

변형된 삼축시험장치를 이용한 불포화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정

Determination of soil water characteristic curve and permeability equation of unsaturated soils using modified triaxial apparatus

김석남¹⁾, Suknam Kim, 박치원²⁾, Chi Won Park, 목영진³⁾, Young Jin Mok

¹⁾ 한국토지공사 차장, Manager, Korea Land Coporation

²⁾ 경희대학교 토목공학과 대학원생, Grad. Student, Dept. of Civil Eng., Kyung Hee Univ.

³⁾ 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee Univ.

SYNOPSIS : Studying unsaturated soil mechanics, determination of soil water characteristic curve and permeability equation is an essential factor but it is not easy. In this research a new testing apparatus was developed to determine soil water characteristic curve and permeability equation. The testing to get saturated permeability coefficients and soil water characteristic curves for two soils was performed by using the developed testing apparatus. First, a saturated permeability testing was performed and then the testing to get soil water characteristic curve of a drying process was performed. Next, the testing to get soil water characteristic curve of a wetting process was performed. Testing results showed hysteresis phenomena between soil water characteristic curve of a drying process and soil water characteristic curve of a wetting process. The permeability equations were determined by a theoretical method where a saturated permeability coefficient and a soil water characteristic curve were used.

Key words : unsaturated soil, soil water characteristic curve, permeability equation, modified triaxial apparatus, hysteresis phenomenon

1. 서론

보통 토사는 불포화 상태로 존재하며, 포화상태는 불포화토의 극단적인 한 경우라 볼 수 있다. 포화된 토사가 건조해감에 따라 함수비가 감소하게 되면, 토사의 모관흡수력(Matric suction)은 증가하게 된다. 불포화토의 함수비와 모관흡수력의 관계는 보통 함수특성곡선(Soil water characteristic curve)로 언급된다. 불포화토의 또 하나의 특징은 불포화토의 투수계수가 일정하지 않고 함수비 변화에 따라 변화한다는 것이다. 이러한 불화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정은 쉽지 않은 작업들이다.

이 연구에서는 불화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식을 구할 수 있는 하나의 시험장치를 개발하였다. 개발된 시험장치는 변형된 삼축시험장치의 형태로 포화투수계수시험과 함수비와 모관흡

수력의 변화관계를 측정할 수 있다. 이 시험장치의 모관흡수력 측정범위는 1500kPa까지 가능하며, 본 연구에서는 500kPa까지의 모관흡수력에 대해서 시험을 실시하였다.

2. 시험장치의 개발

개발된 시험장치는 변형된 삼축시험장치의 형태로 삼축셀, 재하대, 제어판넬, 부속장치들로 구성되어 있다. 그림 1은 개발된 시험장치의 전경사진을 보여준다. 사진에서 좌측 부분에 있는 장치는 제어판넬로서 오른쪽에 있는 장치들과 연결되어 압력, 하중, 변위 등을 제어하고 자동으로 기록할 수 있도록 제작되었다. 그림 2는 시험장치의 체계적인 계통도를 보여주고 있다.

그림 3은 삼축셀과 삼축셀에 연결된 부속장치들에 대한 명칭들을 보여준다. 그림 3의 삼축셀 안의 작은 실린더가 있는데 이 안에 흡 시료가 설치된다. 시료의 상부면은 다공판이 설치되고 시료의 하부면에는 고압용다공판(High air entry disk)이 설치된다. 시험시 시료의 하부면과 고압용다공판 사이는 고압용다공판을 보호하기 위하여 기름종이를 넣는 것이 좋다. 고압용다공판 아래는 물로 채워져 있는 공간이 존재하는데 이 공간은 측정시스템들과 연결된다. 흡 시료에 존재하는 물과 측정시스템과 연결되어 있는 공간에 존재하는 물은 포화된 고압용다공판의 공극을 통하여 서로 연결되어 있고 상하로 유동이 가능하다. 그러나 흡 시료에 존재하는 공기는 고압용다공판을 통과 할 수 없다. 흡 시료의 상하부는 밀폐시키기 위하여 고무링(O-ring)이 설치된다. 압력측정장치(Pressure transducer)는 시료의 공기압과 고압용다공판 아래 물로 채워져 있는 공간에서의 수압 그리고 삼축셀에서의 압력을 측정하기 위해서 설치된다. 하중은 Load cell을 통하여 가해질 수 있으며, 로드셀(Load cell)에 부착되어 있는 변위측정장치(LVDT)는 흡 시료의 연직 변위량을 측정하기 위해 설치된다.

제어판넬에는 정밀 공기압 조절장치(Regulator)가 부착되어 있으며, 로드셀, 변위측정장치, 압력측정장치 등과 연결되어 시험장치를 제어하고 각종 시험결과 값들을 측정한다.

기타 부속장치로는 체적변화측정장치(Volume change indicator, VCI), 확산공기측정장치(Diffused air volume indicator, DAVI), 탈기수조, 변위측정장치(LVDT), 압력측정장치(Pressure transducer) 등이 있다.



그림 1. 변형된 삼축시험장치

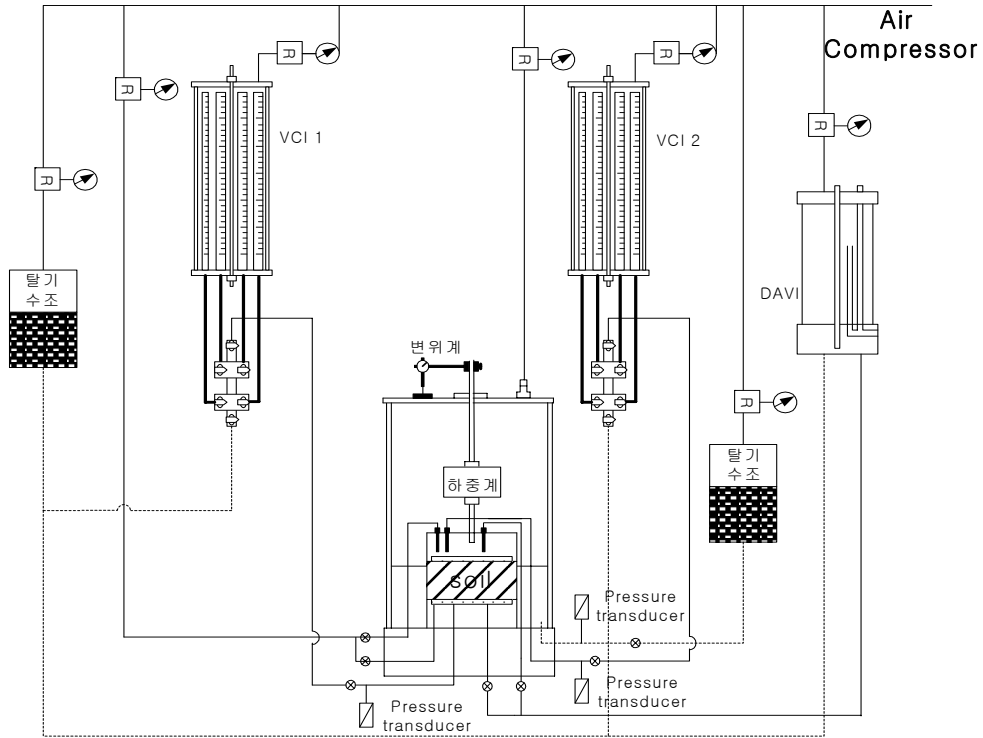


그림 2. 변형된 삼축시험장치 계통도

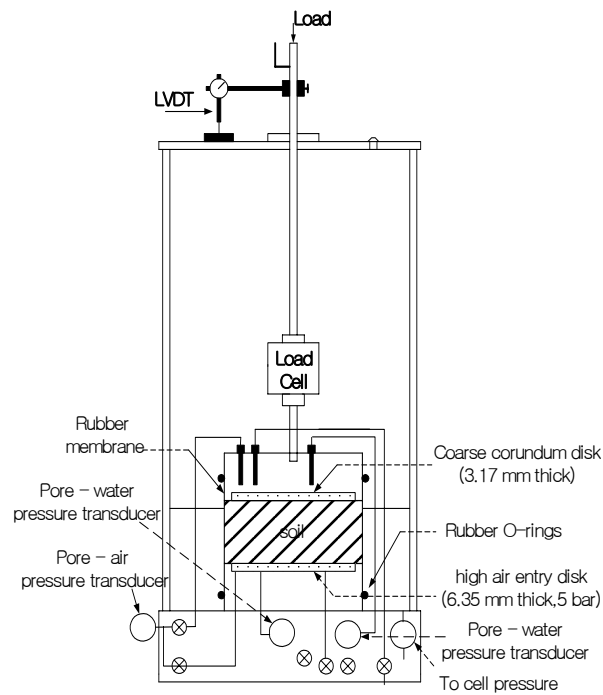


그림 3. 삼축셀 상세도

흙 시료의 체적함수비는 모관흡수력의 크기에 따라 변화한다. 체적함수비가 증가하면 모관흡수력은 감소하고, 반대로 체적함수비가 감소하면 모관흡수력은 증가한다. 흙 시료의 모관흡수력을 증가시키기 위해 흙 시료에 가해지는 공기압을 증가 시키게 되는데 이 때에 공기압 증가로 인해

흡 시료의 물은 고압용다공판(High air entry disk)을 통해 흡시료로부터 빠져 나오게 되며, 빠져 나온 물의 체적은 체적변화측정장치(VCI)를 통해 측정된다. 반대로 흡 시료의 모관흡수력을 감소시키는 경우 흡 시료에 가해지는 공기압은 감소되고 이로 인해 고압용다공판 하부의 공간의 물은 흡 시료 속으로 이동하고 그 양은 체적변화측정장치(VCI)를 통해 측정된다.

시험과정에서 흡 시료는 보통 불포화 상태로 존재하여 흡 시료에는 공기와 물이 함께 존재한다. 흡 시료내에서 공기는 보통 두 가지 형태로 존재한다. 하나는 물과 완전히 분리되어 있는 경우이고 또 하나는 공기가 물에 확산되어 있는 경우이다. 분리되어 있는 공기와 물에 녹아 있는 공기는 둘 간에 공기압이 평형이 될 때까지 물 속으로 확산되거나 반대로 확산있는 공기가 물로부터 이탈되어 나오거나 한다. 시험과정에서 흡 시료내의 공기의 압력은 물의 압력 보다는 항상 크다. 따라서 공기는 물속으로 확산되게 된다. 이렇게 확산된 공기는 흡 시료내의 공기가 가압될 때 고압용다공판을 통하여 물과 함께 빠져 나오게 된다. 그런데 고압용다공판 아래의 공간에 존재하는 물의 압력은 시료내의 공기압력에 비해 작으므로 물속에 확산되어 있던 공기가 이탈되어 고압용다공판 아래에서 공기방울이 생기게 된다. 이러한 공기방울의 체적은 체적변화측정장치(VCI)가 측정한 시료의 체적함수비 변화량에 포함되어 있으므로 체적변화측정장치(VCI)가 측정한 양으로부터 감해져야만 한다. 이러한 공기방울의 체적을 측정하기 위한 장치가 확산공기측정장치(Diffused air volume indicator, DAVI)이다.

3. 실험개요

이 연구에서는 실험대상 토사로 한국토지공사 수도권 소재 2개의 현장에서 도로노체 재료로 사용되는 토사들을 채취하였다. 실험대상 토사들에 대해 먼저 기본적인 물성시험을 실시한 결과 약간의 소성을 띤 사질토로 분류되었다.

실험은 먼저 포화투수계수시험을 실시한 후 시료의 함수비를 감소시켜 가면서 모관흡수력을 측정한 뒤 함수비를 증가시켜 가면서 모관흡수력을 측정하는 방법으로 시험을 진행하였다.

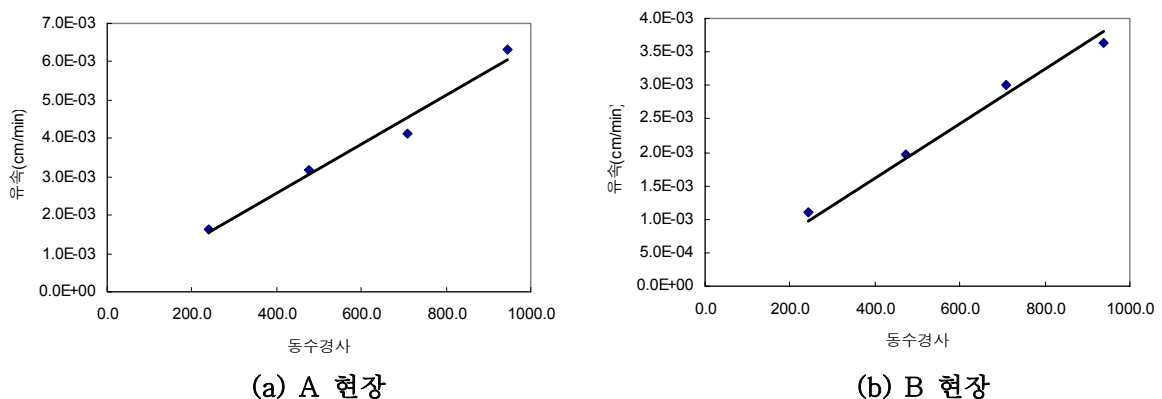


그림 4. 유속-동수경사 관계곡선

3.1 포화투수계수시험

투수계수 실험에 앞서 시료를 포화시키기 위해 시료에 약 500kPa 정도의 압력을 가하여 약 24시간 정도 물을 상부에서 하부로 통과 시켰다. 이렇게 고압을 유지한 이유는 흡 속에 존재할

수 있는 공기 방울을 물속으로 확산(Diffusion)시킴으로써 흙 시료를 완전히 포화시키기 위해서이다. 이렇게 일정한 시간이 경과한 후 물의 유입량과 유출량이 같아질 때 시료가 완전히 포화되었다고 판단할 수 있다.

시료가 완전히 포화된 후 동수경사를 바꾸어 가면서 시료를 통해 흐른 유량과 시간을 측정하고 유속과 동수경사 간의 관계곡선으로부터 포화투수계수를 결정하였다. 그림 4는 두 현장의 유속-동수경사 관계곡선을 보여준다. A 현장의 포화투수계수는 $7 \times 10^{-6} \text{cm/min}$, B 현장의 포화투수계수는 $4 \times 10^{-6} \text{cm/min}$ 로 나타났다.

3.2. 함수특성곡선

토질역학에서 함수비라 함은 보통 중량함수비(Gravimetric water content)를 의미한다. 이 함수비는 흙입자의 질량에 대한 물의 질량의 백분율 값이다. 그러나 불포화토 역학에서는 중량함수비 대신 체적함수비(Volumetric water content)를 사용한다. 체적함수비는 흙 전체의 체적에 대한 물체적의 비이다. 흙의 체적함수비는 모관흡수력과 특정한 관계를 갖는데 이 관계는 보통 함수특성곡선(Soil water characteristic curve)이라 불리운다. 그림 5는 개발된 시험장치를 이용하여 측정된 흙시료들의 함수특성곡선을 보여준다. 각 그림에서 두 개의 함수특성곡선이 보이는데 각각 건조곡선과 습윤곡선이다. 이처럼 건조곡선과 습윤곡선이 일치하지 않는 주원인은 흙 시료내에 존재하는 공극의 크기의 불규칙 때문이라 알려져 있다. 측정된 함수특성곡선은 불포화토 역학의 실무나 연구에 이용될 수 있도록 하기 위해서는 식으로 표현되어야 하는데 이를 위한 방정식으로 Gardner(1958), van Genuchten(1980), Fredlund와 Xing(1994) 등에 의해 제시된 방정식들이 있다. 여기서는 Fredlund와 Xing(1994)이 제시한 방정식을 이용하여 건조곡선에 대해 표현하여 보았다. Fredlund와 Xing(1994) 방정식은 식(1)과 같다.

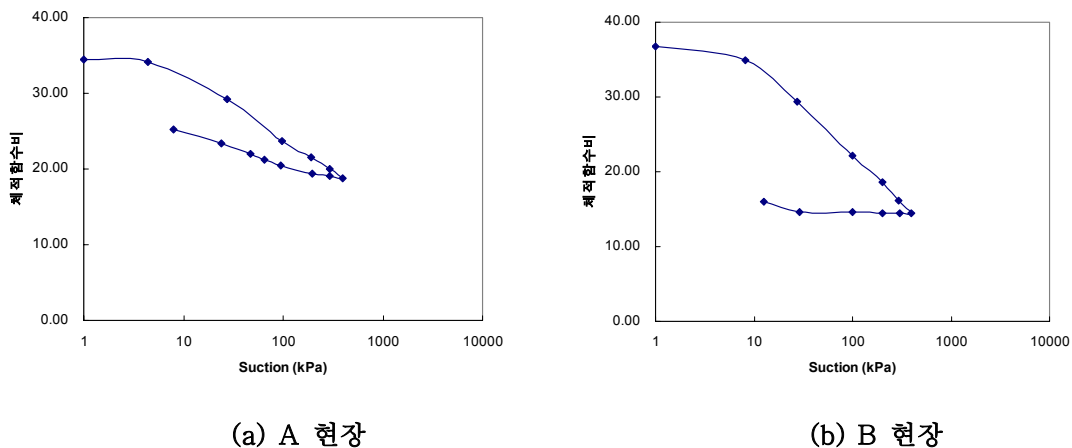


그림 5. 측정된 함수특성곡선

$$\theta_u = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

식(1)에서 θ_u 는 흙의 불포화시의 체적함수비, θ_s 는 흙의 포화시의 체적함수비, $C(\psi)$ 는 보정계수로서 식(2)로 표현되고, e는 로그지수 값, 그리고 a, n, m 은 계수값들이다.

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right)} \quad (2)$$

식(2)에서 ψ_r 잔류함수비에 대응되는 모관흡수력으로서 그 크기는 대개 1500-3000 kPa 이다. 그림 6은 측정된 데이터와 Fredlund와 Xing(1994)의 방정식에 의한 곡선을 보여준다. A 현장 흙시료의 포화시 체적함수비는 $\theta_s = 34.09$ 이고, 각 계수값들은 $a=95, n=0.68, m=1.23$ 이고, B 현장 흙시료의 포화시 체적함수비는 $\theta_s = 34.95$ 이고, 각 계수값들은 $a=100, n=0.8, m=1.62$ 이다.

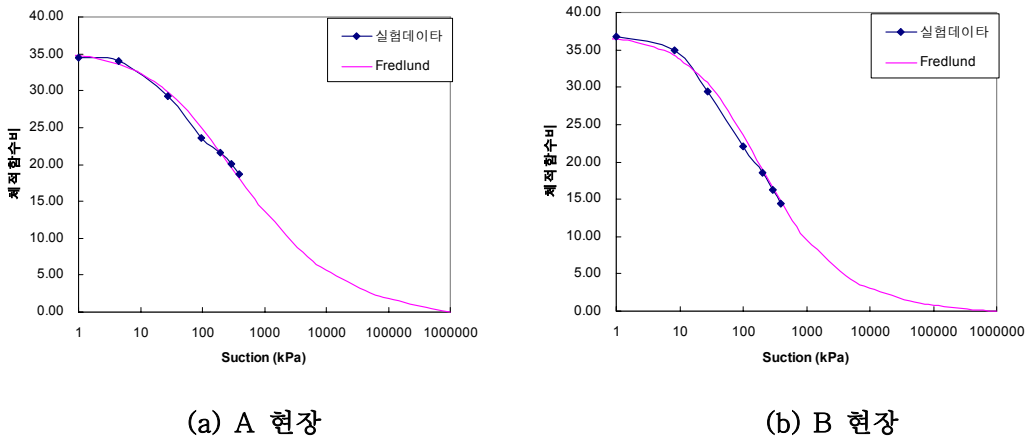


그림 6. 방정식에 의한 함수특성곡선

3.3 투수계수방정식

불포화토의 투수계수방정식을 결정하는 방법은 실험에 의해 직접 측정하는 방법과 함수특성곡선과 포화투수계수로부터 이론적으로 결정하는 방법이 있다. 불포화토의 투수계수측정은 매우 어려운 작업이어서 보통 이론적인 방법에 의한 결정법이 보통 사용된다. 이 연구에서는 이론적인 방법인 Fredlund 등(1994)에 의해서 제시된 식(3)을 사용하여 투수계수방정식을 결정하였다.

$$k_r = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

여기서 k_r 포화시 투수계수에 대한 불포화시 투수계수에 대한 비, b는 1000000에 자연로그를 취한 값이고, θ' 는 식(1)을 모관흡수력 ψ 에 대해 미분한 값이다, ψ_{aev} 는 공기진입치(Air entry value)라 불리는데 이 값은 공기가 포화된 흙시료로 들어가기 시작할 때의 모관흡수력이다. 식(3)은 다음과 같은 수치적분(Numerical integration) 절차에 의해서 풀 수 있다. 먼저 a 와 b 를

다음과 같이 각각 적분의 하한 및 상한으로 놓자.

$$a = \ln(\psi_{aev}), \quad b = \ln(1000000) \quad (4)$$

그런 다음 구간 $[a, b]$ 를 같은 크기 Δy 의 N 개의 간격으로 분할한다. 그러면,

$$a = y_1 < y_2 < \dots < y_N < y_{N+1} = b, \quad \Delta y = \frac{b-a}{N} \quad (5)$$

식(3)의 분모는 다음과 같이 구해진다.

$$\int_{\ln(\psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy \approx \Delta y \sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta_s}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i}) \quad (6)$$

여기서 \bar{y}_i 는 i 번째 간격 $[y_i, y_{i+1}]$ 의 중간점이다. 식(1)의 미분 θ' 는 다음과 같다.

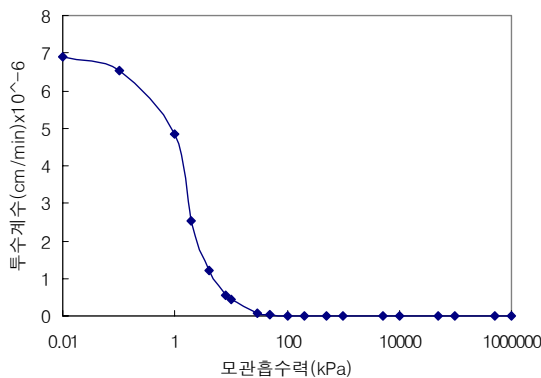
$$\theta'(\psi) = C'(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m} - C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^{m+1}} \frac{mn(\psi/a)^{n-1}}{a[e + (\psi/a)^n]} \quad (7)$$

여기서 $C'(\psi)$ 는 식(2)를 미분한 값이다.

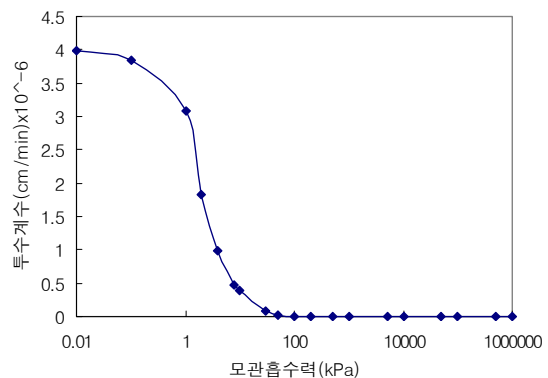
$$C'(\psi) = \frac{-1}{(\psi_r + \psi) \ln\left(1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right)} \quad (8)$$

공기진입치(Air entry value) ψ_{aev} 와 10^6 kPa 사이에 있는 임의의 모관흡수력 ψ 에 대해서 자연 로그를 취한 값 $\ln(\psi)$ 는 구간 $[a, b]$ 에 있다. $\ln(\psi)$ 가 j 번째 구간 $[y_j, y_{j+1}]$ 에 있다면, 식(3)의 분자는 다음과 같다.

$$\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy \approx \Delta y \sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta(\psi)}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i}) \quad (9)$$



(a) A 현장



(b) B 현장

그림 7. 투수계수-모관흡수력 관계곡선

따라서 모관흡수력 ψ 에서 투수계수의 비 $k_r(\psi)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$k_r(\psi) \approx \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta(\psi)}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta_s}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i})} \quad (10)$$

그림 7은 식 (10)을 사용하여 구해진 불포화토의 투수계수와 모관흡수력 간의 관계곡선을 보여 준다.

4. 결론 및 요약

불포화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정을 위한 새로운 시험장치를 개발하였다. 개발된 시험장치는 모관흡수력의 측정범위가 1500kPa까지 가능하며, 모든 실험과정 즉, 포화투수계수시험과 건조과정 및 습윤과정의 함수특성시험에 있어 하나의 시료 만을 사용하므로 보다 정확한 함수특성곡선과 투수계수방정식이 얻어진다는 장점이 있다.

이 연구에서 얻어진 시험결과로부터 건조과정 함수특성곡선과 습윤과정 함수특성곡선 간에는 상당한 이력현상이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 개발된 시험장비는 불포화토의 이력현상 연구에 유용한 장비라 판단된다.

현단계에서는 불포화토의 함수특성곡선과 투수계수방정식의 결정을 위한 시험만을 하였으나 이 연구에서 개발된 시험장비의 가장 큰 장점은 현장의 불포화 상태를 모사하여 삼축압축시험이 가능토록 하였기에 불포화토의 전단강도 연구에 이용될 수 있다는 데 있다.

참 고 문 헌

1. Fredlund, D.G. (1975), "A Diffused Air Volume Indicator for Unsaturated Soils." *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 12, pp.533-539.
2. Fredlund, D.G. and H. Rahardjo (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
3. Fredlund, D.G. and A. Xing (1994), "Equation for the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, pp.521-532.
4. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.
5. Gardner, W.R. (1958), "Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water-table." *Soil Science*, 85, pp.228-232.
6. van Genuchten, M.T. (1980) "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.