

불포화토의 투수계수분석 및 투수계수 방정식의 적용성 평가

The Analysis of Permeability Coefficient and the Evaluation of Equations of Permeability Coefficient for an Unsaturated Soils

임 성 윤¹ Lim, Seong-Yoon

류 태 진² Lyu, Tae-Jin

Abstract

The coefficient of permeability for a soil can be determined by the direct or the indirect method. The direct method of permeability can be performed either in the laboratory or in the field. The indirect method can be predicted from the soil-water characteristic curve. In this study, the coefficient of permeability for an unsaturated soil was determined by the modified apparatus of steady-state method (Klute, 1972) and was predicted from the equations of Brooks & Corey (1964) and van Genuchten (1980). The experimental results were compared with predicted coefficient of permeability and the applicability of the two equations (from Brooks & Corey, van Genuchten) was reviewed.

요 지

불포화토의 투수특성을 규명하기 위하여 3가지의 시료를 선정하고 흡-수분 특성 시험을 선행한 후, 흡인력을 조절하면서 일련의 투수계수시험을 수행하였다. 공시체는 불교란 시료를 사용하여 자연 상태로 제작하였으며, 정수위 투수시험법을 이용하여 투수계수를 측정하였다. 아울러, 흡-수분 특성곡선에서 도출된 계수를 이용하여 Brooks and Corey(1964)와 van Genuchten(1980)의 제안식으로 투수계수를 예측하였고, 이를 시험에 의한 투수계수와 비교 및 검토하여 기존 제안식의 적용성을 검토하였다.

Keywords : Matric suction, Permeability coefficient, Unsaturated soil

1. 서 론

불포화토의 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 해석하

기 위해서는 불포화토 내의 물, 공기, 물과 공기의 혼합 상태의 흐름 및 이들 상호간의 작용에 대해서 규명되어야 한다.

불포화토의 흐름에 대한 연구는 최초로 Buckingham (1907)의 모세관 포텐셜에 대한 논문에서 처음으로 토양수분에 포텐셜(potential) 개념을 적용하면서 시작되었고, 물의 흐름문제에 대하여 Gardner(1958)는 불포화 투수계수의 관계식을 압력수두의 함수로 나타내었다.

1 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 공학박사 (Members, Researcher, Structure & Geotechnical Research Division Expressway & Transportation Technology Institute, soilab73@naver.com, 교신저자)

2 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 공학석사 (Members, Researcher, Structure & Geotechnical Research Division Expressway & Transportation Technology Institute)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Brooks & Corey(1964)는 흡인력, 공기함입저항치와 포화도 사이의 관계식을 제안하였고, Neuman(1973)은 체적함수율의 함수로 표시하였다. Klute(1972)는 정상법과 비정상법의 불포화투수시험 방법을 비교·검토하여 비정상법이 정상법에 비해 정확성이 떨어진다고 하였고, van Genuchten(1980)은 흡인력에 따른 체적함수비로 나타나는 흡-수분 특성곡선으로부터 투수계수 방정식을 제안하였다.

국내에서 류(2000)는 화강풍화토의 투수특성을 연구하였고, 황 등(2004)은 흡-수분 특성곡선에 근거한 예측함수를 사용하지 않고 피스톤 펌프 기법과 역해석 기법을 이용하여 불포화 투수계수함수를 구하는 방법을 제시하였으며, 신 등(2004)은 입도분포곡선으로부터 예측된 흡-수분 특성곡선으로 불포화 투수계수를 예측하였다.

본 연구에서는 불포화토의 투수특성을 규명하기 위하여 3가지의 시료를 선정하고 흡-수분 특성 시험을 선행한 후, 흡인력을 조절하면서 일련의 투수계수시험을 수행하였다. 공시체는 불교란 시료를 사용하여 자연 상태로 제작하였으며, 정수위 투수시험법을 이용하여 투수계수를 측정하였다. 아울러, 흡-수분 특성곡선에서 도출된 계수를 이용하여 Brooks and Corey(1964)와 van Genuchten(1980)의 제안식으로 투수계수를 예측하였고, 이를 시험에 의한 투수계수와 비교 및 검토하여 기존 제안식의 적용성을 검토하였다.

2. 재료 및 시험 방법

2.1 재료

우리나라 전역에 널리 분포하는 화강토로 SC, CL, ML 세 가지의 시료를 사용하였다. A는 0.074mm 체 통과량 50% 이하의 사질 성분이 많은 비소성 흙이고, B는 0.074mm 체 통과량 50% 이상의 점토성분의 저소성의 흙이다. 그리고 C는 0.074mm 체 통과량 50% 이상의 실트성분의 저소성의 흙이다. 표 1은 세 가지 시료에 대한 물리적 성질, 그림 1은 입도분포곡선을 나타낸다. 그림 2는 각 시료의 간극비가 가장 큰 상태에서 흡인력에 따른 체적함수비의 변화를 나타낸 흡-수분특성곡선이다. 여기서 흡인력은 간극공기압에서 간극수압을 뺀 값 ($u_a - u_w$)을 말한다.

2.2 공시체 제작

간극비와 흡인력의 변화가 투수계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 A시료는 불교란 상태로 간극비가 서로 다른 지역의 세 가지 시료를, B와 C시료는 인위적으로 간극비를 조절하여 공시체를 제작하였다(최대다짐 기준으로 건조축 90%, 80%). 표 2는 각 공시체의 초기 조건을 나타내었다.

표 1. 시료의 물리적 성질

Samples	LL (%)	PI (%)	G _s	Grain size distribution(%)				γ_d (tf/m ³)	OMC (%)	USCS
				4.75	2.00	0.425	0.074			
				mm	mm	mm	mm			
A	32.9	10.3	2.63	96.5	86.2	52.5	23.3	1.31	21.2	SC
B	35.0	12.0	2.62	98.8	94.3	76.8	53.4	1.77	16.8	CL
C	47.4	1.5	2.63	99.9	95.5	78.4	52.0	1.55	23.9	ML

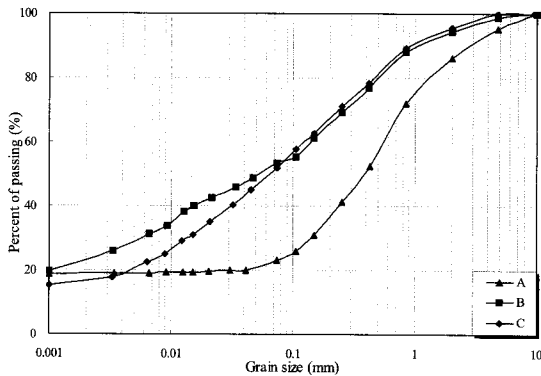


그림 1. 입도분포곡선

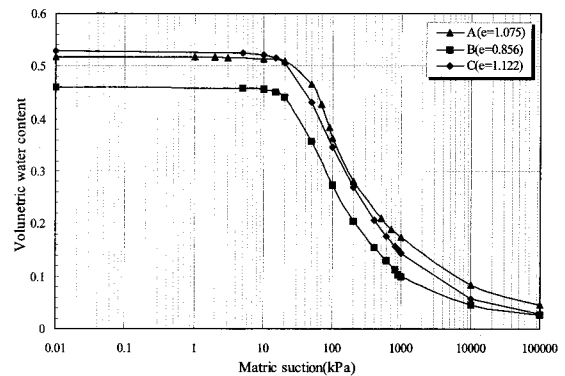


그림 2. 흡-수분특성곡선

표 2. 불포화 투수시험에 사용된 시료의 초기 조건

Samples	Void ratio	Dry unit weight (tf/m ³)	Saturated water content (%)
A	0.964	1.34	36.7
	0.979	1.33	37.2
	1.075	1.27	40.9
B	0.485	1.77	18.5
	0.650	1.59	24.8
	0.856	1.41	32.7
C	0.703	1.55	26.7
	0.887	1.34	33.7
	1.122	1.24	42.7

Klute(1965)는 공시체의 지름과 높이가 커지게 되면 시료가 평형 상태에 도달하기 위한 시간이 길어지고, 작게 설정하게 되면 몰드 내부에서 텐시오미터를 이용한 압력수두의 측정이 어려워지므로 몰드의 지름은 25~100mm, 높이는 10~50mm로 제안하였고, 본 연구에서는 공시체의 크기는 시료의 평형 상태에 도달하기 위한 시간과 몰드 내부에서의 텐시오미터를 이용한 압력수두의 측정을 고려하여 지름 50mm, 높이 50mm의 몰드를 사용하였다.

2.3 시험기구 및 방법

본 연구는 Klute(1965)가 제안한 정상법을 수정한 불포화 투수계수 측정기를 사용하였으며, 모식도는 그림 3과 같으며, 세부 단면은 그림 4와 같다. 시료와 몰드의 상·하부의 뚜껑에는 1 bar의 세라믹 디스크와 고무링을 설치하여 일정한 압력 이상에 해당하는 수분 유출과 sidewall leakage를 방지하였고, 좌측면에 약 2cm 간격으로 1 bar의 세라믹 팁을 설치하여 마노미터를 연결하였다. 유출량의 측정을 위하여 하부에 뷰렛을 설치하고 하부 뚜껑과 연결시켰다. 측면에서 가해지는 공기압의 변화로 흡인력이 조절되고, 상부의 정상침투에 의해 물이 공급되며 세라믹 팁에 연결된 마노미터에서 측정되는 압력수두 차에 의하여 투수계수가 결정되도록 고안되었다.

제작된 공시체 몰드를 조립한 후, 세라믹 팁과 마노미터를 연결하여 시료를 포화시킨다. 상부의 저수조와 하부의 뷰렛의 높이를 조절하여 일정수두를 유지시키고, 마노미터의 눈금은 시료에 부착된 세라믹 팁의 높이와 같게 조절하고, 공기압 주입구에 연결된 압력조절기에서 공기압을 변화시키면서 일정한 압력에서 평형상태

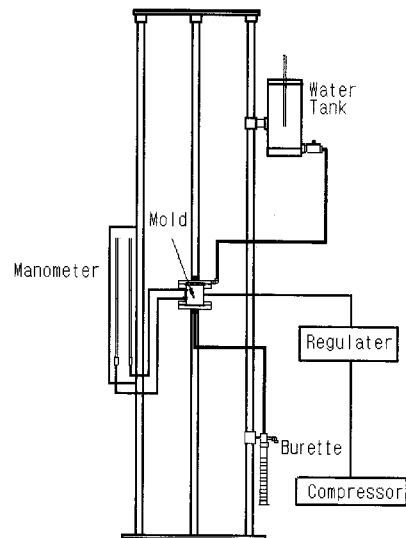


그림 3. Modified steady state method apparatus

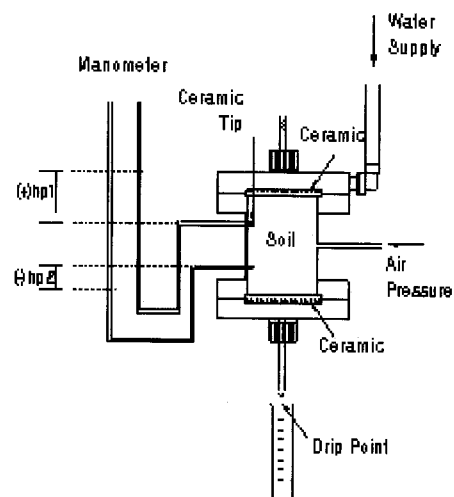


그림 4. Cross section of apparatus

를 유지한 후, 마노미터 눈금의 변화와 뷰렛에서 유출량을 측정한다. 공기압은 0 ~ 90kPa의 범위에서 5단계 (10, 30, 50, 70, 90kPa)로 나누어 시험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 간극비에 따른 투수계수의 변화

표 3은 각 시료의 포화투수계수를 정리한 것이고, 흙의 종류에 관계없이 간극이 투수계수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 간극비와 투수계수와의 관계를 이를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 일반적으로 간극비가 증가함에 따라 투수계수도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 간극비가 커지면 간극의 체적이 커져서 물의 흐름양이 증가하므로 투수계수가 증가하는 것으로 사료된다.

3.2 흙의 종류에 따른 투수계수의 변화

그림 6은 각 시료에서 간극비가 가장 클 때의 투수계수 변화를 도시한 것이다. 각 시료별 투수계수의 범위를 살펴보면, A시료는 약 $7.6 \times 10^{-5} \sim 2.6 \times 10^{-9}$ cm/s, B시료는 약 $4.1 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-10}$ cm/s, C시료는 약 $1.1 \times 10^{-7} \sim$

6.3×10^{-11} cm/s의 범위를 나타낸다. 일반적으로 투수계수는 A시료에서 크게 나타났으며, 이는 A시료가 사질의 불교란 시료로 다른 시료에 비해 간극비가 크기 때문으로 사료된다. 또한 B, C시료는 흡착수를 보유할 수 있는 점토질 및 실트질 시료로서 물의 흐름이 흡착수의 영향으로 인하여 현저히 낮아지게 되는 것으로 판단된다.

3.3 흡인력에 따른 투수계수의 변화

그림 7은 A, B, C시료의 흡인력에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것으로 동일한 시료일지라도 흡인력이 증가함에 따라 투수계수의 값이 감소하고, 간극비가 증가함에 따라 투수계수의 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 모든 시료가 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 흡인력이 증가하게 되면 간극 내 공기의 양이 많아져 물의 흐름을 방해하기 때문으로 사료된다.

또한 시료의 포화상태일 때와 흡인력 90kPa일 때의 투수계수의 차는 A시료가 약 1×10^4 cm/s, B시료와 C시료는 약 1×10^2 cm/s에서 1×10^3 cm/s로 차이를 보이고 있

표 3. 시료의 포화투수계수

Samples	Void ratio	Coefficient of permeability (k_w , cm/s)	Remark
A	0.964	3.74×10^{-5}	undisturb
	0.979	6.68×10^{-5}	
	1.075	7.57×10^{-5}	
B	0.485	1.14×10^{-7}	disturb
	0.650	2.03×10^{-7}	
	0.856	4.07×10^{-7}	
C	0.703	6.83×10^{-8}	
	0.890	8.70×10^{-8}	
	1.122	1.12×10^{-7}	

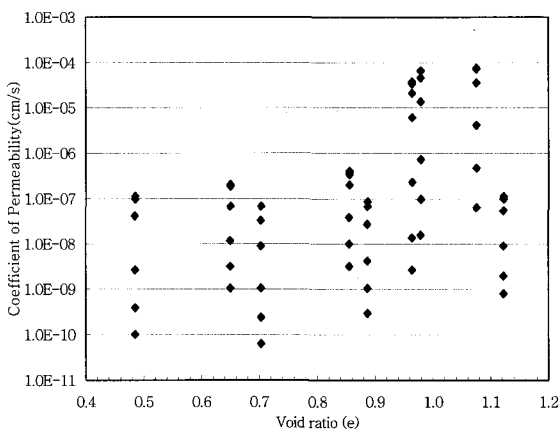


그림 5. 간극비에 따른 투수계수

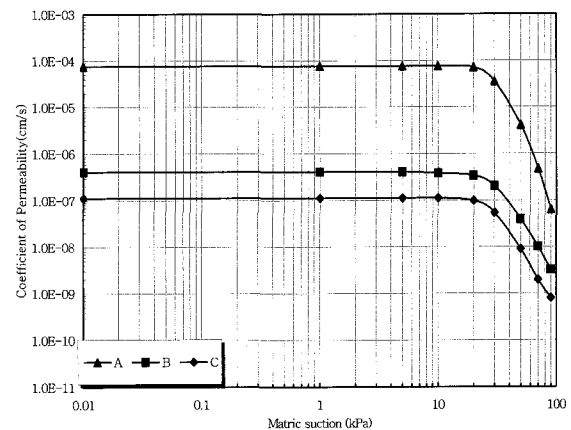


그림 6. 흙 종류에 따른 투수계수의 변화

다. 이것은 포화상태와 흡인력 90kPa일 때의 흡이 보유하고 있는 물의 양의 차이 때문으로 사료된다.

모든 시료에서 흡인력이 증가할수록 투수계수가 감소하였는데, 투수계수가 감소하기 시작하는 변곡점에서의 흡인력의 값은 흙의 종류에 따라 그 값에 차이가 있었으며 A시료는 약 30kPa, B시료는 약 24kPa, C시료는 약 20kPa로 도출되었다. 변곡점의 흡인력 값은 일반적으

로 흡이 보유하는 공기함입저항치(air entry value)와 거의 비슷한 값을 나타낸다. 공기함입저항치는 흙수분 특성곡선에서 도출되는 변곡점의 값으로 일반적으로 점토질, 실트질의 시료보다 사질의 시료가 더 작게 나타나지만, 본 연구에서는 각 시료의 채취 상태와 초기조건 상이함 등으로 인하여 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

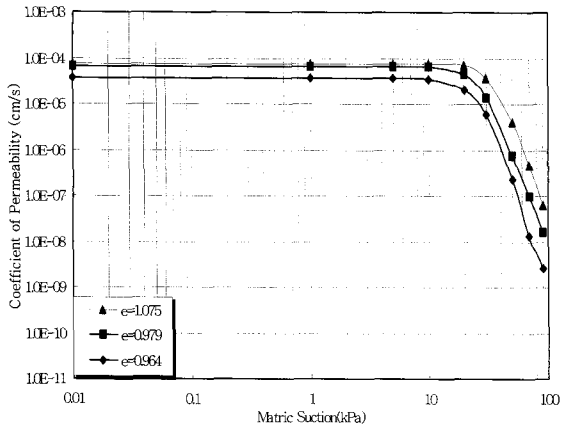
3.4 투수특성 방정식에 의한 투수계수의 적용성 평가

불포화 상태의 흐름을 파악하기 위하여 많은 연구자들은 투수계수의 예측을 위한 제안식에 대해 연구하였다. 그러나 각 제안식에 사용되는 계수들을 유도하는 방법에 따라 투수계수의 예측이 달라지고, 또한 흙의 종류, 간극비 등에 의해 다른 값을 나타내는 계수들을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 흙수분 특성곡선을 이용하여 Brooks & Corey(1964)와 van Genuchten(1980)의 방정식에 사용된 계수들을 도출하여 비교하였으며, 도출된 계수를 바탕으로 Brooks & Corey(1964)와 van Genuchten(1980)의 방정식에 의한 투수계수를 예측하여 실험결과와 비교하였으며, 각 방정식의 적용성을 검증하였다.

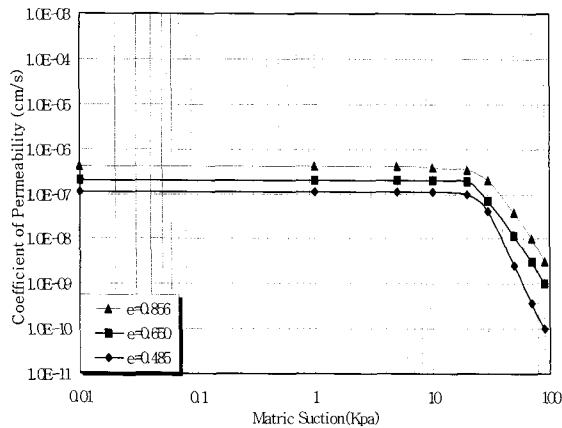
3.4.1 투수특성 방정식에 의한 계수의 도출

3.4.1.1 Brooks & Corey(1964)의 방정식에 의한 계수의 도출

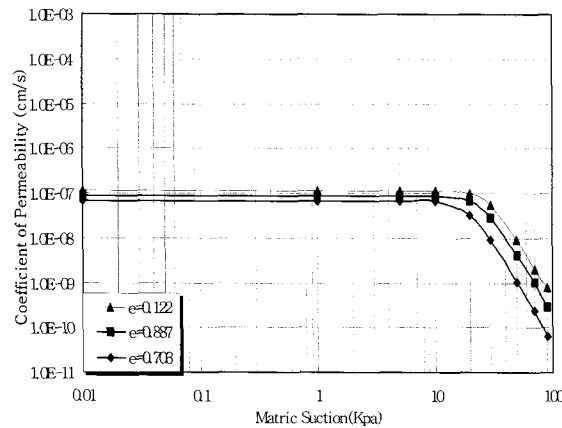
Brooks & Corey의 방정식에 사용되는 계수는 그림 8에서 보듯이 흡인력과 유효포화도의 관계에서 도출되



(a) Sample A



(b) Sample B



(c) Sample C

그림 7. 흡인력에 따른 투수계수의 변화

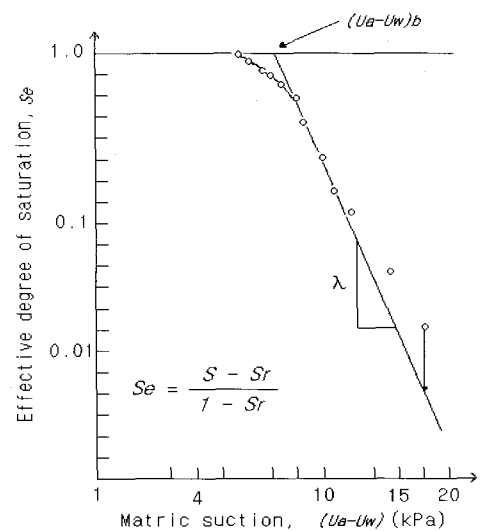


그림 8. Brooks & Corey(1964)에 의한 계수의 도출

표 4. Brooks & Corey(1964)에 의해 도출된 계수

Samples	Void ratio	$(u_a - u_w)_b$	λ	η
A	0.964	26.25	1.42	6.26
	0.979	27.65	1.44	6.34
	1.075	30.24	1.48	6.44
B	0.485	21.62	1.34	6.01
	0.650	23.03	1.36	6.09
C	0.703	15.37	1.19	5.58
	0.890	18.59	1.27	5.81
	1.122	20.20	1.31	5.92

고, 투수특성 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 k_w &= k_s && \text{for } (u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b \\
 k_w &= k_s \left[\frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right]^\eta && \text{for } (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- 여기서, $(u_a - u_w)_b$: 공기함입저항치,
- $(u_a - u_w)$: 흡인력,
- k_s : 포화 투수계수,
- k_w : 불포화 투수계수,
- λ : 간극크기분포지수,
- η : 경험상수(2+3 λ)

투수계수의 예측에 적용되는 각 계수들의 도출된 결과를 표 4에 나타내었고, 흙의 종류와 간극비에 따라 나타내면 그림 9~그림 11과 같다. 계수 $(u_a - u_w)_b$ 는 간극비의 증가에 따라 모든 시료에서 증가하였고, 이는 투수계수가 감소하기 시작하는 변곡점의 흡인력과 관계되므로, 각 시료의 간극비가 증가함에 따라 변곡점의 흡인력이 증가함을 알 수 있다.

간극의 크기와 관련한 계수 λ 와 η 는 A시료는 간극비의 증가 따라 급격히 증가하였으나 이에 비해 B, C시료는 완만한 기울기로 증가하였다. 계수 λ 와 η 는 투수계수가 감소하는 기울기와 관계되므로, 각 시료의 간극비가 증가함에 따라 투수계수의 기울기도 증가함을 알 수 있다.

3.4.1.2 van Genuchten(1980)의 투수특성 방정식에 의한 계수의 도출

van Genuchten의 방정식에 사용되는 계수는 그림 12에서와 같이 흙수분 특성에 따른 포화체적함수비와 잔류체적함수비를 이용하여 도출하며, 투수특성방정식은

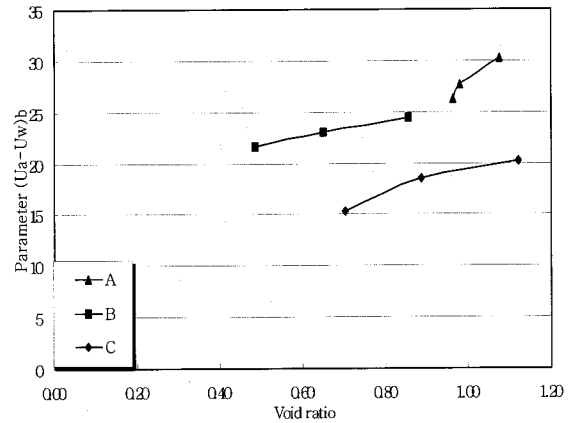


그림 9. 간극비에 따른 $(u_a - u_w)_b$ 의 변화

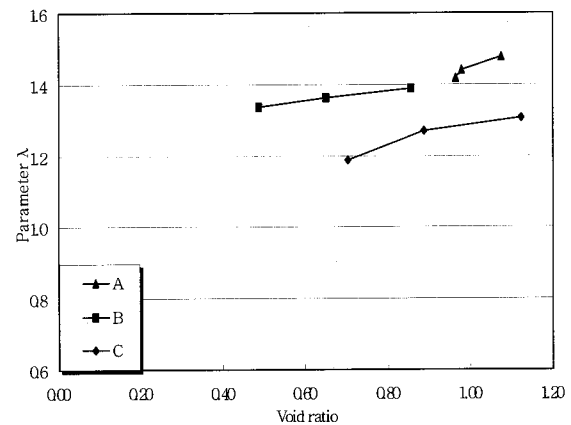


그림 10. 간극비에 따른 λ 의 변화

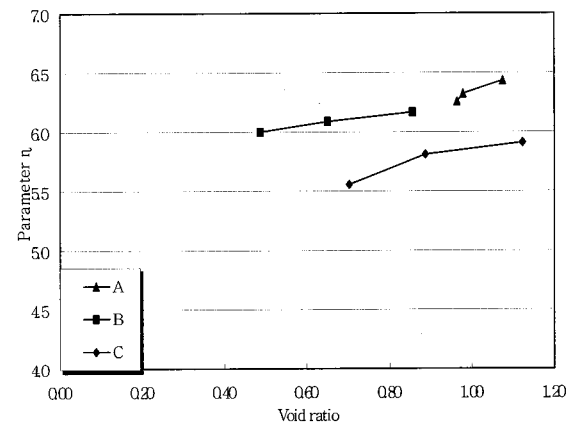


그림 11. 간극비에 따른 η 의 변화

식 (2)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 k_w &= \frac{k_s}{\left[1 + (\alpha(u_a - u_w))^n \right]^{(1 - \frac{1}{n})}} && (2) \\
 \alpha &= \frac{1}{h_p} \left(2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{(1-m)}
 \end{aligned}$$

여기서, k_s : 포화투수계수,
 k_w : 불포화투수계수,
 θ_s : 포화시 체적함수비,
 S_e : 유효포화도,
 θ_r : 잔류체적함수비,
 $(u_a - u_w)$: 흡인력,
 h : 압력수두,
 S_p : p점에서 곡선의 기울기

표 5는 도출된 계수를 요약한 것이고, 이를 흡의 종류와 간극비에 따라 나타내면 그림 13 ~ 그림 15와 같다. 그림 13과 그림 14에서 시료의 포화 및 잔류체적함수비의 중심점에 대한 기울기와 관련한 계수인 m 과 n 은 간극비가 증가할수록 증가하였다. B, C시료는 완만한 기울기로 증가하였으나 A시료는 기울기가 급하게 증가함을 알 수 있었다.

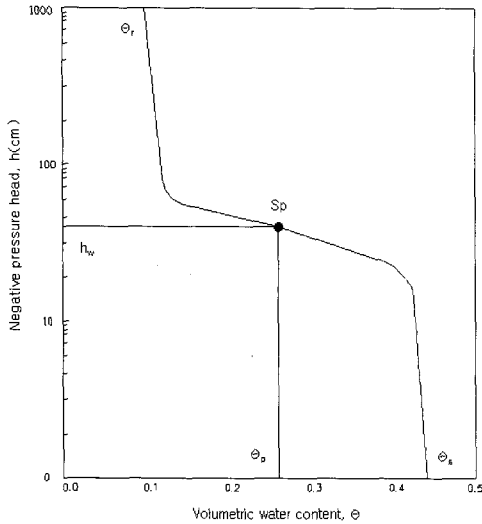


그림 12. van Genuchten(1980)에 의한 계수의 도출

표 5. van Genuchten(1980)에 의해 도출된 계수

Samples	Void ratio	m	n	α
A	0.964	0.826	5.753	0.038
	0.979	0.833	6.003	0.035
	1.075	0.851	6.721	0.026
B	0.485	0.759	4.158	0.044
	0.650	0.776	4.456	0.038
C	0.856	0.788	4.711	0.035
	0.703	0.745	3.926	0.054
	0.887	0.770	4.346	0.049
	1.122	0.795	4.889	0.042

그림 15에서 압력수두와 계수 m 에 의해 도출되어 공기함입저항치와 관계되는 계수 α 는 간극비가 증가할수록 감소하였다. B, C시료는 완만한 기울기로 감소하였으나 A시료는 기울기가 급하게 감소함을 알 수 있었다.

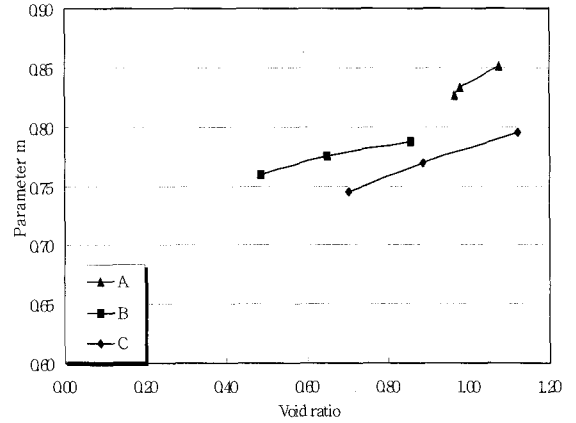


그림 13. 간극비에 따른 m 의 변화

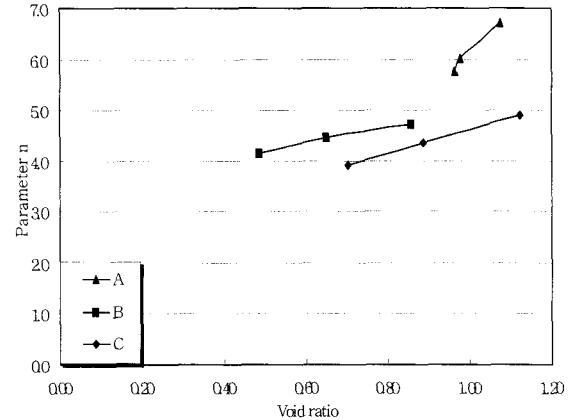


그림 14. 간극비에 따른 n 의 변화

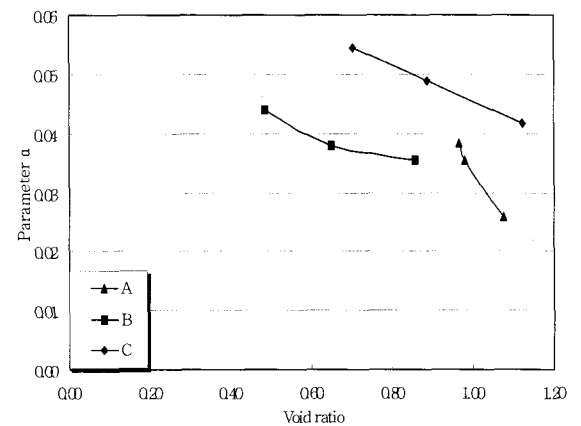
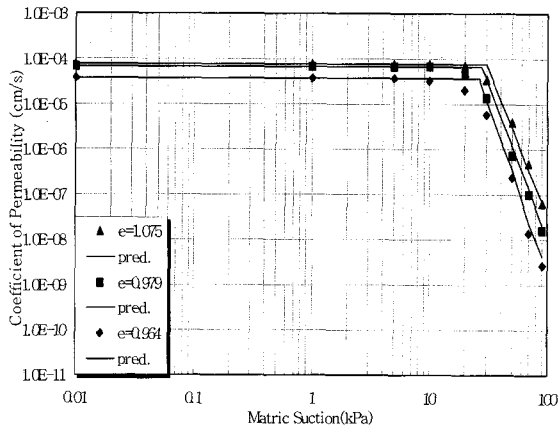


그림 15. 간극비에 따른 α 의 변화

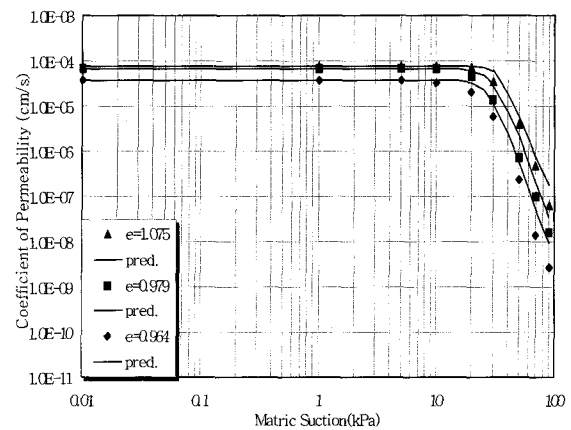
3.4.2 투수특성 방정식에 의한 적용성 평가

3.4.2.1 Brooks & Corey(1964)의 방정식에 의한 예측 및 적용성 평가

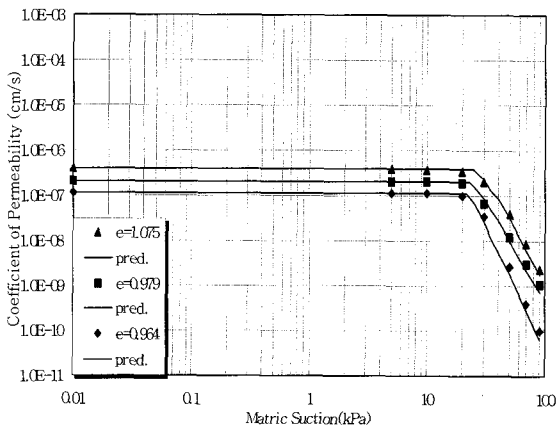
도출된 각 계수를 바탕으로 각 시료의 간극비와 흡인력의 변화에 따른 투수계수를 예측하여 시험결과와 비교하여 그림 16에 나타내었다.



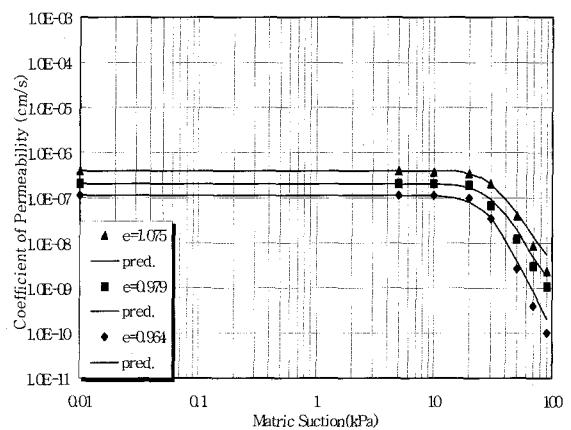
(a) A 시료



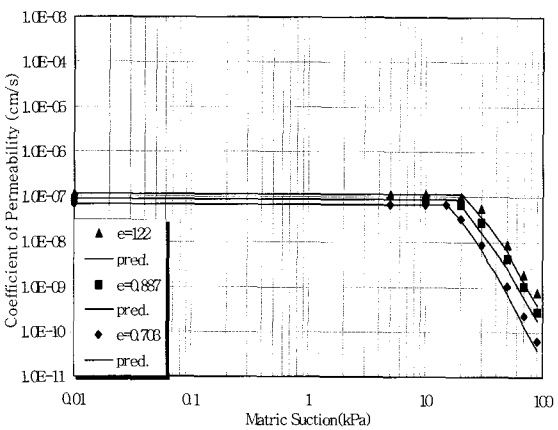
(a) A 시료



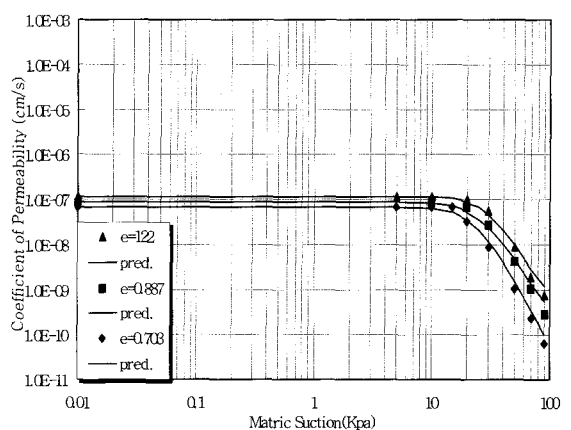
(b) B 시료



(b) B 시료



(c) C 시료



(c) C 시료

그림 16. Brooks and Corey(1964)에 의해 예측된 투수계수와 시험 결과와의 비교

그림 17. van Genuchten(1980)에 의해 예측된 투수계수와 시험결과와의 비교

기함입저항치와 비슷한 값을 보이는 투수계수곡선에서 변곡점의 흡인력은 예측가능 할 것으로 사료된다.

그러나 방정식에 의한 투수계수의 예측은 일정한 간극비에 대한 흡인력에 따른 투수계수의 변화는 잘 나타내고 있으나, 간극비의 변화를 고려하고 있지 않기 때문에 간극비가 달라지는 경우에는 흡수분 특성곡선이 달라지므로 이로부터 도출되는 각 계수를 달리 적용해야 할 것으로 판단되며, 아울러 간극비를 고려한 새로운 방정식의 제안이 요구된다.

3.4.2.2 van Genuchten(1980)의 방정식에 의한 예측 및 적용성 평가

van Genuchten의 방정식에 사용되는 계수를 이용하여 투수계수를 예측하여 시험결과와 비교하면 그림 17과 같다. van Genuchten의 방정식에 의해 예측된 결과는 Brooks & Corey에 의해 예측된 결과보다 변곡점의 흡인력은 시험결과와 더 일치하지만 흡인력이 증가할수록 실험결과보다 더 크게 나타났다. 모든 시료에서 예측값이 크게 나타나 Brooks & Corey에 의해 예측된 결과가 van Genuchten에 의해 예측된 결과보다 적용성이 좋을 것으로 판단된다.

마찬가지로, Brooks & Corey의 투수계수 예측에서 설명한 바와 같이 간극비가 달라지는 경우에는 각각의 계수를 달리 적용해야 할 것으로 판단되며, 간극비를 고려한 새로운 방정식의 제안이 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Klute(1965)의 정상법에 의해 수정된 불포화 투수시험기를 사용하여 물리적 및 역학적 성질이 다른 세 가지의 시료(SC, CL, ML)에 대한 불포화도의 투수계수를 분석하였다. 또한 흡수분 특성곡선을 이용하여 Brooks & Corey(1964)와 van Genuchten(1980)의 투수계수 방정식으로부터 투수계수를 예측하고 시험결과와 비교하여 방정식의 적용성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 흡수분 특성곡선은 시료가 같을 경우에는 동일한 간극비에 대한 흡인력의 변화를 나타내게 되므로 간극비가 달라지는 경우에는 정확한 값을 예측하기 곤란하므로 흡수분 특성곡선을 유도함에 있어 흡의 함수비 뿐 만 아니라 흡이 가지는 간극의 상태도

고려하여야 할 것이다.

- (2) 투수계수는 모든 시료에서 간극비가 일정하면 흡인력이 증가할수록 감소하고, 흡인력이 일정하면 간극비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 간극비가 커지면 즉, 간극의 체적이 커지면 물의 흐름이 증가하고, 흡인력이 증가하면 간극 내 공기의 양이 많아져 물의 흐름을 방해하기 때문으로 사료된다.
- (3) Brooks & Corey에 의해 예측된 결과가 van Genuchten에 의해 예측된 결과보다 시험결과와 더 일치함을 알 수 있었다. 하지만 방정식에 의한 투수계수의 예측은 일정한 간극비에 대한 흡인력에 따른 투수계수의 변화는 잘 나타내고 있으나, 간극비의 변화를 고려하고 있지 않기 때문에 간극비가 달라지는 경우에는 각 계수를 달리 적용하기 위한 새로운 방정식의 개발이 필요하다. 또한 이 때문에 두 방정식은 전반적인 불포화도의 투수특성을 반영하지 못한다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 류지협 (2000), "불포화 풍화토의 투수특성 측정", *한국수자원학회논문집*, 33(1), pp.133-142.
2. 송창섭·김명환 (2003), "불포화토의 흡수분 특성곡선에 관한 실험적 고찰", *한국농공학회지*, 45(1), pp.153-151.
3. 신은철·이학주·오영인 (2004), "불포화 준설매립 지반의 흡수분 특성곡선 및 불포화 투수계수 예측", *한국지반공학학회논문집*, 20(1), pp.109-120.
4. 황창수·김태형 (2004), "불포화 투수계수함수에 대한 연구", *한국지반공학학회논문집*, 20(3), pp.47-51.
5. Brooks, R. H. and A. T. Corey (1964), "Hydraulic Properties of Porous Media", *Colorado State University Hydrology Paper*, 3, pp.1-27.
6. Fredlund, D. G. and H. Rahardjo (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc., pp.14-149.
7. Fredlund, D. G. and A. Xing (1994), "Equation for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), pp. 521-532.
8. Fredlund, D. G., A. Xing and S. Huang (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), pp. 533-546.
9. Klute, A. (1965), "Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil", *American Society of Agronomy*, pp.253-261.
10. Klute, A. (1972), "The Determination of The Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soil", *Colorado State University and USDA-ARS-SWCRD*, pp.264-276.
11. van Genuchten, M. TH. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.982-898.

(접수일자 2007. 3. 8, 심사완료일 2008. 1. 8)