

상재하중과 체적변형을 고려한 불포화화강풍화토의 함수특성곡선

The Influence of Overburden Pressure and Volume Change on the Soil-water Characteristic Curve of Unsaturated Weathered Granite Soil

이 영 휘[†] · 김 태 한¹⁾ · 문 석 준¹⁾

Lee, Younghuy · Kim, Taehan · Moon, Seokjun

ABSTRACT : The comprehensive tests on unsaturated weathered granite soils are carried out to obtain the soil-water characteristic curve that is the one of the essential requisites to study the unsaturated soil. The weathered granite soils were obtained at Palgong mountain in Daegu. The existing test results have been carried out without overburden pressures and volume changes. In this study, the volumetric pressure plate extractor is improved to consider two factors such as overburden pressure and volume change. The applied overburden pressures were 0, 25, 50, 75, 100kPa and volume changes were measured at each phase. The results of this study are summarized as follows: As the overburden pressure increases, the volumetric water content decreases at the same matric suction and the air entry value increases and gradient of curve at the transition zone and the size of the hysteresis loops decreases. As the overburden pressure increases, the degree of saturation increases at the same matric suction and degree of saturation of the wetting curve is higher than that of dry curve. The SWCC with volume changes are slightly larger than those without volume changes. The general equation proposed by Fredlund & Xing(1994) to fit the experimental result of the SWCC indicates good agreement. The empirical parameters a , n , m as overburden pressure show similar inclination as the existing results.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Unsaturated weathered granite soil, Overburden pressure, Volume change

요 지 : 불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소인 함수특성곡선을 연구하기 위하여 대구 팔공산 지역의 화강풍화토를 대상으로 함수특성곡선시험을 수행하였다. 기존의 함수특성곡선 시험은 상재하중과 체적변형의 고려없이 실시하였지만, 본 실험은 두요소를 고려하기 위하여 기존의 실험장비인 압력판 추출기를 개량하여 함수특성곡선 시험을 실시하였다. 시험과정에 있어 상재하중은 0, 25, 50, 75, 100kPa를 가하였으며, 체적변형은 각 단계마다 측정하였다. 본 실험의 시료를 통한 함수특성곡선 시험 결과는 상재하중의 증가에 따라 동일한 모관흡수력에서 낮은 체적함수비를 가졌으며, 공기함입치는 증가하였다. 또한 전이영역 구간의 기울기는 감소하는 결과를 나타내었으며 이력현상은 줄어드는 결과를 보였다. 포화도는 상재하중의 증가에 따라 동일한 흡수력에서 큰 값을 나타내었으며 건조과정보다는 습윤과정이 큰 값을 나타내었다. 체적변화를 고려한 함수특성곡선은 미고려한 함수특성곡선보다 미세하게 큰 값을 나타낸다. 본 실험의 실측치와 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식은 잘 부합하는 결과를 나타내었으며, 상수값 a , n , m 값은 상재하중에 따라 기존의 연구결과와 비슷한 양상을 보였다.

주요어 : 함수특성곡선, 불포화 화강풍화토, 상재하중, 체적변형

1. 서 론

최근 지반공학 분야에서는 불포화토에 대한 관심이 급증하고 있다. 기존의 포화토의 원리를 이용하여 실제 지반문제를 해석하는 것은 지반에서 발생하는 여러 현상과 거동 특성을 합리적으로 해석하는데 그 한계가 있으며 많은 지반공학적 문제들을 불포화토 토질역학을 이해함으로써 더욱 합리적으로 해석할 수 있다는 인식이 높아지고 있다.

불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소로 함수특성곡선이 있다. 함수특성곡선은 모관흡수력에 따른 체적함수비를 통하여 구할 수 있다. 현재까지는 함

수특성곡선시험은 모관흡수력의 크기에 따른 함수비의 변화로 나타내었다. 그러나 함수특성곡선시험을 위하여 흡수 받고 있는 응력상태와 그에 따른 체적변위를 고려해야 보다 실질적인 함수특성곡선을 나타낼 수 있다는 내용이 여러 연구자들에 의하여 제안되고 있다. 국내의 연구로는 정상규 등(2003)의 화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향에 대하여 연구하였으며 박재영(2007)의 상재하중이 불포화풍화토의 함수특성곡선에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 국외에서도 많은 연구가 진행되고 있으나 과도한 시간과 비용 때문에 발표된 시험결과는 아직까지 다소 미흡한 실정이다.

† 정희원, 영남대학교 건설시스템공학부 교수(E-mail : younghuy@yu.ac.kr)

1) 정희원, 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정

따라서 본 연구에서 불포화토의 거동을 밝히는 가장 기본적인 요소인 함수특성곡선을 보다 정확하게 규명하기 위하여 흙이 받는 응력상태와 체적변형을 고려할 수 있도록 실험 장치를 개량하여 실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다.

2. 불포화토의 기본이론

2.1 불포화토의 특성

모든 지반의 상태가 포화상태로 있지 않고 부분적으로 포화된 상태가 대부분이므로 흡입자와 물 - 공기사이의 모관현상으로 포화토와는 다른 거동특성을 나타낸다. 따라서 불포화토(unsaturated soil)에 대한 새로운 이론의 정립이 필요하게 되었다.

불포화와 포화를 구분하는 기준은 간극수압이며, 간극수압이 음(-)이면 불포화 영역으로 간주한다. 불포화토의 이론은 포화토 이론을 토대로 확장되었고, 현재에 이르러 불포화토 물성치를 추정하기 위한 시험기법의 개발과 축적된 데이터를 바탕으로 불포화토의 거동에 대한 이론을 적용할 수 있는 단계에 와있다.

불포화토에서 음의 간극수압으로 묘사되는 흡수력(suction)의 차이에 따라서 불포화 지반의 거동이 특성화 된다고 할 수 있다. 또한 흡수력과 체적함수비와의 관계를 나타내는 함수특성곡선은 불포화 정도에 따른 흡수력 정도를 나타내는 여러 설계변수들과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

2.2 함수특성곡선

불포화토의 경우에 모관흡수력이 지반의 거동특성에 영향을 미치는 중요한 역할을 하는 설계변수이다. 따라서 불포화토와 관련된 흐름특성, 강도특성 및 변형특성을 적절히 고려하기 위해서는 모관흡수력의 영향을 반드시 고려하여야 한다(Fredlund와 Xing, 1994; Vanapalli 등, 1996). 함수특성곡선은 불포화 정도에 따른 모관흡수력의 유발정도를 나타내는 상관관계를 보여준다. 따라서 불포화토와 관련된 지하수의 흐름, 사면의 안정 등을 규명하기 위해서는 반드시 고려해야 할 지반특성이다.

함수특성곡선(soil water characteristic curve)은 일반적으로 함수비(일반적으로 체적함수비: θ)와 모관흡수력(matric suction)의 관계로 정의된다. 평형상태일 경우의 흙 속의 물은 간극물, 간극의 크기 그리고 흡입력의 변화에 따라 변화한다. 즉, 함수특성곡선(SWCC)은 기하학적 조건이 같은 시료일 경우 흡입력에 대한 물의 보유능력을 표현하므로 수분 보유 곡선으로 표현하기도 한다.

그림 1과 같이 함수특성곡선은 함수량에 따른 흡수력의 변화를 나타내는 곡선으로 불포화 지반의 고유 특성을 나타내고, 지반의 강도와 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본 물성이라 할 수 있다.

전형적인 함수특성곡선인 그림 1에서 포화영역(saturated zone)은 초기치인 공기함입치(air entry value)를 초과할 때까지는 흙 속의 간극 밖으로 물이 유출되지 않는다. 또한 전이영역(transition zone)은 흙 속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되어 지반의 모관흡수력은 증가한다. 여기서 함수특성곡선의 가장 중요한 요소이며, 지반의 고유한 특징인 곡선의 경사가 정해진다. 여기에 나타나는 공기함입치는 포화된 지반에 처음으로 공기가 간극으로 유입되기 시작하는 흡수력이다. 곡선의 변곡점은 공기함입치와 잔류함수비(residual water content)를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 잔류영역(residual zone)은 흙 속으로 공기의 흡입이 계속되면 모관흡수력이 지속적으로 증가한다. 그러나 어느 정도의 모관흡수력이 증가하여도 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비가 존재하게 되며 이때의 함수비를 잔류함수비(residual water content)라 한다. 또한 함수특성곡선은 시료의 건조과정과 습윤과정으로 실내시험을 거쳐 획득하게 되

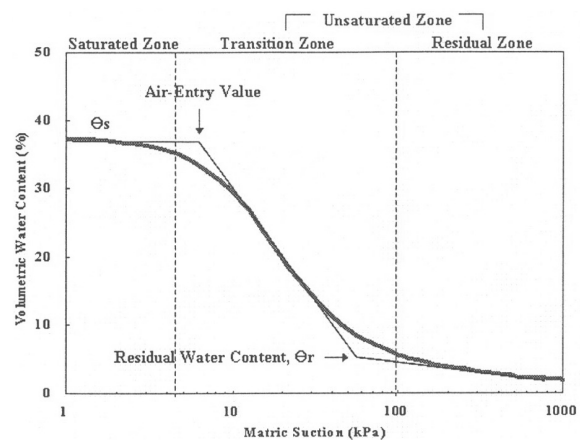


그림 1. 전형적인 함수특성곡선(Fredlund와 Xing, 1994)

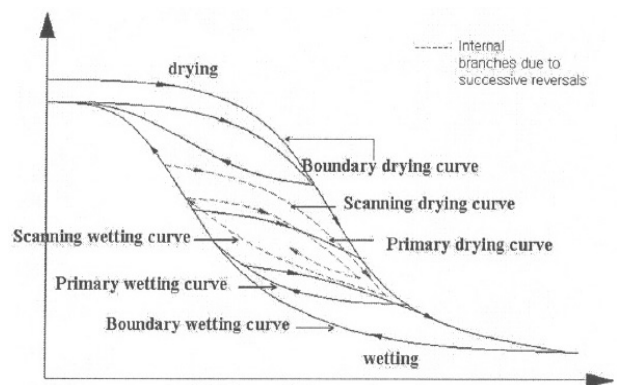


그림 2. 함수특성곡선에서의 이력현상(Bear, 1979)

는데, 이때 그림 2와 같은 건조와 습윤 경로 상에 이력(hysteresis)이 발생하게 된다.

2.3 함수특성곡선 이론식

함수특성곡선의 대표적인 이론식은 다음과 같다.

2.3.1 Brooks와 Corey의 이론식

Brooks와 Corey(1964)는 간극크기 분포 지수(λ)를 지수로 하는 경험식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

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

- 여기서, θ = 정규함수비
- λ = 간극크기 분포 지수
- S_e = 유효포화도
- S_r = 잔류포화도
- S = 각 측정점의 포화도
- $(u_a - u_w)_b$ = 공기유입값
- $(u_a - u_w)$ = 모관흡수력

간극크기분포지수(λ)는 곡선의 기울기로 정의되며, 간극크기의 범위가 넓은 흙일수록 간극크기분포지수가 작다.

2.3.2 van Genuchten의 이론식

van Genuchten(1980)는 식 (2)와 같이 새로운 경험식을 제안하였다.

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

- 여기서, θ = 정규함수비
- $(u_a - u_w)$ = 모관흡수력
- a = 공기유입값과 관련된 계수
- n = 변곡점의 경사에 관련된 계수
- m = 잔류함수비에 관계된 계수

2.3.3 Fredlund와 Xing의 이론식

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

$$\theta = C(u_a - u_w) \left[\frac{1}{\ln \left\{ e + \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^n \right\}} \right]^m \quad (3)$$

- 여기서, a = 공기유입값과 관련된 계수
- n = 변곡점의 경사에 관련된 계수
- m = 잔류함수비와 관계된 계수
- e = 자연대수, 2.71828
- $(u_a - u_w)$ = 흡수력
- $C(u_a - u_w)$ = 보정함수

여기서, 보정함수 $C(u_a - u_w)$ 는 식 (4)와 같이 정의 된다.

$$C(u_a - u_w) = \left[1 - \frac{\ln \left\{ 1 + \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_r} \right\}}{\ln \left\{ 1 + \frac{1,000,000}{(u_a - u_w)_r} \right\}} \right] \quad (4)$$

- 여기서, $(u_a - u_w)_r$ = 잔류함수비의 흡수력
- $(u_a - u_w)$ = 각 측정점의 모관흡수력

3. 함수특성곡선실험

3.1 시료

본 시험에 사용된 시료는 대구 팔공산의 절취사면에서 교란시료를 채취하였으며, 현장에서 들밀도 시험을 실시하여 현장단위중량을 구하였다. 시험은 현장 상태에 맞게 시료를 재성형하였다. 아래의 표 1은 시험에 사용된 시료의

표 1. 현장시료의 물리적 성질

현장단위중량(t/m^3)	1.79
현장 함수비(%)	5
유효입경(D_{10}), mm	0.30
균등계수(C_u)	9.33
곡률계수(C_c)	1.71
통일분류법(USCS)	SW
액성한계(LL, %)	-
소성한계(PL, %)	NP
비중	2.65

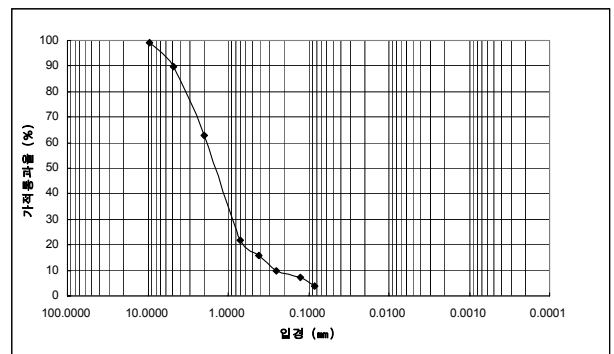


그림 3. 시료의 입도분포곡선

물리적 성질을 나타내었으며, 그림 3에서는 입도분포곡선을 보여준다.

시료는 다음의 과정을 통하여 재성형하였다. 현장에서 채취한 자연시료를 2일 이상 노건조 시킨 후 10번체를 통하여 굵은 입자는 배제하였다. 현장의 함수비를 맞추기 위하여 증류수를 스프레이를 사용하여 분사한 후 24시간 동안 함수비를 균등화시켰다. 현장의 함수비로 맞춰진 시료를 단위중량에 맞추어 압밀링에 넣고 정적다짐을 행하여 현장의 함수비와 단위중량과 동일하게 시료를 조성하였다.

3.2 시험장비 및 시험방법

그림 4는 본 연구에서 함수특성곡선을 획득하기 위해 사용된 압력판추출시험기(Volumetric Pressure Plate Extractor)의 개요도이다. 기존의 압력판추출시험기는 상재하중과 체적변위 측정을 할 수 없는 단점이 있었지만, 본 실험의 시험기는 두 요소를 고려할 수 있도록 개량을 하였다. 압력판추출시험기는 고압의 공기압입저항치를 갖는 세라믹판으로 모관흡수력을 조절하면서 시료 내로 들어가거나 빠져나오는 물의 양을 확인할 수 있다. 시험기의 구조는 크게 extractor와 air

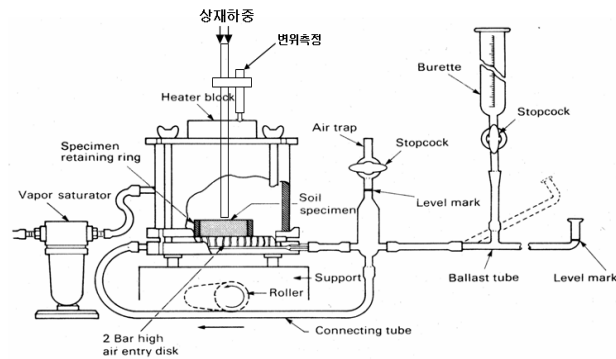


그림 4. 개량된 VPPE 개요도

표 2. 각 상재하중의 흡수력에 대한 건조과정의 체적함수비 결과

0kPa		25kPa		50kPa		75kPa		100kPa	
흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)
0.1	31	0.1	27.68	0.1	25.7	0.1	22	0.1	21.1
2	28.11	1	25.67	1	23.66	1	20.30	1	20.20
5	24.58	3	23.03	3	21.48	3	18.68	3	18.56
8	21.92	6	20.55	6	19.05	5	18.15	6	18.02
11	19.80	11	17.01	12	16.74	11	15.81	11	15.65
15	18.03	20	14.36	30	12.65	20	13.65	20	13.47
30	14.67	30	12.24	60	9.81	40	11.31	40	11.10
60	12.02	60	9.59	100	7.68	80	8.625	60	8.37
100	10.43	100	8.71	150	6.80	100	7.00	80	7.43
150	9.19	150	7.30			130	6.67	100	6.36
180	8.84					150	6.33	150	5.46

trap, ballast tube, burette로 구성되어 있다. extractor의 밑판은 세라믹 디스크로 되어 있고 셀내부의 공기압을 가할 수 있게 실린더형 셀과 근절기가 연결이 되어있다. air trap은 세라믹 디스크를 통과한 공기방울이 ballast tube로 넘어가지 못하게 하는 기능을 한다. 시료에서 빠져나온 물은 ballast tube에 모이게 되고 이를 인위적으로 burette로 넣어서 시료에서 물이 빠져나온 양 혹은 들어간 양을 확인할 수 있다 (오세봉 등, 2008).

본 연구는 상재하중을 고려하기 위하여 시험 시 직접 전단시험기의 수직 하중 재하대를 그림 4의 시료와 연결된 상부의 봉을 통하여 0kPa, 25kPa, 50kPa, 75kPa, 100kPa의 상재하중을 주었으며, 시료의 체적변위를 고려하기 위하여 상재하중을 가하는 시료와 맞닿은 봉에 변위를 측정할 수 있는 장치를 설치하여 각 단계시마다 시료의 변위를 측정하였다. 또한, 실험실의 온도는 20℃를 유지하여 시험의 신뢰성을 높였다. 시험 방법은 기존의 압력판추출시험방법과 같으나 응력상태를 고려하기 위하여 시험 시작 전 시료에 상재하중을 주었으며, 체적변위를 측정하기 위하여 각 모관흡수력 단계마다 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 상재하중의 증가에 따른 건조과정의 함수특성곡선

본 시험 시료인 화강풍화토 건조과정의 함수특성시험 결과는 표 2와 같다. 그림 5는 건조과정의 시험결과를 Fredlund와 Xing(1994)의 함수특성곡선 이론식으로 분석하여 나타내었다.

시험에서 얻은 결과는 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식으로 분석한 것과 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 상재

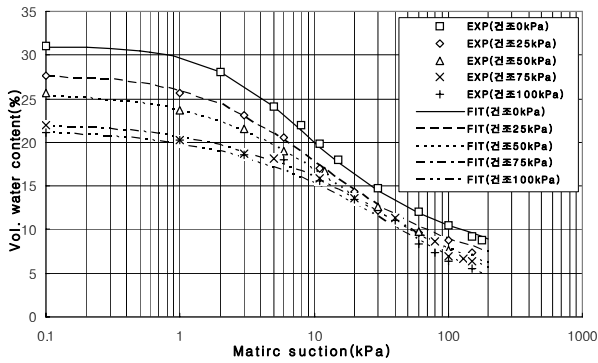


그림 5. 상재하중에 의한 건조과정 함수특성곡선

하중이 0kPa일시 초기포화시 체적함수비는 31%이며 상재하중이 100kPa일시 초기 포화시 체적함수비는 21.1%의 결과를 나타내었고 그림 5와 같이 상재하중이 25kPa, 50kPa, 75kPa인 상재하중 시험곡선은 상재하중이 0kPa과 100kPa 시험곡선 사이에 위치하게 된다. 즉 상재하중이 증가할수록 동일한 모관흡수력에 따른 체적함수비는 작아져 함수특성곡선은 아래에 위치한다는 것을 알 수 있다. 이는 지금까지의 연구결과와 일치함을 보여준다. 최종 모관흡수력 단계에

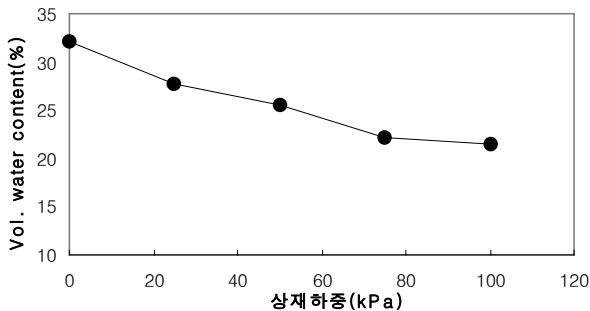


그림 6. 건조과정 단계의 상재하중에 따른 초기 포화시 체적함수비

표 3. 각 상재하중의 흡수력에 대한 습윤과정의 체적함수비 결과

0kPa		25kPa		50kPa		75kPa		100kPa	
흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)	흡수력 (kPa)	체적함수비 (%)
180	8.84	150	7.30	150	6.76	150	5.75	150	5.39
150	9.01	130	7.48	130	6.93	130	6.11	100	5.74
100	9.19	100	7.84	100	7.11	100	7.02	80	6.24
60	10.07	60	8.37	60	7.82	80	7.37	60	7.00
30	12.02	30	10.15	45	8.35	40	7.91	40	7.54
15	14.14	15	12.11	30	8.88	20	8.72	20	8.35
11	15.56	11	13.18	15	11.19	11	9.80	11	9.43
8	16.79	8	14.25	11	11.90	5	11.4	6	10.24
5	17.68	5	14.61	8	12.61	3	11.73	3	11.36
2	19.45	2	16.7	3	13.86	1	12.27	1	11.90
0.1	22.24	0.1	18.5	1	15.10	0.1	13.53	0.1	13.16
				0.1	16.88				

서도 마찬가지로 상재하중이 증가할수록 함수특성곡선은 아래쪽에 위치하는 결과를 나타내었다. 그림 6은 상재하중에 따른 초기 포화시 체적함수비를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 상재하중이 증가할수록 초기 포화시 체적함수비는 감소하는 경향을 보인다.

4.2 상재하중의 증가에 따른 습윤과정의 함수특성곡선

화강풍화토의 습윤과정의 함수특성시험 결과는 표 3이며 그림 7은 시험결과를 Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 이론식을 분석하여 나타낸 그림이다.

시험에서 얻은 결과는 건조과정에서와 같이 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식을 통하여 분석하였으며 상당히 일치하는 결과를 나타내었다. 상재하중이 증가할수록 함수특성곡선의 체적함수비는 작아지는 경향을 나타내었다. 이 역시 건조과정과 같은 경향을 보이고 있으며 기존의 시험결과와 일치함을 보여준다. 상재하중의 증가에 따른 체적함수비의 감소는 일정한 경향을 가지고 줄어드는 것은 아니지만, 상

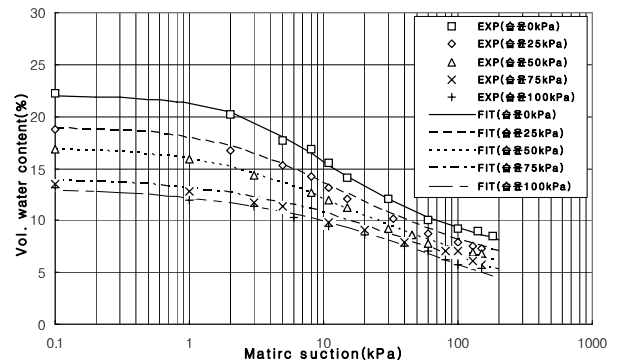


그림 7. 상재하중에 의한 습윤과정 함수특성곡선

재하중이 커질수록 체적함수비의 격차는 작아지는 결과를 보였다.

4.3 불포화 화강풍화토의 상재하중에 따른 영향

그림 5와 그림 7은 각각 건조과정의 함수특성곡선과 습윤과정의 함수특성곡선을 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식으로 분석하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시험결과와 Fredlund 와 Xing(1994)의 이론식을 통한 분석은 거의 일치하는 결과를 보인다. 또한 이 그림을 통하여 상재하중이 증가할수록 각각의 함수특성곡선은 어떠한 모관흡수력을 시작으로 감소의 폭이 커지는 것을 알 수 있으며, 일정한 모관흡수력이 되면 체적함수비가 수렴하는 것을 알 수 있다. 감소의 폭이 커지게 되는 곳의 모관흡수력이 공기 함입치이며 일정한 모관흡수력에서의 수렴하는 체적함수비가

표 4. 상재하중별 초기 포화시 체적함수비 및 최종 함수비

상재하중 (kPa)	초기 포화시 체적함수비(%)		최종 체적함수비(%)
	건조과정	습윤과정	
0	32.12	22.00	8.84
25	27.68	18.00	7.25
50	25.50	16.80	6.71
75	22.20	13.53	5.75
100	21.00	13.16	5.39

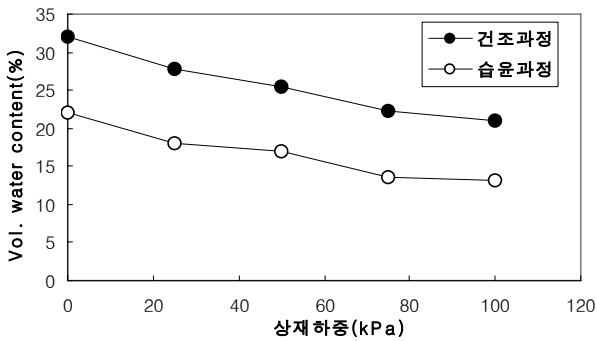


그림 8. 상재하중에 따른 건조과정과 습윤과정의 초기 포화시 체적함수비 비교

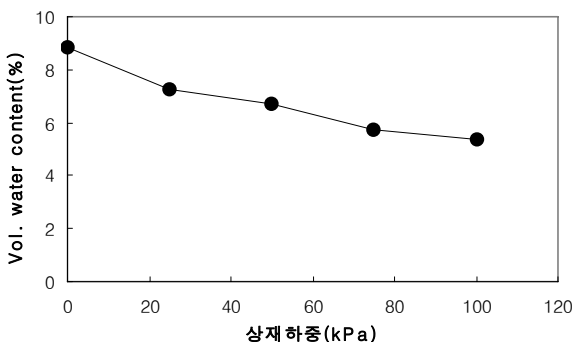


그림 9. 상재하중에 따른 최종 체적함수비 비교

잔류함수비이다. 공기 함입치는 상재하중이 커질수록 더욱 큰 값을 가지며, 잔류함수비는 상재하중이 커질수록 더욱 작아지는 것을 알 수 있다. 상재하중이 커질수록 함수특성곡선의 기울기는 더욱 완만해지는 경향을 나타낸다.

표 4는 초기 포화시 체적함수비와 최종 체적함수비의 결과이며 그 결과를 그림 8과 그림 9로 나타내었다. 초기 포화시 체적함수비는 건조과정과 습윤과정 모두 상재하중이 커질수록 감소하였으며, 최종 체적함수비 또한 상재하중의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그림 10은 초기 포화시 체적함수비의 건조과정과 습윤과정의 차이를 나타낸 그래프이다. 두 과정의 차이값은 상재하중의 증가에 따라 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 상재하중이 증가할수록 이력현상이 감소하는 정도를 알 수 있다.

그림 11, 그림 12 및 그림 13은 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식에 사용된 계수를 건조과정과 습윤과정을 구분하여 나타내었고, 표 5는 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식에 사용된 계수를 나타내었다. 그림 14는 상재하중에 따른 공기 함입치를 건조과정과 습윤과정으로 나타낸 그래프이다. 공기 함입치와 관련되는 a 계수는 상재하중이 증가할수록 커지는 경향을 나타내고 있다. 또한 상재하중이 증가할수록 건조과정의 a 계수와 습윤과정의 a 계수의 차이는 더욱 큰 차이를 보인다. 함수특성곡선의 기울기와 관련되는 n 계수는 상재하중이 커질수록 감소하는 경향을 보이고 있지만 a 계수와 같이 상재하중의 증가에 따라 습윤과정과 건조과정의 격차가 커지는 경향은 보이지 않고 같은 비율로 감소한다. 잔류함수비와 관련된 m 계수는 상재하중이 증가할수록 커지며, a 계수와 같이 상재하중의 증가에 따라 건조과정의 m 계수와 습윤과정의 m 계수의 차이는 더욱 커진다. 공기 함입치는 일정한 경향 없이 상재하중의 증가에 따라 커진다. 이러한 함수특성곡선의 상재하중에 따른 변화는 흙의 구조적 특성에 기인한 현상이다.

그림 15는 모관흡수력에 따른 포화도를 각 상재하중에

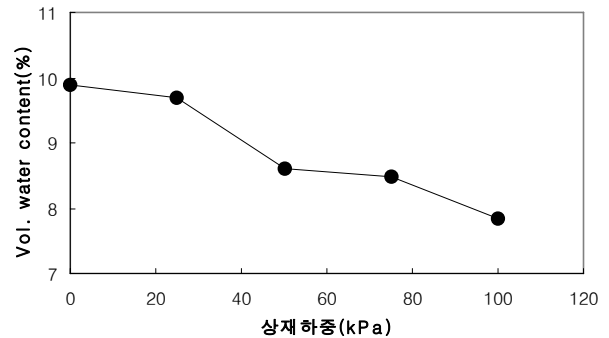


그림 10. 상재하중에 따른 건조과정과 습윤과정의 초기 포화시 체적함수비 차이

표 5. 대상 시료의 상재하중별 SWCC 계수

상재하중 (kPa)	a		n		m		공기함입치(kPa)	
	건조 과정	습윤 과정	건조 과정	습윤 과정	건조 과정	습윤 과정	건조 과정	습윤 과정
0	3.9	4	1.3	1.25	0.73	0.58	1.5	1.7
25	4.3	5	1.05	1	0.9	0.7	1.6	1.7
50	7	5.5	0.95	0.9	1.2	0.8	1.8	1.9
75	18	15	0.75	0.69	2	1.2	2	2.1
100	50	40	0.65	0.6	3	2	3	3.1

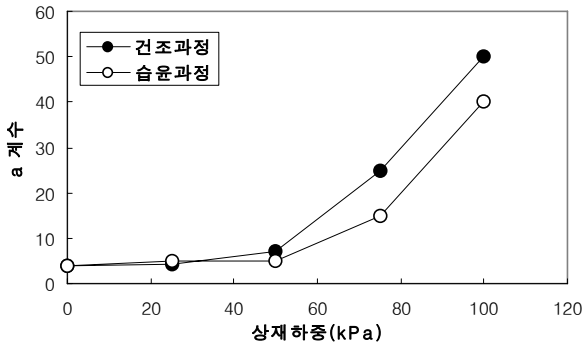


그림 11. 상재하중에 따른 a 계수의 변화

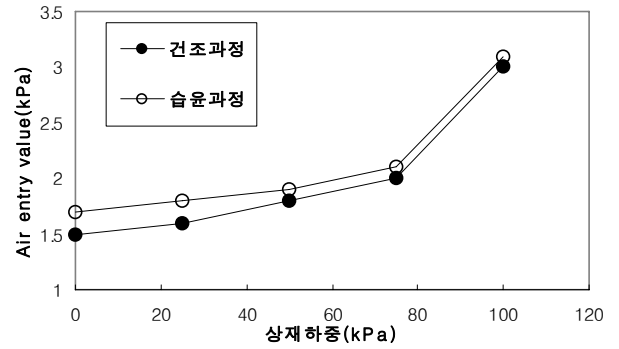


그림 14. 상재하중에 따른 공기함입치의 변화

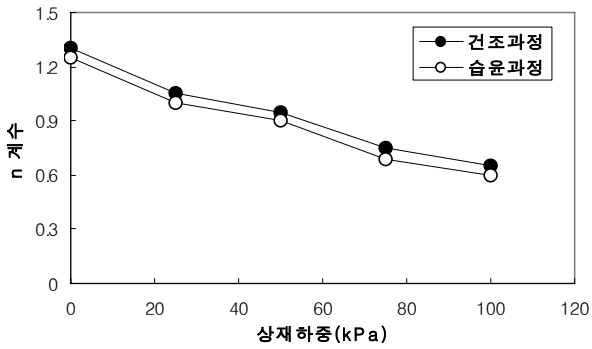


그림 12. 상재하중에 따른 n 계수의 변화

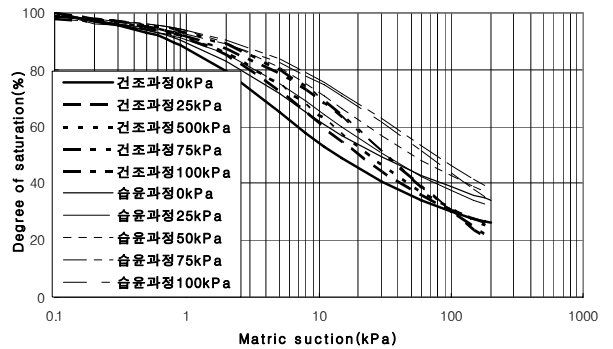


그림 15. 상재하중에 따른 포화도

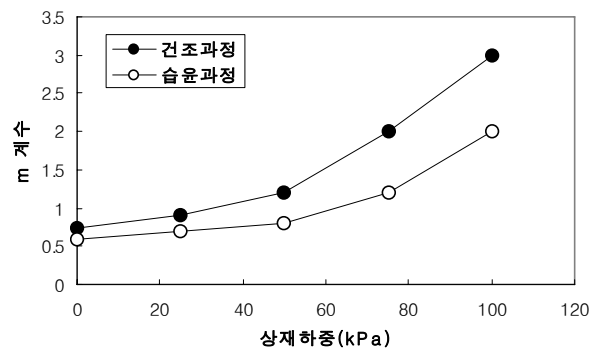


그림 13. 상재하중에 따른 m 계수의 변화

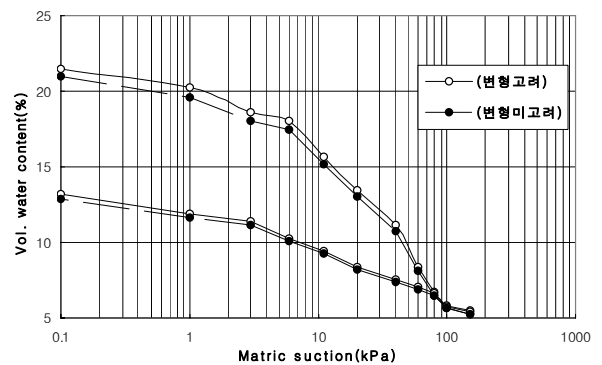


그림 16. 상재하중 100kPa 체적변형 고려 및 체적변형 미고려 함수특성곡선

따라 나타난 그래프이다. 건조과정 포화도는 습윤과정 포화도 보다 작은 값을 보인다. 또한 상재하중이 증가할수록 동일한 모관흡수력에서의 포화도는 증가한다. 이러한 특성을 보이는 이유로는 거시간극의 크기가 줄어들어 물의 보유능력이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 체적변형을 고려한 함수특성곡선

그림 16은 100kPa의 상재하중에 따른 함수특성곡선을 체적변형을 고려할 시와 고려하지 않을 시를 그래프로 나타낸

그림이다. 각 모관흡수력 단계시 시료는 체적의 변화를 나타내었으며 100kPa의 상재하중에서 가장 큰 변형을 나타내었다. 또한 건조과정과 습윤과정에서 모두 체적변형이 발생하였다. 이 그림에서 체적변형을 고려한 함수특성곡선은 체적변형을 고려하지 않은 함수특성곡선보다 미세하게나마 위쪽에 위치하게 되고 있음을 보인다. 이는 기존의 연구결과인 모관흡수력은 습윤과정시 체적의 변화를 주어 함수특성곡선을 변화시킨다는 결과와 일치된 경향을 보인다(Ng와 Pang, 2000).

5. 결 론

본 연구에서는 팔공산 화강풍화토에 대한 함수특성곡선을 Fredlund와 Xing(1994)의 이론식과 시험을 통하여 구하였다. 본 시료가 겪을 수 있는 상재하중을 고려하였으며, 상재하중에 의한 체적변형, 흡수력에 의한 체적변형을 고려하여 함수특성곡선을 나타내었다. 본 시험에 고려한 요소를 바탕으로 함수특성곡선의 특징과 관련하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 시험에 사용된 팔공산 화강풍화토는 상재하중이 증가함에 따라 동일한 흡수력에서의 체적함수비는 감소하였다. 체적함수비의 차이는 상재하중의 증가에 따라 점점 작아지는 결과를 나타내었으며 공기함입치는 증가하였다. 또한 흡수력 전이구간에서의 기울기와 잔류함수비는 감소되었고 이력현상은 상재하중의 증가에 따라 감소하였다.
- (2) 초기 포화시 체적함수비와 최종 체적함수비의 차이는 상재하중이 증가할수록 작아진다. 이는 높은 상재하중으로 인하여 간극의 크기가 작아져 흡수력에 따른 체적함수비의 변화가 적어졌기 때문이다.
- (3) Fredlund와 Xing(1994)의 이론식의 계수인 a 계수와 m 계수는 상재하중이 증가할수록 증가하였으며, 상재하중이 커질수록 더 큰 차이를 보이며 증가하였다. 또한 건조과정과 습윤과정에서의 두 계수는 같은 상재하중의 건조과정에서 크며, 상재하중이 증가할수록 그 차이는 더욱 크게 나타난다. n 계수는 상재하중의 증가에 따라

일정한 경향이 없이 감소하였으며, 건조과정의 n계수가 습윤과정 보다 미소하게 크게 나타났다.

- (4) 체적변위를 고려한 함수특성곡선과 고려하지 않은 함수특성곡선의 차이는 체적변형이 고려된 함수특성곡선이 미 고려된 함수특성곡선보다 미세하게 큰 값을 나타낸다. 이는 기존의 연구결과(Ng와 Pang, 2000)와 유사한 경향을 보인다.
- (5) 포화도는 상재하중이 증가할수록 동일한 흡수력에서 높은 포화도를 나타내며, 건조과정보다 습윤과정의 포화도가 높게 나타난다. 이는 상재하중의 증가에 따라 흙의 구조가 보다 치밀해져 동일한 흡인력에서 상대적으로 물을 보유할 수 있는 능력이 커졌다는 것을 의미한다.

참 고 문 헌

1. 박재영(2007), *상재하중이 불포화풍화토의 함수특성곡선 및 사면의 안정성에 미치는 영향*, 석사학위 논문, 단국대학교, pp. 25~36.
2. 성상규, 이인모(2003), *화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향*, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 19, No. 2, pp. 27~38.
3. 오세봉, 문중호, 김태경, 김윤기(2008), *불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례 연구*, *대한토목학회논문집*, Vol. 28, No. 3C, pp. 167~178.
4. Bear, J.(1979), *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, pp. 569.
5. Brook, R. H. and A. T. Corey(1964), *Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrology Papers*, Colorado States University, Fort Collins, Colorado, pp. 27.
6. Fredlund, D. G. and Xing, A.(1994), *Equations for Soil-Water Characteristic Curve*, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 533~546.
7. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W.(2000), *Influence of Stress State on Soil-Water Characteristics and Slope Stability*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 2, pp. 157~166.
8. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W.(1996), *Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction*, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379~392.
9. van Genuchten(1980), *A Closed-Form Equation of Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892~898.

(접수일: 2010. 1. 26 심사일: 2010. 2. 25 심사완료일: 2010. 4. 6)