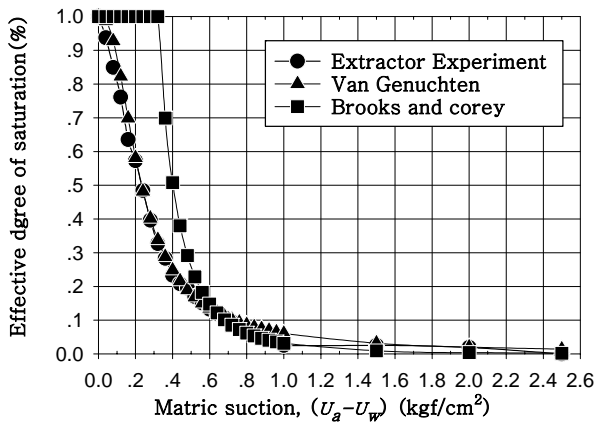


그림 21. m₃ 시료의 실험값 및 이론값

경험식과 비교한 결과 실험에 의한 함수특성치는 공기유입값 $(U_a - U_w)_b$ 와 간극크기분포지수 λ 를 주요인자로 사용한 Brooks and Corey의 경험식보다 a, n, m계수값을 주요인자로 사용한 Van Genuchten의 경험식에 더 잘 부합하고 있음을 보여준다. 이것은 Brooks and Corey의 식이 모래의 함수특성에 잘 부합하는 반면에 세립질이 많은 흙에는 차이를 보임을 알 수 있었으며, Van Genuchten의 공기유입값과 관계된 계수 a, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n, 잔류함수비에 관계된 계수 m, 각각의 계수값을 입도분포곡선 자료를 이용하여 잔류포화도 S_r , 포화함수비와 잔류함수비 중간점에 대한 기울기와 압력수두인 S_p, h_p 값의 추정을 통하여 계산하게 될 경우, 높은 정도의 함수특성곡선을 유추해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

충청지역 화강풍화토에 대한 함수특성을 알아보기 위하여 입도분포를 변화시키고, 이에 따른 함수특성의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 흡수력의 변화에 따른 함수비의 변화를 화강풍화토에 대해 실험한 결과 흡수력이 0 kgf/cm²에서 2.5 kgf/cm²로 증가함에 따라 함수비가 76.1%~99.5% 감소하는 경향을 나타냈다.
2. 대상시료의 체적함수비를 측정한 결과 흡수력이 0

kgf/cm²에서 2.5 kgf/cm²로 증가함에 따라 a₁ 시료에서 80.2%, a₃ 시료에서 99.5%, n₁ 시료에서 98.4%, n₃ 시료에서 87.7%, m₁ 시료에서 76.1%, m₃ 시료에서 99.5%의 감소를 나타냈다. 이는 세립분의 함유량과 분포에 따른 간극의 구조와 간극비가 부간극수압에 큰 영향 요인임을 알 수 있었다.

3. 실험치와 Brooks & Corey의 경험식을 분석한 결과, 공기유입값 $(U_a - U_w)_b$ 은 입도분포곡선의 좌우 위치에 영향을 받으며, 간극크기분포지수 λ 의 값은 입도분포곡선의 좌우 위치와 기울기에, 잔류포화도 S_r 값은 세립분의 양에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
4. 실험치와 Van Genuchten의 경험식을 분석한 결과, 함수특성곡선 상에서 공기유입값과 관계된 a 계수값은 입도분포곡선의 좌우 위치에도 영향을 받으며, n 계수값과 m 계수값은 입도분포의 기울기와 세립분의 양에 영향을 받는 것으로 나타났다.
5. Brooks & Corey의 경험식의 결과로 나타난 곡선은 낮은 흡수력에서 실험값을 잘 묘사하지 못하였으나 흡수력이 증가함에 따라 잘 일치하였고, Van Genuchten의 경험식과 실험결과는 저흡수력과 고흡수력에서 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다.

향후 입도분포곡선을 고려한 함수특성곡선의 상관성 평가가 지속적으로 이루어진다면 입도분포를 통해 함수특성곡선을 유추할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Brooks, R. H., and Corey, A. T.(1966), Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, Journal of Irrigation and Drainage, ASCE, Vol. 92, No. IR2, pp. 61~88.
2. Van Genuchten, M. T.(1980), A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science of America Journal, Vol. 44, No. 2, pp. 892~898.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, Inc.
4. Fredlund, D. G., and Xing, A.(1994), Equations for Soil-Water Characteristic Curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
5. Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D.(1995), and Barbour, S. L., The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength to the Soil-Water Characteristic Curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, pp. 440~448.
6. Shackelford, C. D., Houston, S. L., Chang, N. Y.(2000), Advances in Unsaturated Geotechnics, The Geo-Institutivite of the American Society of Civil Engineers, pp. 303~317.
7. 송창섭(1994), 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발, 서울대학교 박사학위논문.
8. 송진규(1995), 불포화토의 함수특성 연구, 동국대학교 석사학위논문.
9. 김상규, 류지협, 송진규(1996), 불포화토의 함수특성 측정, 한국지반공학회지, 제12권, 제6호, pp. 139~151.
10. 류지협(1997), 불포화 화강풍화토의 투수 및 강도특성, 동국대학교 대학원 박사학위논문.