# 불포화토의 투수계수 방정식의 적용성 평가

Applicability Evaluation of the Characteristics Equation for a Coefficient of Permeability of Unsaturated Soils

류태진* (충북대) · 송창섭**(충북대) · 임성윤***(충북대 )
Lyu, Tae Jin · Song, Chang Seob · Lim, Seong Yoon

* 충북대학교 대학원 석사과정
** 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과
*** 충북대학교 대학원 박사수료

**Abstract**

In order to treat flow problems for an unsaturated soils, it is required the mediation of the coefficient of permeability with variation of suction. The coefficient of permeability for soils can be determined by the direct or indirect methods. The direct methods of permeability can be performed either in the laboratory or in the field. The indirect methods can be predicted from the soil-water characteristics curve. Laboratory test methods to measure the coefficient of permeability can be categorized into two types, steady-state and unsteady-state.

In this study, the coefficient of permeability for unsaturated soils was determined by the modified apparatus for steady state-method(Klute, 1972) and was predicted from the equations of Brooks and Corey(1964) and Van Genuchten(1980). Experimental results were compared with predicted coefficient of permeability and verified applicability of the two equations.

## Ⅰ. 서론

불포화토 내부를 통과하는 물과 공기의 흐름을 해석하기 위해서는 포화도 또는 흡인력의 크기에 따라 달라지는 투수계수를 고려해야 한다. 포화도가 낮아지고 흡인력이 증가하면, 물의 흐름을 방해하는 공기의 양이 상대적으로 증가하여 물의 흐름을 차단하기 때문에 투수계수가 감소된다. 따라서 불포화토의 흐름을 해석하기 위해서는 불포화토 내의 물, 공기, 물과 공기의 혼합 상태의 흐름 및 이들 상호간의 작용에 대해서 규명되어야 한다.

본 연구에서는 불포화토의 투수특성을 규명하기 위하여 3가지의 시료를 선정하여 흡인력을 조절하면서 일련의 투수계수시험을 수행하였다. 공시체는 불교란 시료를 이용하여 자연 상태로 제작하였으며, 정수위 투수시험법을 사용하여 투수계수를 측정하였다. 아울러, 흙-수분 특성곡선을 이용하여 Brooks and Corey(1964)와 Van Genuchten(1980)의 제안식으로 투수계수를 예측하고, 이를 시험에 의한 투수계수를 비교 및 검토하여 기존 제안식의 적용성을 검토하였다.

## Ⅱ. 재료 및 실험 방법

### 가. 재료

시험에 사용된 시료는 경기 장흥의 화강토로서 통일 분류법상으로 SC에 속하며 #200 통과량이 50%이하로, 저소성의 사질 성분이 함유된 시료이다. 사용된 시료는 세 가지이며, 시료의 물리적 성질은 Table 1.과 같고, 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같으며, 포화투수계수는 Table 2.에 정리하였다.

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

Table. 1 Physical properties of soil samples

| Samples | LL (%) | PI (%) | $G_s$ | Grain size distribution(%) | | | | | | USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 4.76 m/m | 2.0 m/m | 0.43 m/m | 0.25 m/m | 0.15 m/m | 0.074 m/m | |
| A | 32.7 | 10.1 | 2.69 | 93.3 | 80.0 | 48.9 | 38.6 | 27.8 | 19.7 | SC |
| B | 33.6 | 10.6 | 2.65 | 96.3 | 87.2 | 49.9 | 40.6 | 34.9 | 30.0 | SC |
| C | 32.3 | 10.1 | 2.55 | 96.6 | 91.4 | 58.8 | 44.8 | 30.2 | 20.0 | SC |

Table. 2 Saturated coefficient of permeability

| Samples | Coefficient of permeability ($k_s$ (㎝/s)) |
|---|---|
| A | $7.57 \times 10^{-5}$ |
| B | $6.68 \times 10^{-6}$ |
| C | $3.74 \times 10^{-5}$ |

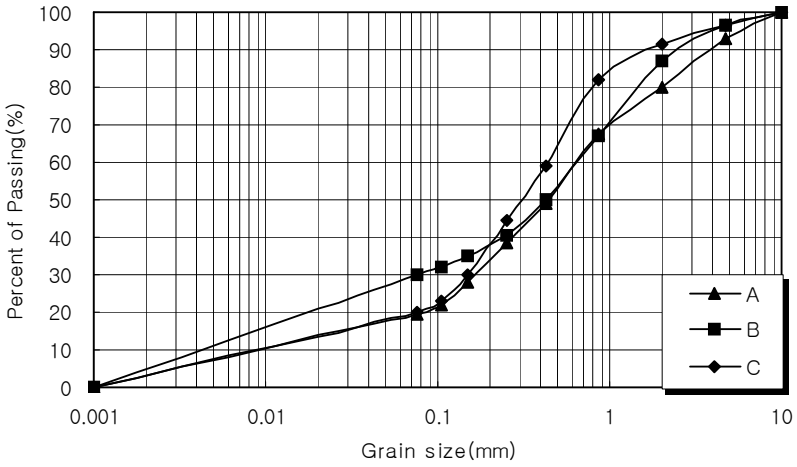


Fig. 1 Grain size distribution curve

나. 공시체의 제작

공시체는 불교란 시료를 이용하여 제작하였다. 공시체의 크기는 시료의 평형 상태에 도달하기 위한 시간과 몰드 내부에서의 텐시오미터를 이용한 압력수두의 측정을 고려하여 지름 50mm, 높이 50mm의 몰드를 사용하였다(Klute, 1965, 지름은 25~100mm, 높이는 10~50mm로 제안).

다. 실험방법

1) 시험기구

본 연구는 Klute(1965)가 제안한 정상법을 수정하여 불포화 투수계수 측정기를 사용하였으며, 모식도는 Fig. 2와 같으며, 세부 단면은 Fig. 3과 같다. 시료와 몰드의 상부와 하부의 뚜껑에는 1bar의 세라믹 디스크를 설치하여 일정한 압력 이상에 해당하는 수분 유출을 방지하였고, 좌측면에 약 20mm 간격으로 1bar의 세라믹 팁을 설치하여 마노미터를 연결하였다. 유출량의 측정을 위하여 하부에 뷰렛을 설치하고 하부 뚜껑에 연결시켰다. 측면에서 가해지는 공기압의 변화로 흡인력이

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

조절되고, 상부의 정상 침투에 의해 물이 공급되며 세라믹 팁에 연결된 마노미터에서 측정되는 압력수두차에 의하여 투수계수가 결정되도록 고안되었다. 시험 동안에 불포화 상태의 유량이 매우 작기 때문에 몰드를 통한 물의 외부유출은 투수계수 측정 시 오차를 발생하므로, 몰드 벽면의 세라믹 팁의 연결구와 공기압 주입구를 나사식으로 만들어 "o-ring"을 설치하고, 몰드와 맞닿는 상부와 하부의 뚜껑에도 "o-ring"을 설치하였다. 또한, 시료의 상부 및 하부의 세라믹 디스크와 시료가 서로 부착되지 않으면 시험 중 연속적인 물의 흐름이 발생되지 않으므로, 측정에 상당한 오차를 발생하기 때문에 시료를 사이에 둔 뚜껑의 외부에 원형철판을 부착하고 나사형식의 봉을 서로 연결하여 고정함으로써 긴밀한 부착을 유지시켰다.

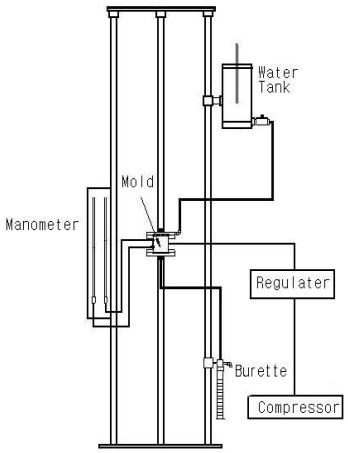


Fig. 2 Modified steady state method apparatus

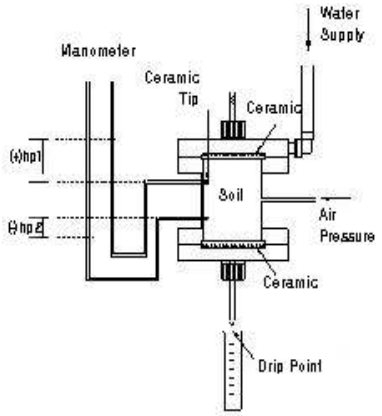


Fig. 3 Cross section of apparatus

2. 시험방법

제작된 공시체 몰드 상·하부에 뚜껑, 원형철판은 부착시킨 후, 나사봉을 이용하여 시료와 세라믹 디스크를 완전히 밀착시키고, 측면에 세라믹 팁과 마노미터를 연결한다. 상부의 저수조와 하부의 뷰렛으로 연결되는 튜브를 설치하여 시간의 경과에 따라 튜브에 공기가 없이 물만 연속적으로 흐르면 시료가 완전히 포화되었음을 알 수 있다. 상부의 저수조와 하부의 뷰렛의 높이를 조절하여 일정수두를 유지시고, 마노미터의 눈금은 시료에 부착된 세라믹 팁의 높이와 같게 조절하고 한다. 공기압 주입구에 연결된 압력조절기에서 공기압을 변화시키면서 일정한 압력에서 평형상태를 유지한 후, 마노미터 눈금의 변화와 뷰렛에서 유출량을 측정한다. 공기압은 0kpa에서 90kpa의 범위에서 4단계(30kpa, 50kpa, 70kpa, 90kpa)로 나누어 시험하였다.

3. 불포화토의 투수계수 예측을 위한 제안식

(1) Brooks and Corey(1964)의 제안식

Brooks and Corey(1964)의 제안식은 흙-수분 특성곡선의 흡인력(matric suction)과 포화도의 관계에서 유효포화도($S_e$)와 잔류포화도($S_r$)를 도출하여, 흡인력과 유효포화도의 관계에서 도출되는 계수로 투수계수를 예측한다(1, 2). 사용되는 계수를 보면, $(U_a - U_w)_b$는 간극에서 수분이 빠져 나가기 시작하는 흡인력이고, λ는 곡선의 기울기를 나타내며 η는 λ에 의해 나타나는 계수이다.

$$k_w = k_s \qquad (u_a - u_w)_b \le (u_a - u_w)_b \quad \text{----------} \quad (9)$$

$$k_w = k_s \left[ \frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right]^{\eta} \quad (u_a - u_w)_b > (u_a - u_w)_b \quad \text{---------- (10)}$$

where, $(U_a - U_w)_b$ = 공기함입저항치(air entry value of the soil)

$(U_a - U_w)$ = 흡인력(matric suction)

$k_s$ = 포화투수계수(coefficient of permeability at saturation)

$k_w$ = 불포화투수계수(coefficient of permeability at unsaturation)

$\eta$ = 실험상수(an empirical constant (2+3 $\lambda$))

$\lambda$ = 간극분포지수(pore size distribution index)

(2) Van Genuchten(1980)의 제안식

Van Genuchten(1980)의 제안식에 의한 투수계수의 예측은 흙-수분 특성곡선의 체적함수비( $\theta$ )과 압력수두(h)의 관계에서 포화체적함수비( $\theta_s$ )와 잔류체적함수비( $\theta_r$ )를 이용하여 도출되는 계수로 투수계수를 예측한다(3). 사용되는 계수를 보면, $m$과 $n$은 투수계수가 감소하는 기울기로 표현되고 $\alpha$는 압력수두와 계수 $m$에 의해 도출되어 투수계수가 감소하기 시작하는 변곡점의 흡인력에 관계되는 계수이다.

$$k_w = \frac{k_s}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

## Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 흡인력에 따른 투수계수의 변화

각 시료의 흡인력에 따른 투수계수를 나타내면 Table 4.와 같다. Table 4.는 같은 종류의 시료일지라도 흡인력의 변화에 따라 투수계수 값이 달라지는 것을 나타내고 있다. 투수계수는 일정 다짐율에서 흡인력의 증가에 따라 감소하고, 시료의 종류에 따라 0kPa ~ 90kPa의 범위에서 투수계수의 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서 볼 수 있는 그래프의 변곡점은 흙-수분 특성곡선의 변곡점과 거의 일치한다. 이와 같이 투수계수의 결정에 흡인력이 중요하게 작용하며, 흙의 종류와 흡인력의 변화에 따라 투수계수의 변화에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

Table. 3 Variation of coefficient of permeability with suction

| Samples | Void ratio | Suction(kPa) | Coefficient of permeability( $k_w$ ) |
|---|---|---|---|
| A | 1.075 | 0 | $7.57 \times 10^{-5}$ |
| | | 30 | $2.95 \times 10^{-5}$ |
| | | 50 | $4.46 \times 10^{-6}$ |
| | | 70 | $4.72 \times 10^{-7}$ |
| | | 90 | $7.07 \times 10^{-8}$ |
| B | 0.979 | 0 | $6.68 \times 10^{-5}$ |
| | | 30 | $8.12 \times 10^{-6}$ |
| | | 50 | $2.52 \times 10^{-7}$ |
| | | 70 | $3.91 \times 10^{-8}$ |
| | | 90 | $7.88 \times 10^{-9}$ |
| C | 0.964 | 0 | $3.74 \times 10^{-5}$ |
| | | 30 | $1.13 \times 10^{-6}$ |
| | | 50 | $5.78 \times 10^{-8}$ |
| | | 70 | $6.87 \times 10^{-9}$ |
| | | 90 | $8.83 \times 10^{-10}$ |

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

2. 다짐율에 따른 투수특성

다짐율에 따른 투수계수의 변화는 Fig. 4와 같다. 그림과 같이 모든 시료는 동일한 흡인력에서 다짐율의 감소, 즉 간극비의 증가에 따라 투수계수는 증가하였다. 이것은 간극비의 증가에 따라 간극의 체적이 커짐으로써 간극내의 흐름량이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, 흡인력 90kPa의 흡인력에서 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화량은 포화투수계수의 변화량보다 크다는 것을 알 수 있다.

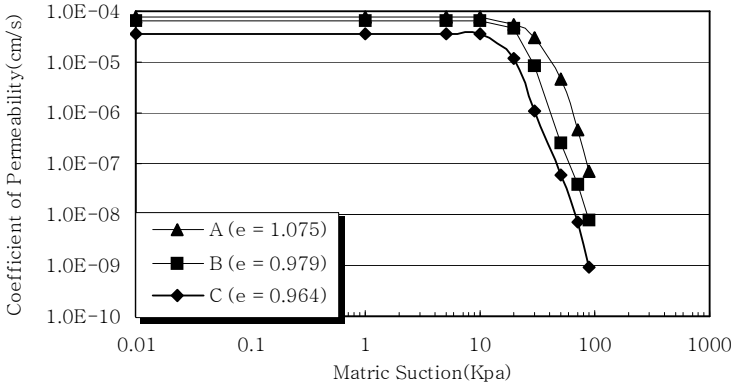


Fig. 4 The coefficient of permeability versus suction

3. 실험결과와 제안식의 비교

간극비의 변화에 따른 실험결과와 제안식에서 간극비의 변화에 따라 각 계수 값을 달리 적용한 예측결과를 비교하여 도시하면 Brooks and Corey의 제안식에 의한 것은 Fig. 5와 같고, Van Genuchten에 의한 것은 Fig. 6과 같다. 예측결과와 실험결과를 비교해 보면 두 제안식 모두 실험결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 현장에 적용할 수 있는 투수 특성을 잘 나타내지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히 간극비가 달라지는 경우에는 각 제안식에 적용되는 계수의 값이 달라지므로 전반적인 불포화토의 투수특성을 잘 묘사하지 못하는 것으로 나타난다.

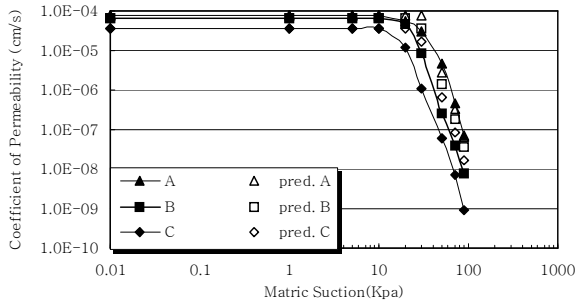


Fig. 5 Comparison of experimental data with Brooks and Corey's data

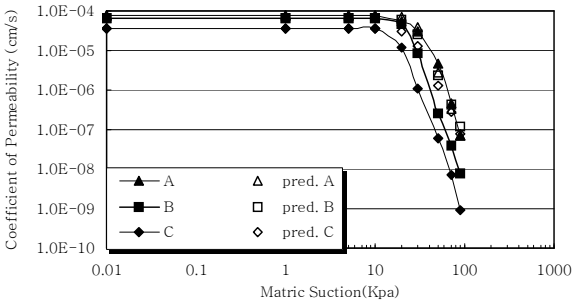


Fig. 6 Comparison of experimental data with Van Genuchten's data

## Ⅳ. 결론

Klute(1972)의 정상법에 의한 수정된 불포화 투수측정기를 사용하여 사질의 A, B, C 세 가지의 시료로 불포화 투수계수를 측정하고, Brooks and Corey와 Van Genuchten의 제안식을 흙-수분 특성곡선으로부터 투수계수를 예측하여 시험결과와 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

1. 불포화상태의 투수계수는 간극비가 일정한 경우 흡인력의 증가에 따라 감소하였으며, 흡인력에 따른 투수계수의 변화를 나타내는 그래프에서 볼 수 있는 변곡점의 위치는 흙-수분 특성곡선의 변곡점과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

2. 모든 시료는 동일한 흡인력에서 간극비의 증가에 따라 투수계수가 증가하였으며, 이는 간극비가 증가하면 간극의 체적이 커져 간극 내의 흐름량이 증가하기 때문으로 판단된다.

3. Brooks and Corey의 제안식에서 투수계수를 예측하기 위한 계수로 사용되는 $(U_a - U_w)_b$, λ, η는 간극비의 변화에 따라 값을 달리 적용하였으며, 간극비가 증가할수록 증가하였다. 그러나 제안식은 간극비의 변화를 고려하고 있지 않기 때문에 간극비가 달라지는 경우에는 각 계수를 달리 적용해야 하며, 간극비를 고려한 제안식이 요구되는 실정이다.

4. Van Genuchten의 제안식에서 투수계수를 예측하기 위한 계수로 사용되는 α는 감소하였고, $m$, $n$은 증가하였다. Brooks and Corey의 제안식에서 예측된 투수계수와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 간극비가 변화함에 따라 투수계수 예측을 위한 계수 값이 달라지는 것을 알 수 있다.

5. Brooks and Corey 및 Van Genuchten의 제안식은 간극비가 일정한 경우에 예측결과와 시험결과가 그 경향은 비슷하다는 것을 알 수 있었지만 현장에 적용하기 위한 투수특성 잘 나타내기 위해서는 간극비가 달라지는 경우를 고려해야 한다. 간극비가 달라짐에 따라 적용되는 계수의 값이 달라지기 때문에 전반적인 불포화토의 투수특성을 묘사하지 못하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌


1. Song, C. S., 1994. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated soil. Ph.D Thesis. Seoul National University.(in Korean)

2. Kim, S. K. and Ch. H. Ryu., J. H. Song., 1996. Measurement of Soil-Water Characteristic for Different Unsaturated Soils. Journal of the Korean Geotechnical Society 12(6) : 139-151. (in Korean)

3. Song, C. S. and M. H. Kim. 2003, Experimental Study for Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Soil. Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers 45(6) : 153-161. (in Korean)

4. Klute. A., 1965, Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil, Amer. Soc. of Agronomy, pp. 253-261.

5. Brooks. R. H. and A. T. Corey., 1966, Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, J. Irrigation and Drainage, Div., ASCE IR 2, vol. 92, pp. 61-88.

6. Klute. A., 1972, The Determination of The Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils, Colorado State University and USDA-ARS-SWCRD, pp. 264-276.

7. Van Genuchten. M. TH., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 982-898.

8. Fredlund D. G. and A. Xing, 1994, Equation for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, pp. 521-532.



2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)