

## 불포화 풍화토의 투수특성 측정 Measurements of Permeability Characteristics for Unsaturated Weathered Soils

류 지 협\*

Ryu, Chi Hyob

---

### Abstract

Series of tests were carried out to study permeability characteristics of unsaturated soils. The weathered soils taken from Inju, Sungwhan, and Kuri, were selected to have different amount of fine grained soils in order to find a possible correlation between the unsaturated permeability behavior and fine grained soils contents. Measurements of permeability for unsaturated soils were performed with a newly developed apparatus, which modeled after Klute's apparatus(1965a). The apparatus was designed to measure volumetric water content and permeability by applying incremental suction pressure.

Permeability and volumetric water content of unsaturated soils generally decreased as density of the soil increased. The relationship between volumetric water content and permeability was not related to the fine grained soils contents because the plots scattered widely. By comparing volumetric water content with permeability, empirical parameters A and B could be determined, which made to be possible to predict unsaturated permeability from soil-moisture characteristics.

*keywords:* Permeability characteristics, Volumetric water contents, Unsaturated soils, Fine grained soils contents, Suction pressure

---

### 요 지

본 연구에서는 불포화 투수계수를 측정하기 위하여 Klute(1965a)에 의하여 제안된 정적측정방법의 원리에 axis-translation의 기법을 적용하여 새로운 실험장치를 개발하였다. 이 실험장치는 모관흡수력(matric suction)의 증가에 따른 함수특성과 투수계수의 변화를 동시에 측정할 수 있도록 설계되었다. 실험에는 불포화 투수특성과 No.200체 통과 세립분의 상호관계를 규명하기 위하여 각각 세립함유량이 7.3%(인주), 19.6%(성환), 35.9%(구리)인 시료를 인주, 성환, 구리지역에서 채취하여 사용하였다.

실험결과에 의하면 불포화토의 투수계수와 체적함수비는 시료의 밀도가 증가하는 경우 전체적으로 감소하였으며 모관흡수력이 증가함에 따라 점차 비선형적으로 감소하는 거동을 보였다. 또한 불포화토의 투수계수와 체적함수비는 상호 비선형 거동을 보였다. 체적함수비와 투수계수를 직접 비교하는 방법으로 경험상수 A, B를 No.200체 통과 세립분의 함유량에 따라 결정하였으며, 경험상수 A, B를 이용하면 직접 흡의 함수특성곡선으로부터 불포화 투수계수를 추정할 수 있다.

**핵심용어 :** 불포화토, 투수계수, 체적함수비, 세립분, 모관흡수력

---

\* 한려대학교 토목공학과 전임강사

Full-time lecturer, Dept. of Civil Engrg., Hanlyo Univ., Kwangyang, Chonnam, 545-800, Korea

## 1. 서 론

자연지반은 지하수위의 위치에 따라 포화영역과 불포화영역으로 나누어진다. 최근에는 점차 불포화영역에 대한 관심이 증가되고 있는데 이는 흙 구조물의 수치해석에 포화영역과 더불어 불포화영역을 포함하는 것이 더욱 문제를 합리적으로 해석할 수 있다는 인식이 높아졌기 때문이다. 특히, 흙 구조물의 침투해석을 수행하는 경우 체체의 투수특성은 가장 중요한 입력자료로 고려된다. 일반적으로 포화토의 투수특성은 쉽게 실험적으로 구할 수 있으나, 불포화토의 투수특성은 실험적으로 구하기에는 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서 최근까지 침투해석에 사용된 불포화 투수특성은 외국의 문헌에서 인용된 것이 대부분이었다.

불포화토의 투수특성에 대한 연구는 직접 실험적으로 투수계수를 구하는 직접측정방법이 있으며 많은 연구자들(Brooks와 Corey, 1964; Kunze et al., 1968; van Genuchten, 1980)에 의해 그 실험적 거동이 연구되었다. 또한 복잡한 실험대신 불포화 투수계수를 구하는데 흙의 함수특성을 사용하는 간접측정방법이 있으며 몇몇의 연구자들(Brooks와 Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Mualem, 1986)에 의하여 경험공식이 제안되어 해석에 적용되고 있다. 최근에는 순연직 응력( $\sigma - u_a$ )과 모관흡수력( $u_a - u_w$ )의 투수계수에 대한 영향을 규명하기 위한 실험적 연구(Huang, 1994)가 삼축투수시험셀(triaxial permeameter cell)을 개발하여 수행되었으며, 불포화토의 투수계수뿐만 아니라 투기계수를 측정하기 위한 연구도 실험장치에 axis-translation을 적용하여 수행되었다(Fleureau와 Taibi, 1995).

본 연구에서는 국내의 풍화토에 대하여 불포화 투수특성을 추정할 수 있는 기법을 제안할 목적으로 투수특성실험을 수행하였다. 실험을 위하여 불포화토의 투수특성을 직접 측정할 수 있는 실험장치를 Klute (1965a)의 정적측정방법의 원리에 axis-translation 기법을 적용하여 새롭게 개발하였으며, 실험에는 인주, 성환, 구리 지역에서 No. 200체 통과율이 다른 화강풍화토를 채취하여 사용하였다. 투수특성실험은 최대건조 밀도의 90%로 시료를 건조축에서 재성형하여 수행하였으며 각 시료의 모관흡수력에 따른 투수특성의 변화를 측정하였다. 또한 실험을 위한 공시체의 밀도를 최대건조밀도의 90%로 맞추기 위하여 미리 시료의 무게를 잰 후 모울드에 3층으로 정적다짐을 수행하였다.

실험결과로부터 임의의 화강풍화토의 투수특성을 추정할 수 있는 경험상수 A, B를 얻을 수 있었다. 이 경험상수 A, B는 No.200체 통과율과 건조단위중량이 기준이 되어 결정되었으며, 불포화 투수특성을 추정할 수 있어 이후 토질구조물의 침투해석을 더욱 정확히 수행하는데 도움을 줄 것이다.

## 2. 불포화토의 투수특성

불포화토내의 물과 공기는 동일한 유체로 취급되며 포텐셜의 기울기인 추진포텐셜(driving potential)로 흐름을 발생한다. 추진포텐셜은 수두의 개념으로 표시할 수 있으며 위치수두와 압력수두를 합친 전수두의 차에 의해 발생한다. 흐름을 발생시키는 추진포텐셜은 포화토나 불포화토에 관계없이 같은 결과를 갖는다(Freeze와 Cherry, 1979). 다공질체내 물의 이동은 나타내는 Darcy의 법칙은 포화흐름에 대해 기술한 것이나, 불포화토에서 간극 속의 공기는 흙 입자와 비슷한 거동을 한다고 가정하여 불포화토까지 확장 사용하였다(그림 1).

투수계수는 흙의 간극을 통하여 물이 흐를 수 있는 단위시간당 양을 측정하는 것이다. 따라서 투수계수는 성질이 다른 유체(물, 기름)나 다른 형태의 흙(모래, 점토)에 따라 다른 값을 나타낸다. 불포화 영역의 투수성은 간극내의 물과 공기의 함수로 표현된다. 즉, 포화도의 함수로서 포화도가 감소하면 큰 간극속에 있는 물이 먼저 흐르게 되고 점점 작은 간극속의 흐름으로 발전한다. 이는 흐름의 단면적을 감소시키고, 또한 유선의 복잡성을 증대시킨다. 이러한 두 가지가 조합된

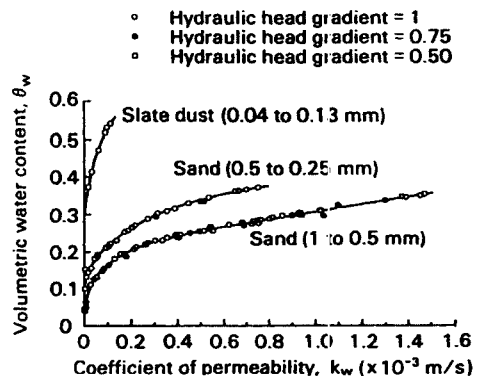


그림 1. 불포화토내 물 흐름에서 Darcy의 법칙에 대한 실험적 증명(Childs와 Collis-George, 1950)

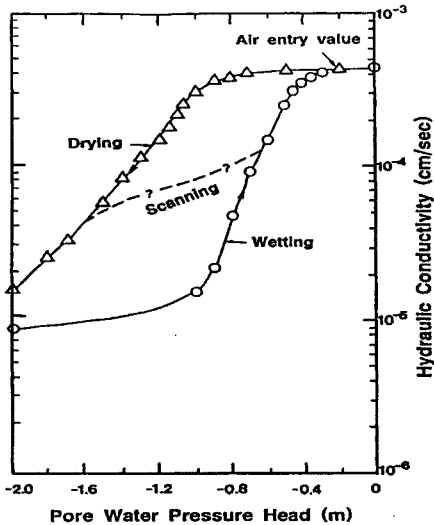


그림 2. 투수계수와 압력수두의 관계곡선(Liakopolous, 1965)

효과는 함수비가 감소함에 따라 투수성이 급격하게 감소하는 원인이 된다(Shashi, 1984). 그림 2는 투수계수와 압력수두의 관계곡선이다(Liakopolous, 1965). 즉, 불포화상태의 투수계수는 부간극수압이 점점 커짐에 따라 급격한 감소를 보이며 지반내 포화도에 영향을 받는다. 포화도에서 투수계수는 간극비의 함수이나 불포화도에서는 간극비, 포화도, 함수비의 혼합된 변화에 의하여 영향을 받는다(Lloret와 Alonso, 1980, Fredlund 1981).

### 3. 실험

불포화도의 투수특성을 실험으로 측정하기는 매우 어렵다. 따라서 체체의 침투해석을 위해서는 반경험적으로 추정된 값을 입력자료로 사용하여 왔다. 그러나 지반을 형성하는 토층은 환경의 영향을 받아 지역에 따라 각각 다른 특성을 갖고 있다. 본 연구에서는 각각 다른 세립함량을 갖는 시료에 대하여 모관흡수력을

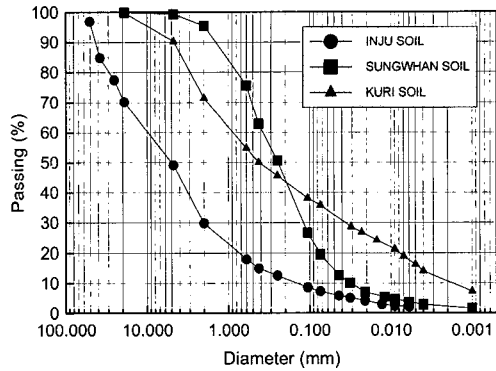


그림 3. 인주, 성환, 구리흙의 입경가적곡선

증가하거나 감소시키면서 이에 따라 공시체에 유출, 유입되는 물의 양을 측정하는 방법으로 우리나라 풍화도의 투수계수를 관찰하였다. 실험시 다짐밀도와 함수비를 변화하였으며 불포화 투수계수에 영향을 미치는 요인을 관찰하였다. 또한 우리나라 흙이 가지는 투수특성의 경향을 얻고자 No.200체 통과율이 각각 7.3%(인주), 19.6%(성환), 35.9%(구리)인 시료를 실험에 사용하였다. 표 1은 사용시료의 물리적 특성을 나타내며 그림 3은 시료의 입경가적곡선을 보여준다.

#### 3.1 실험장치

불포화 투수실험을 위하여 본 연구에서 제작된 실험기는 Klute(1965a)에 의하여 제안된 정적측정방법(steady-state method)의 원리에 axis-translation 기법을 적용시키는 방법으로 새롭게 제작되었다. 정적측정방법은 일정한 동수경사를 시료에 주어 정적 흐름을 시료에 발생시킨 후 모관흡수력과 함수비(water content)를 측정하여 투수계수를 구하는 방법이다. 또한 실험장치는 연속적인 실험을 수행할 수 있도록 시료에 유입, 유출되는 물의 양을 정확히 측정할 수 있는 이중뷰렛을 설치하였고 공기압에 의하여 측정장치 내로 공기가 확산될 수 있으므로 공기량을 측정할 수

표 1. 사용재료의 물리적 성질

사용시료	포화투수계수, $K_s$ (cm/sec)	비 중, $G_s$	균등계수, $C_u$	곡률계수, $C_g$	No.200체 통과율(%)	USCS
인주흙	$1.50 \times 10^{-5}$	2.71	60.00	2.96	7.3	GW-GC
성환흙	$2.36 \times 10^{-5}$	2.61	11.88	1.39	19.6	SM
구리흙	$4.73 \times 10^{-6}$	2.69	500.00	0.85	35.9	SC

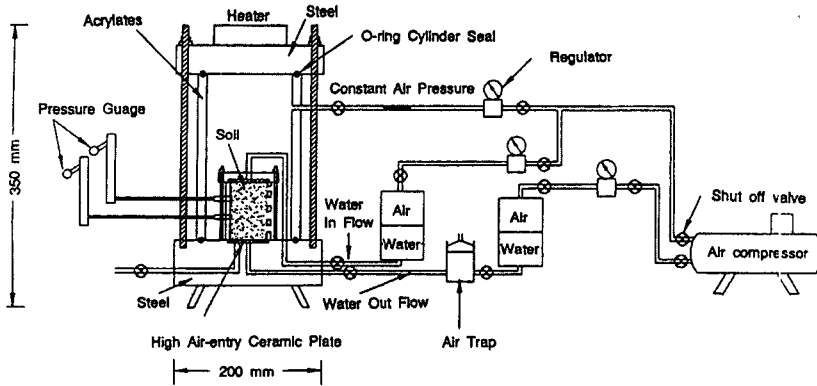


그림 4. 불포화토의 투수성을 측정하기 위하여 제작된 실험장치

있는 뷰렛도 설치하였다. 실험장치는 크게 가압장치, 셀, 측정장치, 다공판의 4부분으로 구성되었다(그림 4). 실험장치는 주로 steel과 아크릴로 만들어 졌으며, 가압장치로는 air compressor를 사용하였다. air compressor에서 발생된 공기압은 1차적으로 공기압조절장치(regulator)를 통과하면서 적절한 공기압으로 압력이 낮아지며 공기 내에 존재하는 물기를 제거하는 단계를 거친 후 정밀도가 높은( $0.005\text{kg/cm}^2$ ) 2차 공기압조절장치를 통과하면서 소정의 압력을 유지한다. 이 압력은 직접 공기압의 형태로 셀에 가해주거나 또는 공기압을 수조에 가하여 수압을 발생시키는 방법으로 시료의 상, 하단에 수압을 가하여 주었다. 실험장치에서 압력을 전달하는 원형관은 내경 0.5cm의 관이며  $15\text{kg/cm}^2$ 의 내압을 견딜 수 있는 폴리프로필렌관을 사용하였다.

불포화 투수실험기의 주요한 부분인 셀은 이중으로 만들어졌다. 안쪽에 설치되는 원형관은 상, 하단에 높은 공기압입치를 갖는 다공판을 설치하여 외부에서 가해주는 수압을 시료에 직접 연결하며 외부의 원형관은 셀내에 가해지는 공기압이 외부로 유출하지 못하도록 한다. 이때 셀내에 가해지는 공기압과 외부에서 시료에 가해지는 수압의 차가 모관흡수력이 된다. 따라서 시료의 상, 하단에 다른 수압이 가해지면 공기압은 같으므로 시료의 상, 하단에는 다른 모관흡수력이 작용되어 흡수력 차에 의한 불포화 흐름이 시료에 발생한다. 안쪽에 설치되는 원형관은 관의 측면에 직경 0.1cm의 구멍을 뚫어 균등한 공기압이 시료에 가해지도록 하였다. 바깥 셀의 상부에는 셀내, 외의 온도차로 발생할 수 있는 수증기를 없애주는 역할을 하는 히터(heater)가 설치되었다.

실험에 사용된 측정장치는 공기압조절장치에 연결되는 압력계이지, 시료의 측면에서 각 점의 수두를 측정하는 압력계이지, 시료에 유입, 유출되는 물의 양을 측정하는 이중뷰렛, 다공판을 통하여 확산되는 공기의 양을 측정하는 뷰렛으로 구성되었다. 공기압조절장치에 연결되는 압력계이는 압력의 높고 낮음에 따라 0~0.3, 0~2, 0~10( $\text{kg/cm}^2$ )의 3가지 종류가 사용되었으며, 시료에 유출, 유입되는 물의 양을 측정하는 뷰렛은 이중관으로 만들어져 수위조절을 할 수 있으며 안쪽 관에는 눈금이 있어 흐름 양을 0.01ml 까지 읽을 수 있게 만들어졌다. 공기압이 다공판의 공기압입치에 가까워지면 다공판을 통하여 공기의 확산이 발생할 수 있으며 정확하게 유출된 물의 양을 측정하기 어렵게 된다. 따라서 한 단계의 실험이 종료되면 확산된 공기의 양을 측정하여 보정하여 주어야 한다. 불포화토에 관한 실험을 수행하는 경우 가장 중요하게 사용되는 다공판은 soil moisture 사에서 만들어진 1 bar의 것을 사용하였다.

### 3.2 실험방법

불포화 투수특성을 측정하기 위하여 제작한 실험기는 함수특성과 투수계수를 동시에 측정할 수 있으며 또한 건조과정과 습윤과정을 한 시료에 대하여 측정할 수 있어 시료의 이력현상을 관찰할 수 있다. 각 시료는 표준다짐시험을 수행하여 최적함수비와 최대건조밀도를 구하였으며 투수실험을 위하여 표준다짐의 90%의 건조밀도를 갖도록 인위적으로 시료를 제작하였다. 또한 투수성에 대한 건조밀도의 영향을 알아보기 위하여 인주축에 한하여 건조밀도를 변화시켜 실험을 수행하였다. 각 시료를 표준다짐 90%의 건조밀도로 만들

어 주기 위하여 투수실험기의 안쪽 셀의 상, 하단에 칼라를 만든 후 정해진 건조밀도에 맞는 무게의 시료를 셀에 3단으로 나누어 넣은 후 일정부피를 갖는 다짐축을 셀의 상, 하단으로 정적으로 눌러주는 방법으로 시료를 제작하였다. 시료는 3단으로 제작하여 전체적으로 시료가 일정한 건조밀도를 갖도록 하였다. 시료가 제작되면 칼라를 제거한 후 시료의 상, 하단에 다공판과 수압을 가하는 판을 연결하였다.

시료의 함수특성은 각 모관흡수력에 따라 시료에 불포화 흐름을 발생시키기 전에 각 모관흡수력의 상태로 시료를 안정화 시키는 과정에서 시료가 보유한 물의 저류량을 알아내는 방법으로 구할 수 있다. 즉, 시료가 일정한 함수비와 건조밀도로 준비되면 셀에 시료를 안치한 후 먼저 시료의 상, 하단을 통하여 수압을 가하여 시료를 포화상태로 만든다. 그런 다음 미리 정한 모관흡수력에 이르도록 시료에 공기압과 수압을 가하고 시료에 가해진 모관흡수력에 의하여 발생하는 유출수의 양을 시간에 따라 측정한다. 유출되는 물의 양이 시간이 경과하면서 안정화 상태로 이르면 다음 단계의 모관흡수력에 맞는 공기압과 수압을 시료에 가하여 똑같은 실험을 반복한다. 모관흡수력을 정해진 값까지 시료에 가해준 후 모관흡수력을 감소하면서 시간에 따른 유출수의 양을 측정하면 시료에서 물이 배수되지 않고 시료가 가해준 모관흡수력에 대해 안정화 상태가 되기 위하여 물을 흡입하는 현상이 발생한다. 최초로 가해준 모관흡수력까지 흡수력을 감소시키면서 실험을 똑같은 절차로 수행한다. 이후 재차 모관흡수력을 증가하면서 똑같은 실험을 반복하면 일련의 흡수력의 변화에 따른 시료가 보유한 물의 저류량을 알 수 있다.

불포화 투수실험은 미리 시료의 건조밀도와 측정범위를 정하고 여기에 적당한 공기함입치를 갖는 다공판을 설치한 후 셀 내에 있는 시료에 공기압을 가한 상태에서 일정수두차를 시료의 상, 하단에 가하는 방법으로 불포화 흐름을 발생시켜 수행한다. 흐름이 진행되는 동안 흡 시료가 갖는 안정화된 부간극수압을 측정하면

Darcy의 법칙에 의하여 불포화 투수계수를 얻을 수 있다. 이때 시료에서 배수된 물의 양을 측정하여 시료의 함수비를 측정하면 함수특성과 투수계수의 상관성을 규명할 수 있다. 불포화 투수실험에는 항상 부간극수압을 측정해야 한다. 부간극수압은 대기압 상태에서 직접 측정할 수 있으나 다공판을 통하여 측정장치 내로 공기가 확산되거나 부압이 측정장치 내 1기압이상이 걸리면 공동화 현상이 발생하는 등 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 측정시 오차를 극복하기 위하여 실험시 axis-translation기법을 적용하였다. 이 기법은 시료에 공기압을 높게 가하여 간극수압을 정(+)의 값으로 만든 상태에서 실험을 수행하도록 하는 방법이다.

#### 4. 실험 결과

불포화토의 투수성은 흙이 갖는 포화도에 따라 비선형적으로 변화하는 특성을 보인다. 투수실험은 세립함유율에 따른 특성을 고찰하기 위하여 다른 No.200체 통과율을 갖는 시료(인주흙:7.3%, 성환흙:19.6%, 구리흙:35.9%)를 채취하여 사용하였다. 표 2는 투수특성에 사용된 공시체의 물리적 특성을 보인다. 표 2를 보면 각 시료의 포화도가 100%에 많이 미치지 못한다. 따라서 최초 실험을 수행하기 전 시료를 포화상태로 만들어 주어야 하며 이를 위하여 시료에 공기압을 가하지 않은 상태에서 시료의 상, 하단으로 수압을 가하는 방법으로 포화도를 높였다. 그림 5는 인주시료의 모관흡수력에 따른 간극수의 유출과 유입의 관계를 나타낸 그림이다. 실험시 시료에 가해주는 모관흡수력을 증가시키다가 감소시키는 방법을 사용하였으며 이때 같은 흡수력에서도 다른 간극수의 유출, 유입을 나타냄을 관찰할 수 있었다. 인주시료의 실험을 수행하는데 약 430시간이 소용되었다. 그림 6, 7은 인주시료의 함수특성과 투수계수를 나타낸 것인데 모두 명확한 이력현상을 보임을 알 수 있다. 그림 7을 보면 최초 0.05kg/cm<sup>2</sup>의 투수계수는 표 1에서 제시한 포화투수

표 2. 투수특성 실험을 위하여 준비된 공시체의 물리적 특성

사용시료		건조밀도, $\gamma_d(t/m^3)$	간극비, e	포화도, S	체적함수비, $\theta_s$	함수비, w(%)	비 중, $G_s$
인주흙	1	1.86	0.46	70.69	0.30	12.0	2.71
	2	1.98	0.37	87.89	0.23	12.0	2.71
성환흙		1.69	0.54	58.0	0.35	12.0	2.61
구리흙		1.73	0.55	73.4	0.36	15.0	2.69

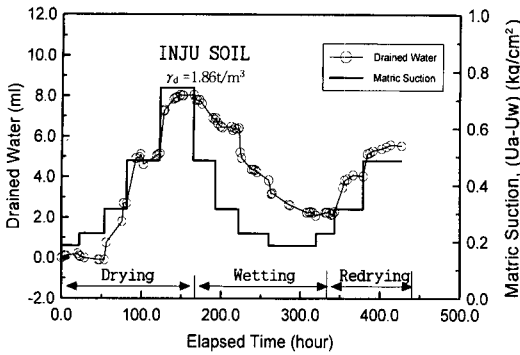


그림 5. 인주시료의 시간과 모관흡수력 변화에 따른 간극수의 유출과 유입

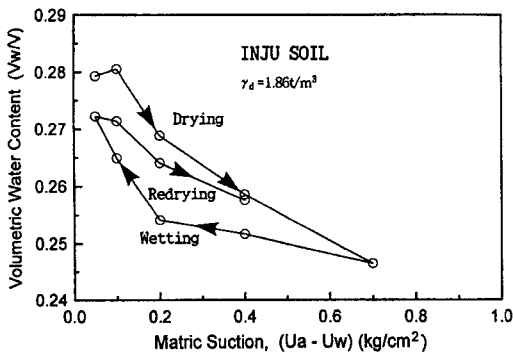


그림 6. 인주시료의 함수특성 곡선

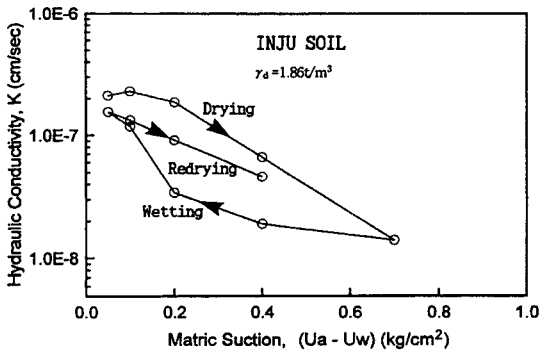


그림 7. 인주시료의 모관흡수력 변화에 따른 투수특성

계수와 약 10배의 차이를 나타내었다. 이는 포화상태에서 불포화 상태로 변하는 경우 투수계수는 초기 크게 감소하는 경향을 다른 연구자의 실험결과에서도 보이나 또한 실험초기 시료가 완전한 포화상태에 도달된 상태에서 실험이 수행되지 않은 것으로 사료되었다.

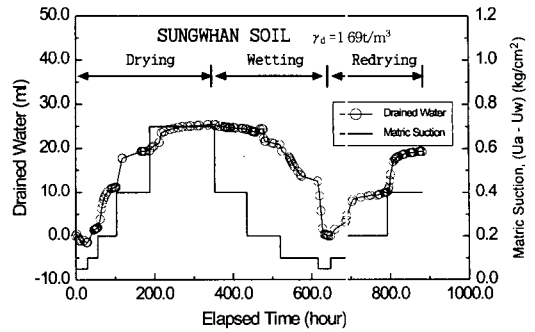


그림 8. 성환시료의 모관흡수력 변화에 따른 간극수의 유출과 유입

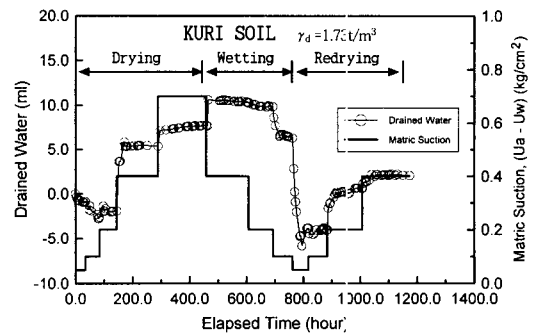


그림 9. 구리시료의 모관흡수력 변화에 따른 간극수의 유출과 유입

그림 8, 9는 다른 세립함유율을 갖는 성환시료, 구리시료의 시간에 따른 간극수의 유출과 유입의 관계를 보인다. 각 시료에 같은 모관흡수력을 가하여 주었으나 세립함유율에 따라 다른 안정화 시간을 보였다. 즉, 세립함유율이 35.9%인 구리시료는 실험을 완료하는데 인주시료나 성환시료보다 많은 약 1200시간을 필요로 하였다. 또한 유출과 유입의 과정에서 세립함유율이 적은 성환시료가 구리시료보다 간극수의 이동량이 많았다. 그림에서 나타난 바와 같이 큰 연구에서 사용한 정적측정방법은 실험을 수행하는데 너무 많은 시간을 필요로 하였다.

그림 10은 각 시료에 대하여 얻은 함수특성곡선을 나타내준다. 각 시료는 함수특성곡선에서 같은 흡수력에서 다른 체적함수비값을 보이는 이력현상을 나타내며 이력현상의 정도는 세립함유율이 많을 경우 더욱 증가하는 경향을 보였다. 또한 그림 11과 같이 불포화 투수계수는 함수특성과 비교하여 그 정도는 작지만 명확한 이력현상을 나타내고 있다. 불포화 투수계수는 세

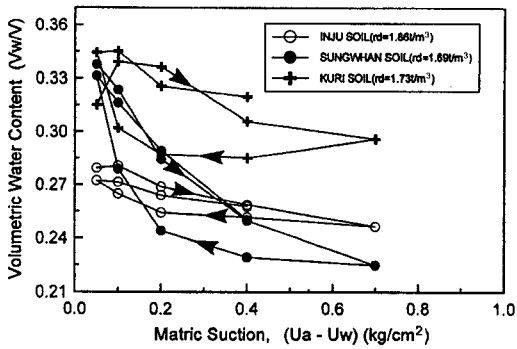


그림 10. 각 시료의 모관흡수력에 따른 함수특성곡선

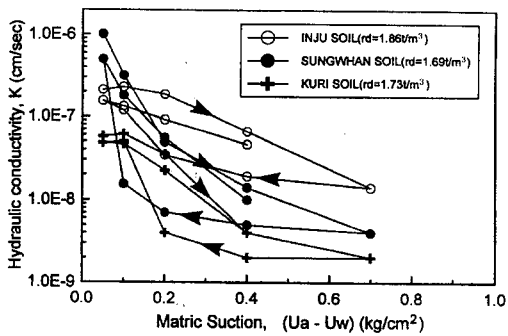


그림 11. 각 시료의 모관흡수력에 따른 불포화 투수특성

립함유율이 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 그림 11에서 투수계수는 모관흡수력이 증가함에 따라 급격히 작아졌으며, 본 연구에서 사용한 정적측정방법으로는 흡수력  $0.7\text{kg/cm}^2$  보다 큰 경우 흐르는 물의 양이 적어 투수계수의 측정에 너무 많은 시간을 필요로 하였다.

그림 12는 실험을 통하여 얻은 각 시료의 함수특성과 투수계수의 상호관계를 보인다. 함수특성과 투수계수는 세립함유율이 7.3%인 인주시료는 거의 하나의 선상에 건조과정과 습윤과정에 상관없이 수렴하는 것을 보이나 세립함유율이 증가함에 따라 점점 건조과정과 습윤과정의 값이 분산되는 경향을 나타낸다. 그러나 전체적으로 보면 불포화토의 함수특성과 투수계수의 관계곡선이 서로 겹치면서 한곳으로 집중되는 것을 보였다.

불포화토의 투수성은 그 시료가 갖는 포화도에 가장 큰 영향을 받으며 또한 세립함유율에 영향을 받는 것은 앞서 설명한 바와 같다. 본 연구에서는 불포화토에

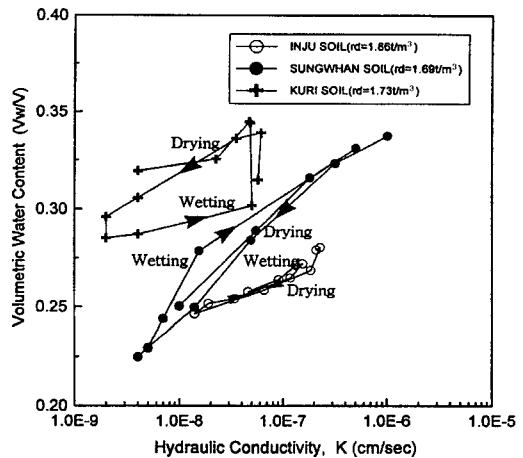


그림 12. 불포화토의 함수특성과 투수계수의 상호 관계

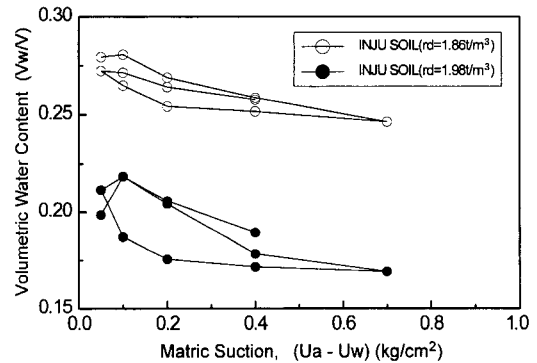


그림 13. 모관흡수력에 따른 함수특성

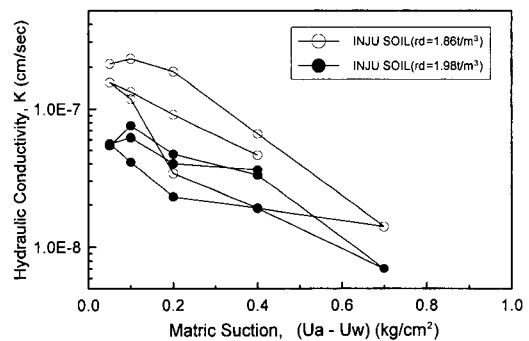


그림 14. 모관흡수력에 따른 투수특성

대한 건조밀도의 영향을 알아보기 위하여 같은 인주시료에 표준다짐과 수정다짐의 건조밀도로 시료를 준비한 후 투수실험을 수행하였다. 실험결과 표준다짐의 시

료보다 수정다짐의 시료가 같은 모관흡수력에 대하여 더 많은 안정화 시간을 필요로 하였다. 그림 13, 14는 모관흡수력에 따른 함수특성과 투수특성을 나타낸 곡선으로 함수특성은 수정다짐의 시료가 더 큰 이력현상을 보였다. 투수특성은 수정다짐의 시료가 전체적으로 더 낮은 투수계수를 보이나 이력현상의 정도는 더 작아짐을 보였다. 따라서 건조밀도의 변화에 따라 함수특성과 투수계수 모두 영향을 받으나 함수특성과 비교하여 투수계수는 건조밀도에 더 적은 영향을 받는 것으로 나타났다.

### 5. 불포화토의 투수특성 산정

불포화토의 투수계수를 직접 실험을 통하여 측정하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 불포화토의 투수특성을 얻기 위하여 경험식과 통계모델을 사용하여 왔다. 일반적으로 경험식은 투수계수와 흡수력 또는 투수계수와 함수비의 측정 data를 사용하여 얻어지며, 식 (1), (2)는 흡수력과 포화도곡선에서 불포화 투수계수를 예측할 수 있는 경험식이다(Brooks와 Corey, 1964).

$$K = K_s \quad (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b \quad (1)$$

$$K = K_s S_e^\delta \quad (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b \quad (2)$$

여기서, 경험상수,  $\delta = \frac{2+3\lambda}{\lambda}$ ,  $\lambda =$  흡입경분포지수

$K =$  각 포화도에서 투수계수,  $K_s =$  포화투수계수

$S_e =$  유효포화도,  $(u_a - u_w) =$  모관흡수력

$(u_a - u_w)_b =$  공기함입치

불포화토의 함수특성과 포화투수계수를 측정하면 투수계수를 얻기 위하여 통계모델이 사용될 수 있으며 이러한 모델은 흙의 함수특성과 투수특성은 흙의 간극 크기분포에 의해 결정될 수 있다는 사실에 기초한다. Mualem(1976)은 흙의 함수특성에서 상대투수계수를 추정하는 식 (3)을 제안하였다.

$$K_r(\theta) = \frac{K(\theta)}{K_s} = \theta^{\frac{1}{2}} \left[ \int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{\psi(\theta)} / \int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi(\theta)} \right]^2 \quad (3)$$

여기서,  $K_r(\theta) =$  상대투수계수,  $K_s =$  포화투수계수

$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $\theta =$  체적함수비

$\theta_s =$  포화체적함수비,  $\theta_r =$  잔유체적함수비

$\psi =$  모관흡수력

본 연구에서는 불포화토의 투수특성과 함수특성을 직접 비교하는 방법으로 투수특성을 추정하는 경험적인 방법을 제안하였다. 위에서 설명한 그림 12는 실험을 통하여 얻은 체적함수비와 투수특성의 관계곡선을 보인다. 그림 15는 체적함수비와 투수특성의 관계곡선을 건조과정과 습윤과정으로 나누어 log 함수로 통계처리하여 선형적인 관계를 보이도록 하였으며 체적함수비와 투수계수에 대한 반경험식을 경험상수 A, B를 포함하여 나타내었다. 따라서 그림 15로부터 우리는 시료의 함수특성을 알면 경험상수 A, B에 의하여 그 흙의 투수특성을 추정할 수 있다. 그림 16은 그림 15

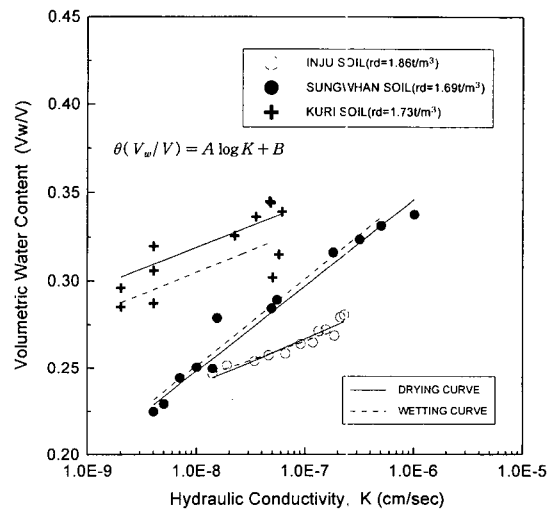


그림 15. 불포화토의 투수계수와 함수특성의 관계 곡선

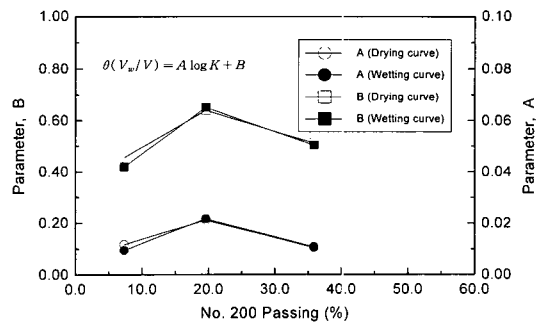


그림 16. No.200체 통과량에 의한 상수 A, B의 결정



의 각 시료에서 얻은 경험상수인 A, B를 본 연구에서 풍화토의 분류 기준으로 제안한 시료의 No.200체 통과량에 따라 나타낸 것이다. 따라서 흙 구조물의 침투 해석을 수행하는 경우 구조물을 구성하는 흙의 No.200체 통과량과 함수특성을 알면 그림 15와 16으로부터 침투해석에 필요한 투수특성을 추정할 수 있다. 그러나 실험결과 그림 16에서 표현된 것과 같이 경험상수 A, B가 선형성을 보이지 않았다. 이는 풍화토를 분류하는 기준으로 No.200체 통과량만으로는 어려움이 있어 이에 더하여 시료의 입도분포 등과 같은 다른 분류기준이 같이 고려되어야 할 것으로 생각되며 이후 추가적인 연구가 필요하다.

## 6. 결 론

불포화토의 투수특성을 규명할 목적으로 일련의 실험이 수행되었다. 불포화토의 투수계수는 흙이 갖는 포화도에 따라 비선형적으로 변화하는 특성을 보였다. 실험을 위하여 No.200체 통과율이 각각 7.3%(인주시료), 19.6%(성환시료), 35.9%(구리시료)인 시료를 사용하였다. 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 불포화토의 투수실험을 위하여 Klute(1965a)에 의하여 제안된 정적측정방법의 원리에 axis-translation의 기법을 적용하여 새로운 실험장치를 개발하였다. 이 실험장치는 모관흡수력(matric suction)의 변화에 따른 함수특성과 투수계수를 동시에 측정할 수 있다.

(2) 불포화토의 투수계수와 체적함수비는 모관흡수력이 증가함에 따라 점차 비선형적으로 감소하는 거동을 보였다. 또한 실험에 사용된 시료는 각각 다른 안정화시간을 보였으며 실험을 완료하는데 세립함유율이 많은 구리시료가 가장 많은 시간(1200시간)을 필요로 하였다.

(3) 불포화토의 투수특성은 함수특성보다 그 정도는 작지만 명확한 이력현상을 보였다. 또한 시료의 건조밀도가 증가하는 경우 함수특성과 투수특성 모두 전체적으로 감소하였으나 투수특성은 함수특성에 비교하여 적은 영향을 받았다.

(4) 불포화토의 투수계수와 체적함수비는 상호 비선형 거동을 보였으며 체적함수비와 투수계수를 직접 비교하는 방법으로 경험상수 A, B를 No.200체 통과 세립분의 함유량에 따라 결정하였다. 경험상수 A, B를 이용하면 직접 흙의 함수특성곡선으로부터 불포화 투수계수를 추정할 수 있다. 본 연구에서 경험상수 A, B

는 No.200체 통과량에 따라 선형성을 보이지 않았다. 이는 풍화토를 분류하는 기준으로 No.200체 통과량에 더하여 다른 기준이 같이 고려되어야 할 것으로 사료되며 이후 추가적인 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

- 강우영, 박재현, 박창근, 선우중호 (1995). “다공질 매질에서 이력현상에 대한 실험적 연구.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제4호, pp. 215~222.
- Brook, R.H., and Corey, A.T. (1964). “Hydraulic properties of porous media.” *Hydrology Papers*, Colorado State University, Colorado.
- Childs, E.C., and Collis-George, N. (1950). “The permeability of porous materials.” *Proc. Royal Soc. Ser. A*, Vol. 201, pp. 392~405.
- Fleureau, J.M., and Taibi, S. (1995). “Water-air permeabilities of unsaturated soils.” *Proc. of the First Int. Con. on Unsaturated Soils*, Alonso, E. E., Delage, P., Eds., Paris, France, pp. 479~484.
- Fredlund, D.G., Xing, A., and Huang, S. (1994). “Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristics curve.” *Can. Geotech. J.*, Vol. 31, pp. 533~546.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Huang, S.Y. (1994). *Evaluation and laboratory measurement of the coefficient of permeability in deformable, unsaturated soils*. Ph.D. Thesis, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Klute, A. (1965a). “Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil.” *Methods of Soil Analysis*, Edited by Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., and Clark, F.E., Mono. 9, Part 1, Amer. Soc. of Agronomy, madison, WI, pp. 253~261.
- Kunze, R.J., Uehara, G., and Graham, K. (1968). “Factors important in the calculation of

- hydraulic conductivity." *Proc. Soil. Sci. Soc. Amer.*, Vol. 32, pp. 760~765.
- Liakopolous, A.C. (1965). "Theoretical solution of unsteady unsaturated flow problems in soils." *Bull. the Inter. Associ. Sci. Hydro.*, Vol. 10, pp. 5~39.
- Lloret, A., and Alonso, E.E. (1980). "Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior." *Geotechnique*, Vol. 30, No. 4, pp. 449~477.
- Mualem, Y. (1976). "Hysteresis models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 6, pp. 1248~1254.
- Mualem, Y. (1986). "Hydraulic conductivity of unsaturated soil: Prediction and formulas." *Methods of Soil Analysis*, Edited by Klute, A., No. 9, Part 1, Am. Soc. of Agronomy, Madison, WI, pp. 799~823.
- Shashi, M. (1984). *One dimensional consolidation of saturated-unsaturated compressible porous media with variable total stress*. Ph.D. dissertation, Univ. of Delaware.
- van Genuchten, M.T. (1980). "A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Vol. 44, pp. 892~898.

(논문번호:99-072/접수:1999.09.09/심사완료:1999.12.15)