

플로우 펌프기법을 이용한 포천지역 화강 풍화토의 함수특성곡선

Soil-Water Characteristic Curve of Weathered Granite Soils in Pocheon Area using Flow Pump Technique

이강일^{*†} · 이준용^{**} · 백원진^{***}

Lee, Kang Il^{*†} · Lee, Joon Yong^{**} · Back, Won Jin^{***}

ABSTRACT

Flow pump technique was used in order to determine the soil-water characteristic curve of weathered granite soils in Pocheon area. This technique enables measurement to be more convenient and accurate as it is based on the CU condition of triaxial compression test. Besides, it is also able to measure dry and moisture curves continuously since the test is controlled by means of a computer automatically. In this study, not only a hydraulic conductivity of weathered granite soils at fully saturated state in Pocheon area, but also a soil-water characteristic curve throughout unsaturate flow tests were determined. In addition, Brooks and Corey's model and Genuchten's model were used to simulate the soil-water characteristic curve. On the basis of the simulation an unsaturate hydraulic conductivity was predicted.

Keywords: Flow pump technique; soil-water characteristic curve; hydraulic conductivity

1. 서 론

불포화토에 대한 연구는 Bishop (1960)을 비롯한 여러 지반공학자들에 의해 기초적인 연구가 진행되어 왔으나 Fredlund and Morgenstern (1977)에 이르러 이론적인 체계를 이루었다. 불포화토와 관련된 대부분의 문제들은 비선형이기 때문에 초기에 이러한 문제들을 해결하기가 어려웠지만 1960년대 이후 발달된 컴퓨터 기술과 수치해석 방법들로 이제는 보다 쉽게 해결할 수 있게 되었다. 지금까지 함수특성곡선 (soil-water characteristic curve, SWCC)에 대한 연구는 입도분포, 습윤단위중량과 간극비로부터 예측하는 방법과 실험을 통해 측정하는 방법이 있다. 예측방법으로는 Wilson, Fredlund와 그의 아

들 Murray D. Fredlund (1997)는 함수특성곡선을 변화시키는 중요한 요소인 흙의 입도분포, 건조밀도, 간극비 그리고 흙의 비중과 그에 상응하는 함수특성곡선을 이용하여 전 세계 각지의 6000여 가지 흙을 분류시켜 프로그램화하는 소프트웨어를 개발하였다. 그러나 이와 같은 방법들은 그 정확도에 있어 의문이 제기되고 있다. 그 이유는 함수특성곡선은 불포화토의 고유한 물성이므로 실험측정으로 구하는 것이 정확하다고 보는 견해가 우세하기 때문이다.

실험에 의한 불포화토의 함수특성곡선 결정방법을 검토해 보면 Shuai et al. (2003)은 흙의 석션 값을 0~1500 kPa의 범위를 보다 빠르게 측정할 수 있는 새로운 Thermal conductivity sensor를 개발하여 사용하고 있고 Leong et al. (2002)은 함수특성곡선을 산정하는데 수행되는 Filter paper 방법에 영향을 주는 요소에 대하여 연구하였다. 그 외에도 룯드 선단에 센서 (fine porous ceramic sensing tip)를 부착하여 현장에서 이용할 수 있도록 한 Tensiometers법이 있지만 이는 불포화시료의 간극수압은 부압을 갖게 되어 높은 흡입력에서는 간극수압의 측정이 불가능하다. 이런 경우 흡입력을 측정하기 위해 고압공기 투과판 (high air entry ceramic disk)이나 멤브레인을 이용하여야 하는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해

* 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수

** Graduate Student, Department of Civil Engineering, University of Colorado at Boulder

*** 전남대학교 농업생명과학대학 생물산업공학과 조교수

† Corresponding author. Tel.: +82-31-539-2024

Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr

2008년 11월 3일 투고

2008년 12월 23일 심사완료

2008년 12월 23일 게재확정

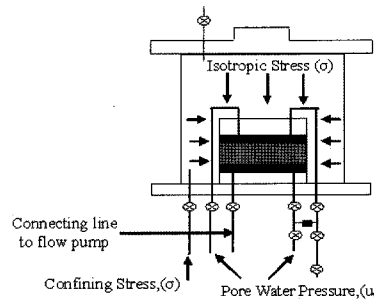
Hilf (1956)에 의해 개발된 축 이동기법을 도입한 압력판 장치 (pressure plate apparatus)를 이용하는 방법이 있다. 하지만 이들 모든 방법들은 연속적인 데이터가 아닌 한 점 한 점의 결과를 측정할 수밖에 없고, 비용, 시간, 실험자의 측정 오류 등과 같은 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 단점을 보완한 플로우 펌프 기법 (flow pump technique)으로 함수특성곡선을 연속적이고 정확하게 측정하고자 한다. 본 연구에서 사용되어지는 플로우 펌프 기법은 포화투수계수 (saturated hydraulic conductivity)의 측정방법을 개선하기 위해서 1966년 Olsen에 의해서 처음 도입되었다 (Olsen, 1966). 그 후 1991년 Znidarcic, Illangasekare, 그리고 Manna가 플로우 펌프기법을 응용한 방법을 함수특성곡선을 측정하는데 이용하였다 (Znidarcic et al., 1991). 위 방법의 장점은 다른 방법들에 비해 상대적으로 비용이 저렴하여 자동화가 가능하고, 실험 진행자에 따른 측정오류의 영향을 덜 받으며, 비교적 짧은 시간에 함수특성곡선을 측정할 수 있다 (Kim and Hwang, 2003). 본 연구는 이와 같이 자동화가 가능한 플로우 펌프기법을 이용하여 화강 풍화토에 대한 함수특성곡선을 얻고 이로부터 불포화 투수계수를 예측하였다.

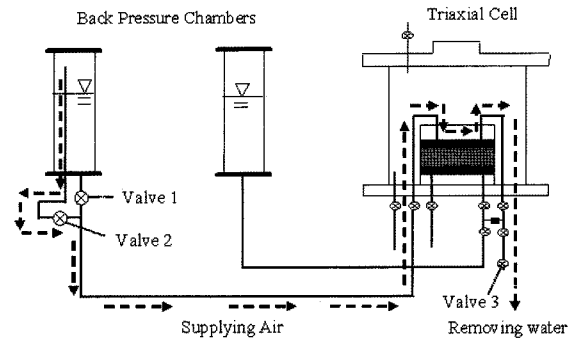
II. 플로우 펌프기법

플로우 펌프 기법은 삼축압축시험 (특히 비배수 압밀 실험, consolidated undrained test)에 그 원리를 두고 있다. Fig. 1(a)는 구속압력과 배압에 의해 포화된 삼축압축상태를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 불포화흐름 실험을 하기 전에 흡 시료 윗부분에 있는 물을 공기를 통해 제거해주는 과정을 나타낸 것이다. 밸브 1을 잠그고 밸브 2와 밸브 3을 오픈하면 왼쪽 배압판 안에 있는 작은 관으로부터 공기가 흐르기 시작하여 흡 시료 윗부분에 있는 물을 제거할 수 있다. 물을 완전히 제거한 후 밸브 3을 닫으면 흡 시료의 상부와 상부고정판 사이에는 간극공기압이 적용된다. Fig. 1(c)는 흡 시료의 윗부분에 간극공기압이, 흡 시료 아랫부분에는 간극수압이 존재하고 있음을 보여주고 있으며 불포화토 실험시 밸브 3과 밸브 4를 닫음으로써 플로우펌프 작동시 흡 시료내에서 흡입력의 변화를 측정할 수 있도록 해준다.

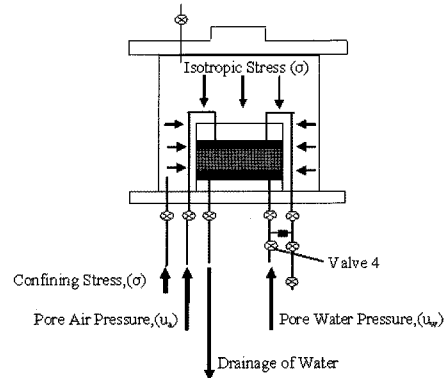
플로우 펌프기법을 이용하여 불포화토 내의 흐름에 관한 실험 이전에 흡 시료를 완전 포화시키고 이 상태에서 플로우 펌프의 속도를 변화시키면서 발생하는 수두차를 이용하여 흡 시료의 투수계수를 측정한다. 그리고 불포화흐름 실험을 하기 위해서 우선적으로 흡 시료의 윗부분과 상부고정판 사이에 있는 물을 왼쪽 배압기와 연결되어 있는 두 개의 밸브 중 물과 연결되어진 밸브를 잠금으로서 공기를 투입하여 제거한다 (Fig.



(a) Isotropic loading system for full saturation



(b) Removing water between top platen and top of soil

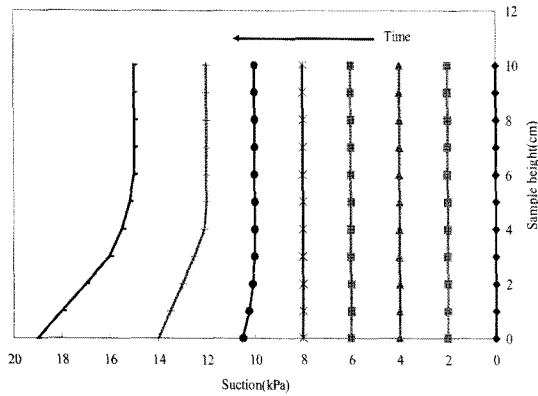


(c) Measurement of suction

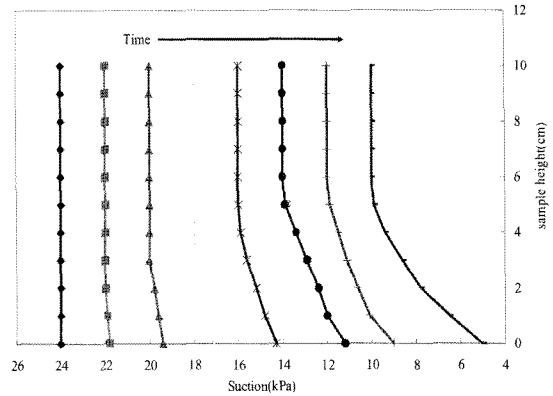
Fig. 1 Test procedures for measuring suction

1(b) 참조). 그리고 변환기는 배압에 의한 상부고정판과 흡 시료 사이에 존재하는 간극공기압과 플로우 펌프에 의한 하부고정판과 흡 시료 사이에 존재하는 간극수압을 측정하여 흡입력을 계산할 수 있다 (흡입력=간극공기압-간극수압).

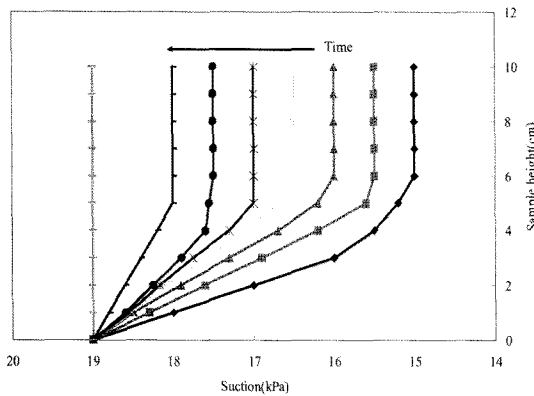
일반적으로 불포화투수계수는 흡입력이 증가함에 따라 매우 작은 값으로 감소되어지는 경향을 보인다. 또한 불포화투수계수는 포화도와 함수관계를 가지므로 흡 시료의 포화도가 변화되면 불포화투수계수도 함께 변화하게 되며 비선형적인 특징을 보여준다. 따라서 불포화투수계수에 맞춰 적절한 펌프의 유속을 결정하는 것은 매우 어려운 일이며 또한 매우 낮은 펌프의



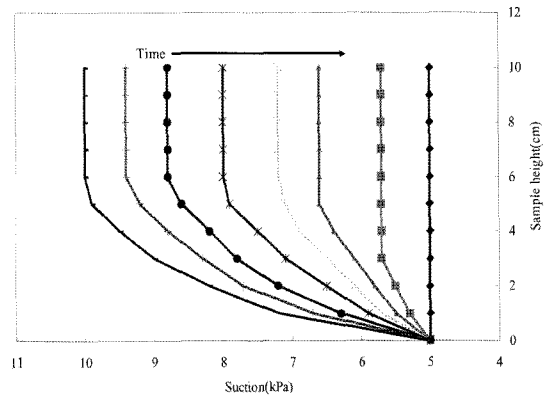
(a) When faster flow rate applied



(a) When faster flow rate applied



(b) When specified suction applied at the bottom of the soil



(b) When specified suction applied at the bottom of the soil

Fig. 2 Examples of suction profiles (drying procedure)

Fig. 3 Examples of suction profiles (wetting procedure)

유속을 사용하게 된다면 매우 오랜 실험소요시간이 요구된다. 플로우 펌프기법에서 사용된 유속은 일반적으로 불포화도에서의 투수계수보다 빠르기 때문에 흡입력 분포가 흙 시료 전역에 걸쳐 균질하게 나타나지 않으며 이때의 흡입력과 함수비는 함수특성곡선이 아닌 흡입력 반응치와 겉보기 포화도가 된다 (Fig. 2(a) 및 3(a)). 따라서 시료체내의 흡입력을 충분한 시간 동안 유지시킴으로 인해서 흡입력분포와 함수비분포가 공시체 전역에 걸쳐 균질하게 분포할 수 있도록 해야 하며 (Fig. 3(b) 및 3(b)) 이 때 측정되어진 흡입력과 포화도가 흙 시료 전체를 대표한다고 하겠다.

실험을 통하여 얻어지는 측정값은 흙 시료 내의 흡입력변화에 의한 전기신호 값과 플로우 펌프의 작동시간 값이다. 전기신호값은 격판 (diaphragm) 보정 값에 따라 전기신호 값을 수 두 값 또는 흡입력 반응치로 변환할 수 있다. 따라서 시간에 따른 흙 시료의 포화도 또는 겉보기 포화도 값과 체적함수비는 플로우 펌프의 작동으로 유발된 시간에 따른 물 흐름의 변화량으로서 계산되어질 수 있다 (식(1)).

$$S (time) = \frac{V_w (time)}{V_{v0}}, \theta = n \times S (time) \quad (1)$$

여기서, S (time)는 시간에 따른 변화된 포화도 또는 겉보기 포화도, V_{v0} 는 포화도가 100%일때의 간극의 부피, $V_w (time)$ 는 시간에 따른 간극수의 부피, n은 간극률, θ 는 용적함수비이다.

III. 실험장치 및 절차

1. 실험장치

플로우 펌프기법을 이용한 함수특성곡선 측정방법의 주요 실험 장치로는 플로우 펌프 (flow pump), 변환기 (transducer), 삼축압축셀 (triaxial cell), 다공석 (porous stone) 등이 있으며 (Fig. 4, 5, 6), 본 연구에서는 University of Colorado at Boulder의 지반공학연구실에서 보유하고 있는 장비를 이용하였다.

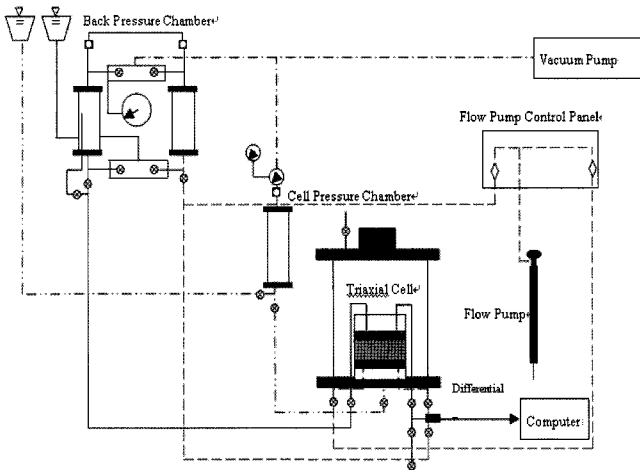


Fig. 4 Schematic drawing of flow pump

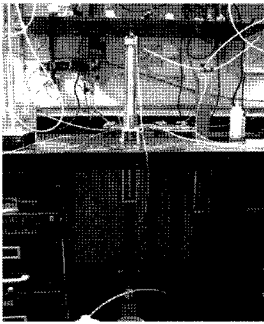


Fig. 5 Flow pump

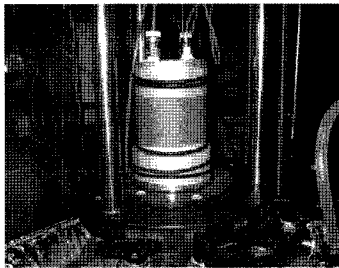


Fig. 6 Soil specimen

가. 플로우 펌프

플로우 펌프는 Fig. 5와 같으며 펌프의 목표 위치가 0mm이면 펌프는 목표위치로 하강하면서 건조과정 (drying)을 수행하게 되고, 반면에 펌프의 목표위치가 300mm이면 펌프는 목표 위치로 상승하면서 습윤과정 (wetting)을 수행하게 된다. 펌프의 길이는 300 mm이며 면적은 792 mm²이다. 펌프의 유속범 위는 2.90×10⁻² mm³/sec에서 1.34×10² mm³/sec이며 측정대 상 불포화토의 흡입력에 따라 펌프의 속도를 조정할 수 있다. 이 장치는 연속적이고 안정적인 물의 흐름을 제공해주며 함수 특성곡선을 찾는 데 가장 중요한 역할을 한다.

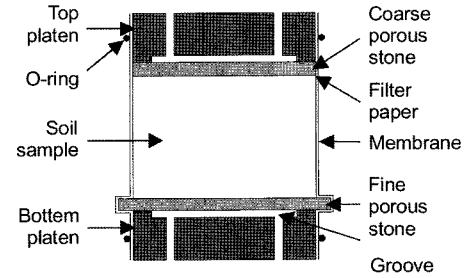


Fig. 7 Schematic drawing of the specimen assembly for soil sample test

나. 변환기

간극수압 또는 부 간극수압을 측정하기 위해서 Validyne Engineering Corporation 사의 DP215-50 모델 압력차이 변환기 (differential pressure transducer)가 사용되었다. 변환기 내부에 설치되어져 있는 격판 (diaphragm)이 변환기 양쪽에 전해진 압력차를 전기적 신호로 변환시켜준다. 변환기는 흡 공시체의 위쪽과 아랫부분에 연결되어져 있으며 공시체 윗부분에서는 배압에 의한 기준압력 (reference pressure)이 공시체 밑 부분에서는 플로우 펌프의 작동에 따른 유도압력 (induced pressure)이 작용하는데 이 압력 차이를 측정하게 되며 변환기의 보정치 (transducer coefficient)는 17.23 kPa/volt이다.

다. 삼축압축기와 고정판

플로우 펌프기법을 이용한 함수특성곡선 측정을 위해 삼축압축기를 개조하여 사용하였으며, 흡 공시체를 고정하고 펌프 작동에 따른 물의 흐름을 원활히 해주기 위해서 공시체 위와 아래에 고정판을 이용하였고 또한 원활한 물의 흐름을 제공하기 위해서 고정판의 면에 많은 홈 (groove)을 만들었다 (Fig. 6, 7).

라. 다공석

세립다공석 (fine porous stone or high entry value porous stone)과 조립다공석 (coarse porous stone)이 실험에 사용되었다 (Fig. 7). 세립다공석은 Soil Moisture Equipment Corporation 사에서 제작된 것으로 세라믹 재질이다. 세립다공석은 공기와 흡 입자들을 아래쪽으로는 이동을 제한하지만 플로우 펌프의 작동에 의한 물의 흐름은 제한하지 않는다. 본 실험에서는 공기침입값이 1.0 bar인 세립다공석이 사용되었으며 이 세립다공석은 현재 비교적 널리 사용되는 함수특성곡선 측정방법의 하나인 압력셀 방법에서의 모세관장벽 (capillary barrier)과 유사한 역할을 한다 (Corey, 1994). 조립다공석은 흡 공시체의 위쪽에 설치되며 세립다공석과는 달리 물과 공기의 흐름은 허용하되 흡 입자의 위쪽으로는 이동만 제한한다.

2. 시료의 특성

실험에 사용된 흙 시료는 우리나라 전역에 가장 넓게 분포하고 있을 뿐만 아니라 가장 이용도가 많은 풍화 화강토를 사용하였다. 이 시료는 건설현장에서 쉽게 접하는 흙으로서 풍화의 진행 정도에 따라 흙 입자간 간극과 흙 입자내의 간극이 잘 발달되어 있어 하중을 받으면 큰 변형이 발생되며 변형량은 간극비에 크게 의존하는 특징을 가지고 있다. 시료는 입자가 매우 조립인 경기도 포천지역에서 채취를 하였으며 공학적 특성은 Table 1 및 Fig. 8과 같이 통일분류상 SM에 해당하며, No.200번체 통과량이 17.2%이다. 또한 Fig. 9와 같이 다짐실험에서 얻은 최적 함수비가 11.6%이고 최대건조단위중량은 18.1 kN/m³이며 풍화도를 파악하기 위해 강열감량시험을 실시한 결과 Table 1과 같이 2.8%로 중풍화토에 해당한다. 또

Table 1 Material properties

Sample location	Compaction test		Atterberg's limit		#200 (%)	G _s	Ignition loss (%)	Void ratio (eo)	USCS
	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C (%)	Liquid (%)	Plastic (%)					
Pocheon	18.1	11.6	N.P		17.2	2.67	2.80	0.43	SM

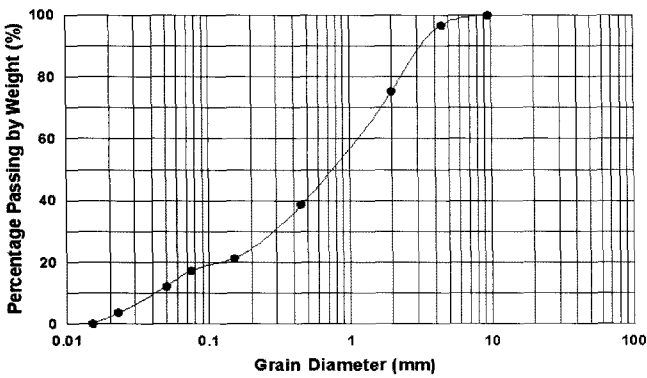


Fig. 8 Particle size distribution curves

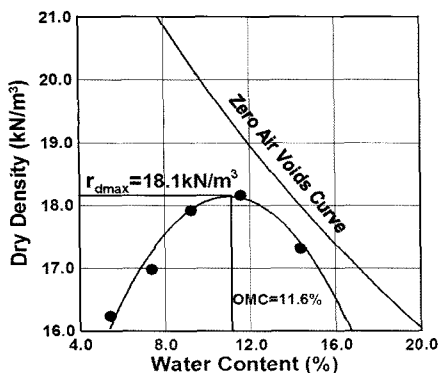


Fig. 9 Dry density-water content relationship

한 공시체 제작 후 측정된 실험값으로부터 계산된 초기 공극비는 0.43이다.

3. 실험절차

가. 공시체 준비

Fig. 8과 같은 다짐곡선으로부터 얻은 최적함수비 및 최대건조밀도 조건에 맞도록 최적함수비상태로 시료를 잘 혼합한 뒤 공시체 제작몰드에 시료를 넣고 FAMCO Machine Corporation사에서 제작한 4RBA 모델로 시료의 균질한 다짐을 위해 몰드에 시료를 전부 투입한 후 하중을 일시에 가하는 방식으로 공시체를 제작하였다. 실험에 사용된 공시체의 직경은 67.5 mm이며 공시체 높이는 44 mm이다. 이때 공시체의 시료와 조립 다공석 사이에는 여과지 (filter paper)를 사용하여 흙 입자의 유출을 방지하였다. Fig. 6과 같이 시료가 삼축압축기 내에 설치되면 진공을 가한 뒤 삼축압축기 셀에 물을 채우고 구속압력을 가한다. 본 실험에서는 500 kPa의 구속압력과 400 kPa의 배압을 사용했는데, 이렇게 비교적 높은 구속압력을 사용한 이유는 첫째, 시료를 포화시키기에 유리하며 둘째 축 이동기법 (Hilf, 1956)을 적용할 수 있기 때문이다.

나. 시료의 포화

본 실험에 있어서 중요한 점들 중의 하나가 초기값을 아는 것이다. 만약 실험을 시작하기 전에 실험시료가 100% 포화되어 있지 않으면 실험 측정값의 초기값을 정하는데 많은 어려움이 있다. 그러므로 본 실험에서는 실험이 시작되기 전에 실험시료를 100% 포화시킨 후 건조과정 이후 흡수과정을 거치는 순서로 함수특성곡선을 측정했다. 실험시료를 포화시키기 위하여 시료에 진공을 가한 뒤, 물속에 녹아있는 공기를 제거한 증류수를 실험시료의 진공이 된 간극에 채워 넣었다. 이때 높은 구속압력의 범위 내에서 높은 배압을 가함으로써 실험시료의 포화상태를 보다 확실하게 했다. 간극속에 남아있을 수 있는 공기방울에 높은 배압을 가함으로써 Henry의 법칙에 따라 남아있던 공기방울을 간극수 안으로 녹여 흡수시키는 것이다. 그 후 포화된 실험시료의 포화도를 확인하기 위해서 B값을 측정하였다.

다. 플로우 펌프 작동

실험시료의 포화도를 확인한 뒤, 함수특성곡선 측정을 시작하기 전, 조립 다공석을 포함한 실험시료의 윗부분에 위치한 물을 모두 제거하였다. 함수특성곡선 측정 전에 실험 시료 윗부분의 물을 제거하는 이유는 플로우 펌프의 작동으로 실험시료내의 간극수를 움직여 실험시료의 포화도를 낮춰 가는데 실

험시간을 많이 단축시킬 수 있기 때문이다. 이렇게 펌프의 작동에 의해 변화되는 실험시료의 포화도와 또 그에 상응하는 실험시료 내부의 흡입력 변화를 함께 측정함으로써 함수특성곡선을 구할 수가 있다. 이때 플로우 펌프는 실험계획에 따라 적절한 속력과 방향으로 작동된다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 완전 포화시 투수계수 결정

불포화도 흐름 실험을 하기 이전에 완전 포화된 상태에서의 플로우 펌프에 의한 constant flow rate를 이용하여 투수계수를 측정하였다. Fig. 10 및 Table 2는 포천 화강풍화토의 투수계수 (k_s)에 대한 시험결과를 나타낸 것으로 투수계수는 변환기로부터 Δh (평균수두값-기준점)를 측정 (Fig. 10)한 뒤 식 (2)를 이용하여 구하였다. 이와 같은 시험결과로부터 포천 화강 풍화토의 포화투수계수 (k_s)는 2.35×10^{-5} cm/sec이었다.

$$k_s \text{ (mm/sec)} = \frac{v}{i} \quad (2)$$

여기서, $\Delta h \text{ (mm)} = \Delta h \text{ (volt)} \times \text{변환기 보정치 (mm/volt)}$

$$i = \frac{\Delta h \text{ (mm)}}{\text{시료높이 (mm)}}$$

$$v \text{ (mm/sec)} = \text{펌프속도 (mm/sec)} \times \frac{\text{펌프단면적 (792mm}^2\text{)}}{\text{시료면적 (mm}^2\text{)}}$$

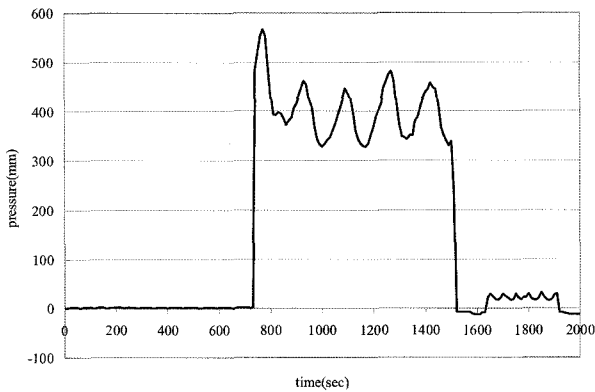


Fig. 10 Head loss by constant flow rate under full saturation

Table 2 Calculation of saturated hydraulic conductivity

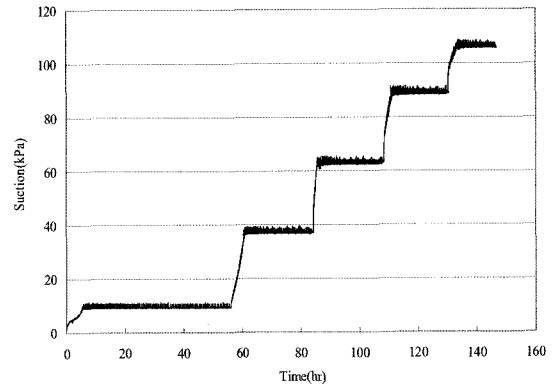
Δh (mm)	i	Pump velocity (mm/sec)	v (mm/sec)	k_s (mm/sec)
402.83	9.15522	0.01	0.002213	0.00024
20.8352	0.4753	0.0005	0.000111	0.00023
			Average k_s	0.000235

2. 불포화흐름 실험을 통한 함수특성곡선 (SWCC) 결정

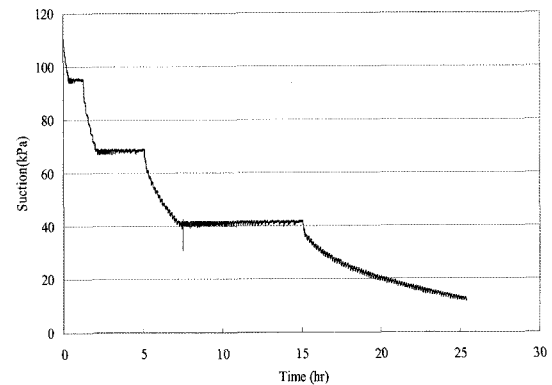
포화투수계수 결정 후 함수특성 곡선을 결정하기 위하여 흡수시료에 대하여 연속적으로 실험을 실시하였다. 전술한 바와 같이 임의의 시료에 대한 가장 적합한 펌프의 속도를 모르기 때

Table 3 Suction values and elapsed time in each stage

Bottom boundary condition	Drying procedure			Wetting procedure		
	Velocity (mm/sec)	Suction (kPa)	Duration time (hr)	Velocity (mm/sec)	Suction (kPa)	Duration time (hr)
1st	0.00011		6.21	0.000011		0.46
2nd		10.78	49.60		90.16	0.76
3rd	0.000044		5.52	0.000011		0.96
4th		38.71	22.72		65.17	2.93
5th	0.000044		2.16	0.000011		2.33
6th		65.17	21.82		38.71	7.64
7th	0.000022		3.77	0.000011		10.32
8th		90.16	18.00			
9th	0.000011		4.41			
10th		107.8	12.22			

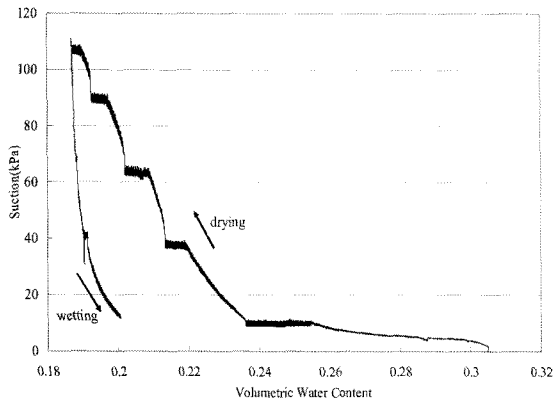


(a) Drying procedure

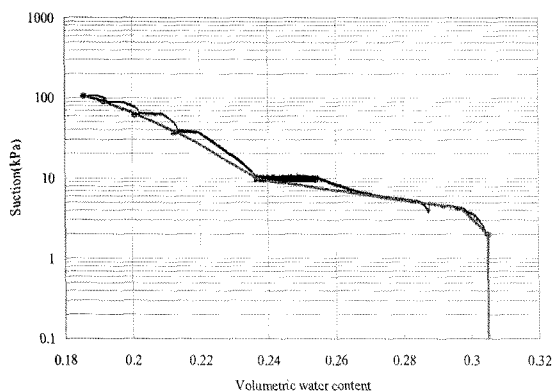


(b) Wetting procedure

Fig. 11 Suction-time relationship



(a) Volumetric water content-suction relationship



(b) SWCC

Fig. 12 SWCC by using flow pump technique(n=0.305)

문에 임의의 펌프속도를 가정하여 주고 실험 시작 전에 설정해 놓은 임의의 흡입력에 도달하면 일정 시간동안 바닥경계조건을 흡입력으로 변환하여 흡입력이 흠 시료에 균질하게 이르게 하도록 하였다. 그 후 다시 다음 단계의 펌프속도를 주는 방법으로 Table 3 및 Fig. 10과 같이 건조과정은 총 10단계, 습윤과정은 총 7단계 과정을 통하여 각 단계별 (펌프속도별) 시간에 따른 흡입력 값을 측정하였다. 건조과정의 경우는 총 146시간이 습윤과정은 25.4시간이 소요되어 약 7일 반 정도가 걸렸으며 각 단계별 펌프속도에 의한 유속에 따른 흡입력 값은 Fig. 11과 같이 양호하게 측정되었다.

Fig. 12(a)는 Fig. 11의 시간에 따른 흡입력 값을 체적함수비 대 흡입력 값으로 변화하여 나타낸 것이며 건조과정과 습윤과정을 함께 도시하였다. 또한 Fig. 12(b)는 Fig. 11의 건조과정에서 각 단계별 펌프속도에서 흠이 균질한 상태 (즉, 흡입력이 일정한 상태)에 이른 후 얻어진 흡입력에 대한 값들의 각 점들을 서로 연결하여 비선형 곡선을 얻었다. 이 곡선은 간극율 (n)이 0.305인 상태의 포천 화강풍화토에 대한 함수특성곡

선을 나타낸다.

3. 함수특성곡선을 통한 불포화투수계수의 예측

플로우펌프 기법을 이용하여 실험한 함수특성곡선을 Brooks and Corey (1964)와 Van Genuchten (1980) 모델로 표현하였으며 또한 이 두 모델의 함수특성곡선을 가지고 포천지역 화강 풍화토의 불포화도 투수계수를 예측하였다.

가. Brooks and Corey 모델을 통한 불포화 투수계수 함수의 예측

1964년 Brooks와 Corey는 함수특성곡선과 불포화도 투수계수를 예측할 수 있는 식들을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = \begin{cases} 1 & \psi < \psi_e \\ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{\psi_e}{\psi} & \psi \geq \psi_e \end{cases} \quad (3)$$

여기서, θ : 임의의 모관흡수력에서 정규체적 함수비

ψ : 모관 흡수력,

ψ_e : 공기함입치

θ : 체적함수비,

θ_r : 잔류체적함수비

θ_s : 포화시 체적함수비,

$1/b$: 간극크기분포

따라서 체적함수비는 식 (4)와 같이 표현될 수 있으며 식 (5)를 통하여 불포화도의 투수계수 (k)를 예측할 수 있다.

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \psi < \psi_e \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left(\frac{\psi_e}{\psi}\right)^{1/b} & \psi \geq \psi_e \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \begin{cases} k_s & \text{when } \psi < \psi_e \\ k_s \times \left(\frac{\psi_e}{\psi}\right)^{2+2.5/b} & \text{when } \psi \geq \psi_e \end{cases} \quad (5)$$

Fig. 12(b)에서 얻어진 함수특성곡선과 상기의 식을 통하여 최소자승법과 시행착오법 (b값)으로 Table 4와 같은 매개변수를 얻을 수 있으며 이와 같은 매개변수를 이용하여 Fig. 13과 같은 함수특성곡선을 표현할 수 있고 더불어 각 흡입력별로 불포화투수계수를 예측할 수 있다.

Table 4 Parameter values of Brooks and Corey model

Variable	θ_r	θ_s	ψ_e	b	k_s (cm/sec)
Value	0.12	0.305	2.94kPa	3.7	2.35×10^{-4}

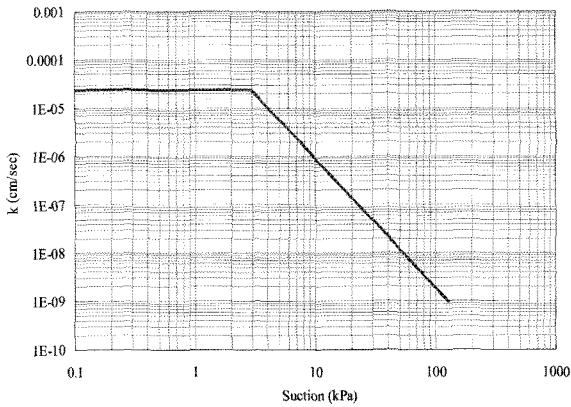
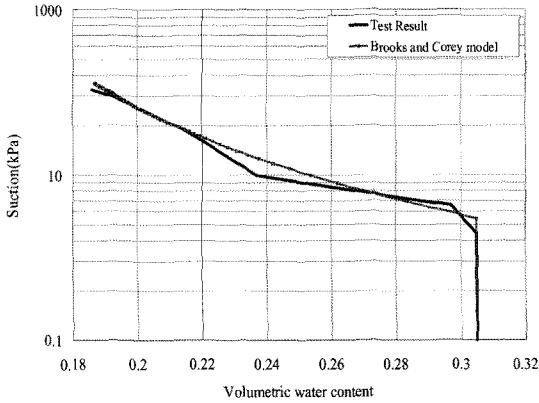


Fig. 13 SWCC using Brooks and Corey model

나. Van Genuchten모델을 통한 불포화 투수계수 함수의 예측
1980년 Van Genuchten은 세 가지의 곡선변수를 가지고 함수특성곡선과 불포화도 투수계수를 예측할 수 있는 식들을 제안하였다.

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (6)$$

- 여기서, α : 공기함입치와 관련된 계수
- n : 함수특성곡선의 변곡점에서의 기울기와 관련된 계수
- m : 높은 모관흡수력 범위에서의 곡선기울기와 관련된 계수

따라서 체적함수비는 식 (7)과 같이 표현될 수 있으며 식 (8)을 통하여 불포화도의 투수계수를 예측할 수 있다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m \quad (7)$$

Table 5 Parameter values of van Genuchten model

Variable	α	n	m
Value	0.295	1.31	0.24

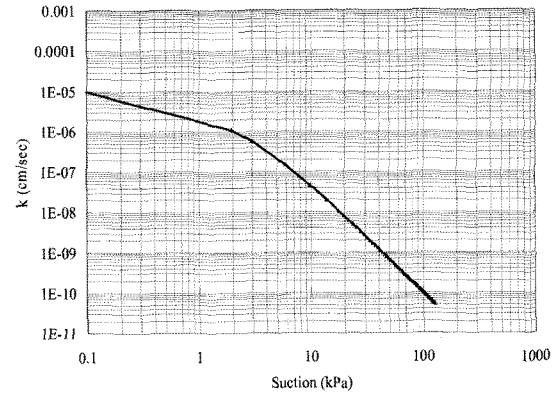
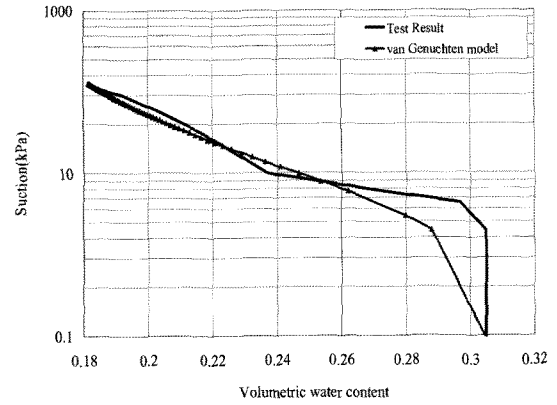


Fig. 14 SWCC using van Genuchten model

$$k = k_s \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1} (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{(1 + (\alpha\psi)^n)^{0.5m}} \quad (8)$$

Brooks and Corey모델과 마찬가지로 최소자승법과 여러 시행착오법을 통하여 Fig. 12(b)에서 얻어진 함수특성곡선은 Table 5와 같은 매개변수를 통해 Fig. 14의 함수특성곡선 및 불포화 투수계수를 예측할 수 있었다.

다. 두 모델의 비교

Fig. 15(a)는 Fig. 12(b)의 포천지역 화강 풍화토에 대한 함수특성곡선을 Brooks and Corey와 van Genuchten모델을 이용하여 함수특성곡선을 표현하였다. 그림에서와 같이 초기체적함수비구간에서는 Brooks and Corey모델이 실험결과 잘 일치되는 반면 van Genuchten모델은 정확하게 일치되지 못하고 있다. 그러나 체적함수비가 0.24일때 Brooks and Corey모델

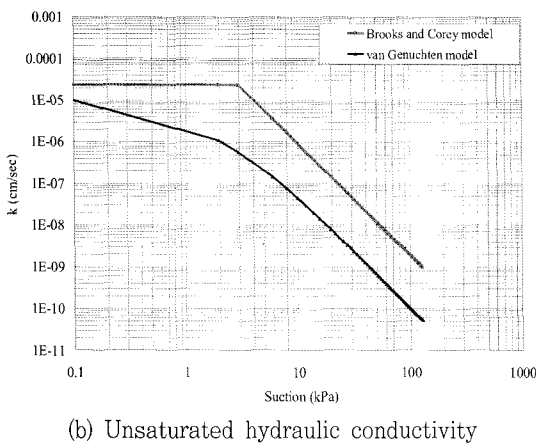
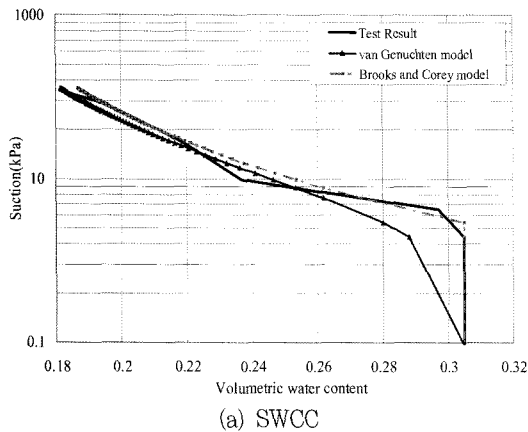


Fig. 15 Comparison of the results using two prediction models

은 van Genuchten모델보다 실험결과에 일치하지 않는 모습을 보여주고 있다. 따라서 두 모델 모두 실험결과와 모든 구간을 정확하게 예측해주지 못하는 것으로 나타났다. Fig. 15(b)는 두 모델에 대하여 각 흡입력별로 불포화투수계수를 나타낸 것으로 van Genuchten모델에 비해 Brooks and Corey모델로 예측한 투수계수 값이 더 크게 산정되었다. 그 이유는 van Genuchten모델은 초기 체적함수비구간에서 실험결과와 상당한 큰 차이를 보여주고 있으며 또한 불포화도 투수계수 예측은 함수특성곡선의 매개변수에 의해 표현되기 때문에 불포화도 투수계수 예측시에도 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 따라서 초기 흡입력 값에 상응하는 van Genuchten에 의해 예측된 불포화도 투수계수 예측은 정확하지 않다고 볼 수 있다.

V. 결 론

1) 플로우 펌프기법은 기존의 삼축압축시험기로 비배수 압밀 실험의 원리를 이용하므로 응력 (stress)의 조절이 가능하며 이 때문에 현장조건을 모의 실험할 수 있는 장점을 가지고 있

으며 또한 플로우 펌프의 유속을 컴퓨터로 제어할 수 있어 비교적 짧은 시간에 함수특성곡선을 정확하게 측정할 수 있었다.

2) 플로우 펌프기법을 이용하여 함수특성을 측정할 경우 연속적으로 건조 및 습윤과정을 자동화과정을 통해 측정할 수 있어 오차를 최소화할 수 있으며 그 예로 포천지역 화강풍화토의 포화투수계수 및 함수 특성곡선을 쉽게 측정할 수 있었다.

3) 기존 예측식을 통해서 불포화도 투수계수 예측에서 두 모델은 차이를 보였지만 전반적으로 Brooks and Corey 모델이 함수특성곡선을 전반적으로 잘 표현해주었다.

따라서 포천 화강풍화토와 같은 토질은 불포화투수계수 예측시 van Genuchten 모델보다는 Brooks and Corey모델을 사용하는 것이 더 적합하다고 판단되지만 모든 흡이 Brooks and Corey모델로 정확하게 함수특성곡선을 표현해주는 것은 아니다. 따라서 기존 예측식을 통해서 함수특성곡선과 불포화도 투수계수 예측시 주의가 필요하다.

이 논문은 2008학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

REFERENCES

1. Bishop, A. W., 1960. The measurement of pore water pressure in the triaxial test, Pore pressure and suction in soils. *Butterworths*: 38-46.
2. Brooks, R. H., and T. Corey, 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado state university, *Hydrology papers*, Ft. Collins, Colorado, USA.
3. Corey, T., 1994. Mechanics of immiscible fluids in porous media. *Water resources publications*, Ft. Collins, Colorado, USA.
4. Fredlund, D. G. and N. R. Morgenstern, 1977. Stress state variables for unsaturated soils. *ASCE J. Geotech. Eng. Div.* GT5 103: 447-466.
5. Fredlund, M. D., D. G. Fredlund, and G. W. Wilson 1997. Estimation of unsaturated soil properties using a knowledge-based system. *ASCE Fourth Congress on Computing in Civil Engineering Philadelphia*, Pennsylvania June: 16-18.
6. Hilf, J. W., 1956. An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils. *US Bureau of Reclamation*, Tech. Mem. 654, Denver.
7. Kim, T. H., and C. S. Hwang, 2003. Modeling of tensile

- strength on moist granular earth material at low water content. *Engineering Geology* 69: 233-244.
8. Leong, E. C., L. He, and H. Rahardjo, 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Journal of Geotechnical Testing* 25(3): 321-332.
 9. Olsen, H. W., 1966. Darcy's law in saturated kaolinite. *Water Resources Research* 2(2): 287-295.
 10. Shuai F., D. G. Fredlund, and L. Samarasekera, 2003. Numerical simulation of water movement in the suction equalization of a thermal conductivity sensor. *Geotechnical Testing Journal* 26(2): 1-10.
 11. van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44: 892-898.
 12. Znidarčić, D., T. Illangasekare, and M., Manna, 1991. Laboratory testing and parameter estimation for two-phase flow problems. *ASCE, Geotechnical Special Publication* 27: 1089-1099.