

함수특성에 근거한 국내 풍화토의 불포화 투수곡선 추정

Estimation of Unsaturated Permeability Function from Water Retention Characteristics for Korean Weathered Soils

김 윤 기¹ Kim, Yun-Ki

최 경 림² Choi, Kyung-Lim

이 성 진³ Lee, Sung-Jin

이 승 래⁴ Lee, Seung-Rae

권 형 석⁵ Kwon, Hyong-Seok

Abstract

Unsaturated permeability function is an important factor in the design and analysis of various unsaturated soil structures. Generally the permeability characteristics decrease as the matric suction increases and the trend is similar to water retention characteristics of a soil. The permeability of unsaturated soils can be obtained directly by laboratory tests or indirectly by estimation methods from other soil properties. For unsaturated soils sampled from 7 areas in KOREA, SWCCs and unsaturated permeability functions were obtained by experimental tests. The unsaturated permeability results were also compared with the unsaturated permeability functions derived from the SWCCs theoretically. However, the current estimation models of unsaturated permeability function did not express the unsaturated permeability characteristics. Therefore, the FXK-M permeability function was modified to predict more accurate permeability functions for Korean weathered soils using a correction factor that can be calculated from the air-entry value of SWCC. The new estimation model resulted in good agreements for all tested soils.

요 지

지반의 투수특성은 다양한 지반구조물의 설계 및 해석에서 중요한 지반물성이다. 특히 불포화 상태에서 모관흡수력의 영향을 받으며 모관흡수력 증가에 따라 감소하는 경향은 함수특성 변화와 유사하다. 불포화 투수계수는 실내실험을 통해 직접적으로 구하거나 함수특성곡선으로부터 유추된 이론식을 통해 간접적으로 얻을 수 있다. 본 논문에서는 국내 7개 지역에 대한 시료를 대상으로 함수특성실험과 본 연구에서 개발한 불포화 투수실험 장비를 이용하여 불포화 투수실험을 실시하였다. 지반의 함수상태를 나타내는 함수특성곡선이 불포화 투수계수와 밀접한 관련이 있으므로 함수특성곡선으로부터 불포화 투수곡선을 유추하는 여러 모델 결과와 실험결과를 비교하였다. 그러나 기존의 추정방법은 국내지반의 투수특성을 잘 표현하지 못하고 있다. 따라서 국내 풍화토의 불포화 투수곡선을 정확히 유추하기 위하여 보정계수를 적용하여 FXK-M 투수모델을 제시하였고 보정계수를 함수특성곡선의 공기함입치로부터 산정할 수 있는 수식을 제안하였다.

Keywords : Estimation of soil properties, Soil-Water characteristic curve, Unsaturated permeability function, Unsaturated soil, Weathered soil

1 정회원, 한국철도기술연구원 박사후연구원 (Member, Postdoc., Railroad Structure Research Department, KRRl)

2 SK건설 대리 (Assistant manager, Plant Business Management Team, SK E&C)

3 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Department, KRRl)

4 정회원, KAIST 건설및환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, srlee@kaist.ac.kr, 교신저자)

5 정회원, 삼성건설 기반기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Institute of Construction Technology, Samsung E&C)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반의 투수성은 사면과 터널의 안정성 해석, 매립지의 차수재 설계, 댐 설계 및 해석 등 여러 지반공학적 구조물 해석에서 중요한 인자로 인식되고 있다. 특히, 지하수위 위에 존재하는 불포화 사면에서 지반의 투수계수는 강우시 지표면 침투로 인한 사면의 거동 및 안정 해석을 위한 필수적인 지반물성이다. 이러한 필수적이고 중요한 지반물성임에도 불구하고 국내에서 대부분의 지반을 이루는 풍화토를 대상으로 한 투수성에 관한 연구가 미흡한 실정이므로 국내 불포화토의 투수성에 대한 충분한 이해와 실험이 필요한 실정이다.

일반적으로 비교적 변형이 발생하지 않는 지반에서 불포화 투수계수는 지반의 포화도, 즉 함수특성과 밀접한 관련을 맺고 있다. 이러한 함수특성은 물의 표면장력과 지반의 간극분포로 인하여 발생하는 모관흡수력의 함수로 표현이 되며, 이러한 관계를 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve, SWCC)이라한다(Fredlund & Rahardjo, 1993). 결과적으로 지반의 불포화 투수계수는 모관흡수력에 따라 변하게 된다.

불포화 투수계수를 구하는 방법은 실험으로부터 얻는 직접적인 방법과 추정기법을 이용하여 얻는 간접적인 방법으로 나뉘어진다. 직접적으로 실험을 통하여 불포화 투수계수를 얻고자 한 연구가 국내외적으로 진행되었다. Barden & Pavlakis(1971)는 셀 내부의 공기압과 수압을 조절하여 물과 공기의 투수계수를 동시에 측정하는 삼축투수장비를 개발하였다. 또한 Huang 등(1998)은 변형을 측정할 수 있는 투수장비를 이용하여 모관흡수력에 따른 시료의 간극비 변화를 고려한 불포화 투수 함수모델을 증명하고자 하였다. 국내에서는 김상규와 류지협(1996)과 류태진과 임성운(2008)이 원형강관 내부에 시료를 성형하여 투수계수를 구할 수 있는 불포화 투수장비를 개발하였다. 반면, 국외에서는 함수특성곡선과 불포화 투수곡선의 유사성을 이용하여 보다 쉽게 함수특성 실험으로부터 투수곡선을 유추하고자 하는 연구도 다양하게 진행되고 있다(Kunze 등, 1968 ; Campbell, 1973; Mualem, 1976 ; van Genuchten, 1980 ; Fredlund 등, 1994). 이 외에도 국내에서는 황창수와 김태형(2004)이 피스톤 펌프기법과 역해석 기법을 이용하여 불포화 투수계수함수를 구하기도 하였다. 하지만 불포화 상태의 투수계수에 대한 국내 연구는 해외에 비해 많이 미흡한 실정이며, 해외에서 개발된 투수곡선 추정모델에서

얻어진 결과가 국내 풍화토의 특성을 제대로 반영하기는 어렵다.

본 논문에서는 국내 여러 지역의 풍화토를 대상으로 삼축투수장비를 이용하여 포화상태와 불포화상태의 투수실험을 수행하여 국내 불포화토의 투수특성을 알아보고자 하였다. 또한 이들 지반의 함수특성과 실험에서 구한 투수성의 상호 연관성에 대해 규명하였고, 실험에서 얻은 투수값과 간접적인 방법으로 유추된 투수값을 비교하여 국내 지반에 대하여 적용할 수 있는 모델을 제시하고자 하였다.

2. 불포화 투수계수 추정 모델

불포화 투수곡선은 흙 내에 존재하는 물의 양에 따라서 영향을 받는다. 즉 함수비에 따라서 투수성이 변하게 된다. 함수특성곡선 또한 함수비에 따른 모관흡수력 변화를 표현하는 곡선이므로 투수곡선은 함수특성곡선과 유사한 형태를 보이는 것이 당연하다. 이에 따라 함수특성곡선으로부터 불포화 투수곡선을 추정하고자 하는 연구가 진행되어 왔다.

2.1 함수특성곡선

많은 연구자들이 실험에서 얻어진 함수특성을 곡선으로 표현하기 위하여 모델식을 제안하였다(Gardner, 1956; Brooks & Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund & Xing, 1994).

Brook & Corey (1964)는 간극크기분포지수(λ)를 이용하여 다음과 같은 식 (1)을 제안하였다.

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (1)$$

여기서, $\theta = (\theta_s - \theta) / (\theta_s - \theta_r)$: 정규화된 체적함수비; θ_s = 포화체적함수비; θ_r = 잔류체적함수비; θ = 현재 체적함수비; ψ_b = 공기함입치; ψ = 모관흡수력

van Genuchten (1980)은 모관흡수력과 정규화된 체적함수비의 관계를 다음 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha_v G \psi)^{n_{vc}}} \right]^{m_{vc}} \quad (2)$$

여기서, $\alpha_{vG}, n_{vG}, m_{vG} = \text{van Genuchten}$ 함수특성곡선 맞춤변수

Fredlund & Xing(1994)은 모관흡수력의 최대제한값 (10^6kPa)을 고려하여 전체 모관흡수력 범위에 대하여 적용할 수 있고 일반적으로 더 정확한 결과를 주는 함수특성곡선을 다음 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\Theta = C(\psi) / \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_{FX}} \right)^{n_{FX}} \right] \right\}^{m_{FX}} \quad (3)$$

여기서,

$$C(\psi) = 1 - \ln(1 + \psi/C_r) / \ln(1 + 1,000,000/C_r)$$

: 보정계수

$a_{FX}, n_{FX}, m_{FX} = \text{곡선맞춤변수}$; $C_r = \text{잔류함수비에 대응하는 모관흡수력}$

2.2 불포화 투수곡선

통계적 모델로부터 투수계수를 유추하기 위해서 지반의 투수성과 다른 지반변수들 사이에 물리적 또는 경험적 관계를 규정할 필요가 있다. 이러한 관계식을 Peto-Transfer Function(PTF)이라 하는데, 입력변수들은 더 쉽고 더 광범위하게 얻을 수 있는 물성자료로 정해진다. 함수특성곡선과 포화투수계수를 예측하기 위해서 입력변수로 흡입자 조직, 체적밀도 또는 다른 지반변수들을 사용하는 많은 PTF가 현재 이용된다(Rawls & Brakensiek, 1985 ; Ahuja 등, 1989 ; Vereecken 등, 1989 ; Schaap & Leij, 1998). 하지만 불포화토인 경우에는 대안이 되는 함수가 훨씬 적으며 Mualem(1976)이 제안한 간극크기분포모델이 가장 유명하고 일반적으로 널리 이용되고 있다.

van Genuchten 함수특성곡선식(식 (2))을 이용하여 Mualem 투수함수식(Mualem, 1976)과 Burdine 투수함

수식(Burdine, 1953)에 대입하여 각각 식 (4)(vG-M)와 식 (5)(vG-B)와 같은 불포화 투수함수식을 제시하였다. 이때 적분을 편리하게 하기 위하여 vG-M 모델에는 m_{vG} 대신 $1 - 1/n$ 을, vG-B에는 $1 - 2/n$ 를 적용하였다.

$$k_r(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (4)$$

$(m = 1 - 1/n, 0 < m < 1)$

$$k_r(\psi) = \frac{1 - (\alpha\psi)^{n-2} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{2m}} \quad (5)$$

Brooks & Corey 투수식은 다음 식과 같은 투수매체에 대한 모델을 기본으로 하고 있다.

$$k_r(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{for } \psi \leq \psi_b \\ \Theta^\delta & \text{for } \psi > \psi_b \end{cases} \quad (6)$$

Brooks & Corey 함수특성곡선(식 (1))을 Mualem 투수함수식에 대입하여 투수모델을 추정하게 되면 $\delta = 5/2 + 2/\lambda$ (BC-M) 관계가 되고, Burdine 투수함수식에 적용하여 유도하면 $\delta = 3 + 2/\lambda$ (BC-B) 관계식을 얻을 수 있다 (van Genuchten, 1980).

Fredlund 등(1994)은 Kunze 등(1968)의 투수함수모델과 Fredlund & Xing 함수특성곡선(식 (3))을 이용하여 다음 식 (7)(FX-K)와 같은 투수함수식을 제안하였다.

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\psi}^{\psi_r} \frac{\theta(\vartheta) - \theta(\psi)}{\vartheta^2} \theta(\vartheta) d\vartheta}{\int_{\psi_b}^{\psi_r} \frac{\theta(\vartheta) - \theta(\psi)}{\vartheta^2} \theta(\vartheta) d\vartheta} \quad (7)$$

여기서, $\theta = \text{식 (3)의 미분형식}$; $\vartheta = \text{모관흡수력을 나타내는 적분변수 더미}$

그러나 이러한 추정모델들이 모든 흙에 대해서 잘 표현할 수는 없다. 따라서 모델식의 유연성을 높이기 위해

표 1. 불포화 투수곡선 추정모델에 이용되는 함수특성곡선과 투수함수

Model	Equation	SWCC equation	Permeability function
FX-K	식 (7)	Fredlund&Xing	Kunze et al. (1968)
vG-M	식 (4)	van Genuchten ($m = 1 - 1/n$)	Mualem
vG-B	식 (5)	van Genuchten ($m = 1 - 2/n$)	Burdine
BC-M		Brooks&Corey	Mualem
BC-B		Brooks&Corey	Burdine
FXK-M	식 (8)	FX-K 투수모델에 보정계수(Θ^q)가 추가된 모델	

보정계수, Θ^{θ} 를 추가하였다. 이 보정계수는 간극의 굴곡성 또한 고려할 수 있다(Muallem 1976). 이로부터 Frelund 등 (1994)은 다음과 같은 수정식 (8)(FXK-M)을 제시하였다.

$$k_r(\psi) = \Theta^{\theta} \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_0)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta(e^y) dy} \quad (8)$$

앞서 언급한 불포화 투수곡선 추정모델에 이용된 함수특성곡선 모델식과 투수함수식을 정리하면 표 1과 같다. 본 연구에서는 FX-K 추정모델에 보정계수를 추가한 FXK-M 투수모델의 보정계수를 추정하는 수식을 제안하였다.

3. 불포화 투수실험

삼축셀을 이용한 실험장비는 현장조건의 구속압을 재현할 수 있기 때문에 흙의 투수성 측정에도 이용되고 있다. 본 논문에서는 Hilf(1956)가 제안한 축변환기법(axis-translation technique)을 이용하여 삼축셀 내부 시료에 공기압과 수압을 독립적으로 조절하여 모관흡수력이 발생하도록 하였다. 그리고 시료는 변형이 발생하

지 않는다고 가정하였다.

삼축투수장비는 삼축셀과 물과 공기를 공급하는 제어판으로 구성되어 있다. 삼축투수장비에 대한 개략도는 그림 1에서 볼 수 있다. 셀은 아크릴 실린더와 기초판(base plate), 상부캡(top cap)으로 구성되어 있다. 기초판과 상부캡은 70mm 직경에 30mm 두께로 듀라늄 재질이며, 세라믹디스크가 설치되어 있다. 이 세라믹디스크는 1 bar와 5 bar 각각 2 세트가 사용되었다. 1 bar 세라믹디스크와 5 bar 세라믹디스크의 포화투수계수는 각각 $8.6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 와 $1.21 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 이다. 상부캡 내면의 외부 가장자리를 따라서 깊이와 반경 모두 1.5mm로 홈을 파서 시료에 공기압이 골고루 주어지도록 하였다. 또한 기초판과 상부캡 내부에는 굴곡진 홈을 두어 세라믹디스크에 물이 골고루 전달되고 빠른 물의 흐름을 통해 공기방울을 제거할 수 있도록 하였다. 이 홈을 만들어주는 이유는 수압을 주는 배관에 공기방울이 축적되면 가해지는 수압이나 유출되는 물의 양에 오차를 발생시키는데 이를 없애기 위해서이다. 상부캡에 연결되어 있는 유출량측정장치는 대기압(0kPa) 상태에 있고 물이 유입되는 기초판에서는 수압이 존재하므로 이 수압차로 인해 시료 내부에 동수경사가 발생하고 흐름이 유발된다.

시료가 불포화 상태에 있을 때는 일반적으로 간극수압분포가 선형적이지 않다. 다만 적용된 압력차가 2~4

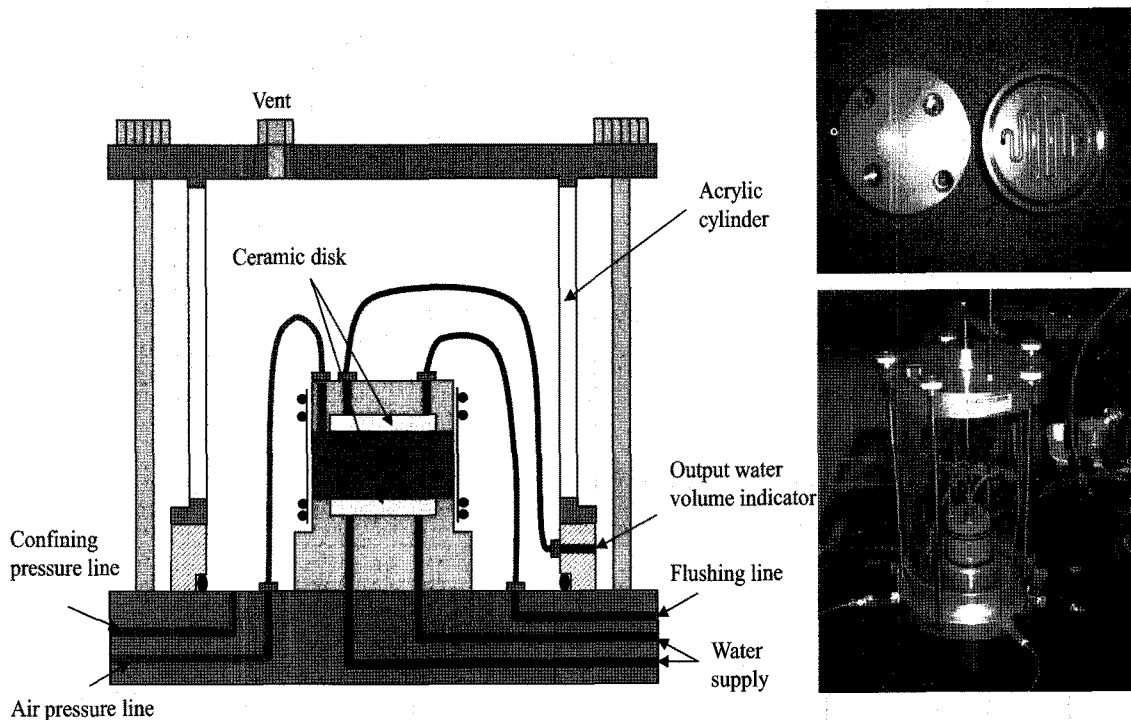


그림 1. 삼축셀을 이용한 불포화 투수계수 측정 장비

kPa 범위로 제한되어 있어야 시료 내에 선형적인 간극 수압분포가 된다고 가정하는 것이 타당하다(Huang 등, 1998). 하지만 본 실험에서는 수압측정의 어려움 때문에 수압을 10kPa로 일정하게 유지하였다. 그리고 시료 내부의 모관흡수력은 시료 상부와 하부 모관흡수력의 평균값으로 설정하였다.

4. 실험대상시료

본 논문에서는 국내 여러 지역의 지반에서 채취된 시료를 대상으로 실험하였다. 비교란 불포화풍화토채취기를 이용하여 한 지역에서 비교란 시료(AS, KP, YJD)를 얻었으며, 다른 시료들은 교란상태로 채취되었다. OC1과 OC2, YS1과 YS2, YK1과 YK2는 동일시료를 다짐함수비 또는 간극비(다짐밀도) 차이에 따라 다르게 성형된 시료이며, YS3은 다른 시료(YS1, YS2)와 같은 지역이지만 다른 사면위치에서 채취된 시료이다. 실험대상 시료는 표 2와 같이 간극비가 0.47에서부터 0.95까지 다양하게 분포하고 있으며, 대부분 모래 성분의 조립질 입자로 구성되어 있다. SC, KP, YJD 시료에서는 0.075mm 크기보다 작은 세립분 함유량이 20% 내외로 나타났으며, 다른 시료에서는 5% 미만의 적은 세립분을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 4.75mm 이상의 자갈 입자는 YS3와 YJD 시료에서 대략 30% 정도로 나타났으며, 다른 시료에서는 자갈 입자가 거의 분포하지 않았다. 실험에 사용된 시료 중 성형다짐 시료는 표 2에 제시된 건조 밀도 조건에 맞게 몰드에 넣고 유압잭을 이용하여 정적다짐을 수행하였다. 비교란 시료는 채취된 현장상태 그대로

실험을 수행하였다. 함수특성 실험에는 직경이 62mm, 높이가 15mm 크기의 시료가 사용되었고, 투수시험에는 직경이 72mm, 높이가 30mm인 시료가 사용되었다. 각 시료에 대한 기본물성값은 표 2에 나타나 있으며 입도 분포곡선은 그림 2와 같다. 표 2에 나타난 포화투수계수는 포화 삼축투수시험장비(ASTM D 5084-03)를 이용하여 얻어진 결과이다.

5. 함수특성실험

Volumetric Pressure Plate Extractor(Soilmoisture Equipment Corporation, 2005)를 이용하여 모관흡수력이 낮은 포화 상태에서부터 모관흡수력(공기압)을 200kPa까지 단계별로 증가시키면서 시료에 적정 공기압을 가해 흘러나오는 물의 양을 측정하여 각 모관흡수력에 해당하는 함수비를 구하였다. 이에 따라 얻어지는 시료별 함수특성 실험결

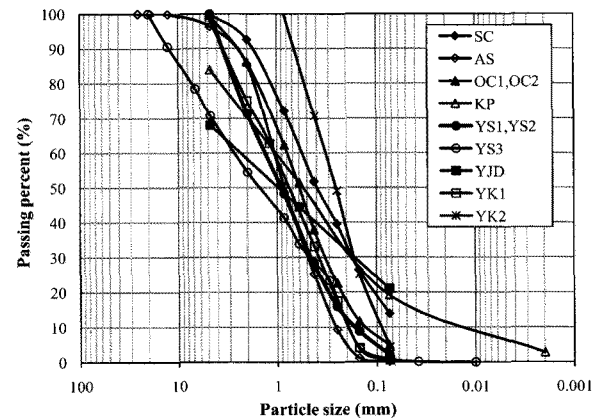


그림 2. 시료별 입도분포곡선

표 2. 대상시료 기본물성값

지역	약자	void ratio	γ_d (kN/m ³)	w.c (%)	k_s (m/s)	G_s	No.200체 통과량 (%)	통일분류
서창	SC	0.61	16.3	20.61	9.13×10^{-7}	2.64	14	SC-SM
아산	AS*	0.45	16.8	-	2.47×10^{-7}	2.58	0	SP
옥천	OC1	0.57	16.7	19.87	1.29×10^{-8}	2.67	5	SW
	OC2	0.77	14.9	7.93	2.38×10^{-6}			
김포	KP*	0.75	14.5	-	2.99×10^{-7}	2.65	19	SM
예산	YS1	0.58	16.0	19.0	1.39×10^{-7}	2.63	2	SW
	YS2	0.78	14.2	19.0	3.70×10^{-7}			
	YS3	0.95	13.5	13.84	5.00×10^{-7}			
영종도	YJD*	0.78	14.6	-	6.48×10^{-6}	-	21	GC
연기	YK1	0.47	17.8	18.77	8.48×10^{-9}	2.63	1	SP
	YK2	0.48	17.4	8.49	4.04×10^{-9}		4	SP

* 비교란 시료

과는 그림 3과 같다. 정규화된 체적함수비(normalized volumetric water content)는 함수특성 실험에서 얻어진 함수비를 포화상태의 체적함수비(표 3)로 나눈 값이다. 본 연구에서는 초기 시료 포화 후 산정된 함수비를 포화 함수비(실험 θ_s)로 정의하였으며, 이를 0.1 kPa에 해당

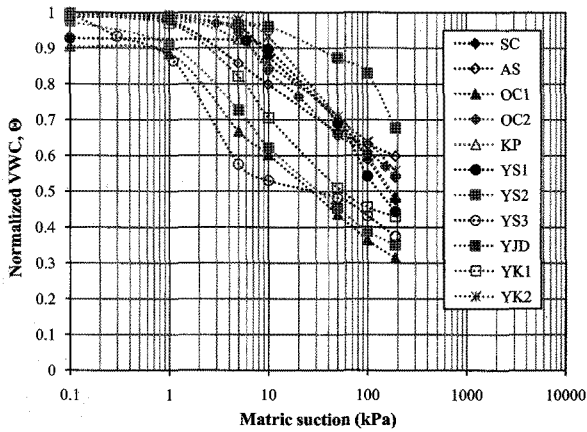
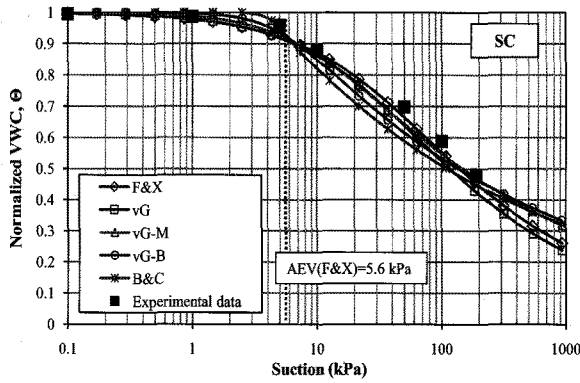
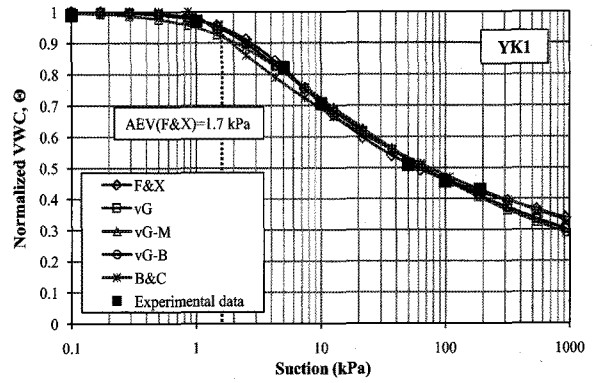


그림 3. 시료별 함수특성곡선 실험 결과



(a) SC



(b) YK1

그림 4. 실험값을 각 함수특성곡선 모델에 곡선맞춤한 결과 비교

표 3. 대상시료의 Fredlund & Xing 함수특성곡선 표현식 변수값

지역	약자	실험 θ_s	Fredlund & Xing SWCC				
			a_{FX}	n_{FX}	m_{FX}	C_r	ψ_{AEV}
서창	SC	0.36	33.506	0.831	1.155	894.41	5.6
아산	AS	0.28	2.314	1.435	0.265	1000	1.6
옥천	OC1	0.40	3.786	0.585	1.222	1001	0.6
	OC2	0.33	6.025	1.589	0.334	1000	3.8
김포	KP	0.40	122.206	0.676	2.055	1000	3.2
예산	YS1	0.26	72.883	0.818	1.733	1000	3.9
	YS2	0.26	2.222	1.007	0.678	1000	0.8
	YS3	0.47	0.734	1.909	0.382	1000	0.4
영종도	YJD	0.46	28.196	0.816	0.319	873.51	16.3
연기	YK1	0.25	3.192	1.539	0.455	1000	1.7
	YK2	0.33	13.433	1.662	0.368	1000	8.0

하는 함수비로 규정하였다. 그림 4는 SC 시료와 YK1 시료에 대해 Brooks & Corey[식 (1)], van Genuchten[식 (2)], Fredlund & Xing[식 (3)] 함수특성곡선 표현식을 이용하여 실험결과와 곡선맞춤한 결과를 보여주고 있다. vG-M과 vG-B는 van Genuchten 함수특성곡선에서 m_{vG} 값이 각각 $1 - 1/n$ 와 $1 - 2/n$ 일 때 곡선맞춤한 결과이다. 대부분 함수특성곡선 표현식들이 실험결과와 경향을 잘 보여주고 있지만 Brooks & Corey 표현식이 실험결과와 차이가 약간 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fredlund & Xing 함수특성곡선 표현식은 대체로 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이외 다른 시료에 대해서도 함수특성곡선 표현식과 비교한 결과 모든 모델들이 대체로 실험값을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 표 3은 각 시료에 대한 Fredlund & Xing 함수특성곡선 표현식의 맞춤변수를 보여주고 있다. 표 3에 나타난 공기함입치(air-entry value, ψ_{AEV})는 Fredlund & Xing 함수특성곡선으로부터 다음과 같은 식 (9)를 통해 산정

되었다.

$$\psi_{AEV} = \exp \left[\ln(\psi_p) - \exp \left(\frac{m_{FX}}{3.67} \right) \times \ln \left(\frac{\psi_p}{a_{FX}} \right) \right] \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \psi_p = \exp \left[\frac{3.72 \times 1.31^{m_{FX}+1}}{\exp \left(\frac{m_{FX}}{3.67} \right)} \right]$$

a_{FX}, m_{FX} = Fredlund & Xing 함수특성곡선 표현식 맞춤변수

이 산정식에 대한 이론적 설명은 Fredlund & Xing (1994), Leong & Rahardjo(1997), Sillers 등(2001)을 참고할 수 있다.

6. 불포화 투수곡선

6.1 불포화 투수 실험결과

그림 5는 본 연구에서 개발한 불포화 투수실험 장비

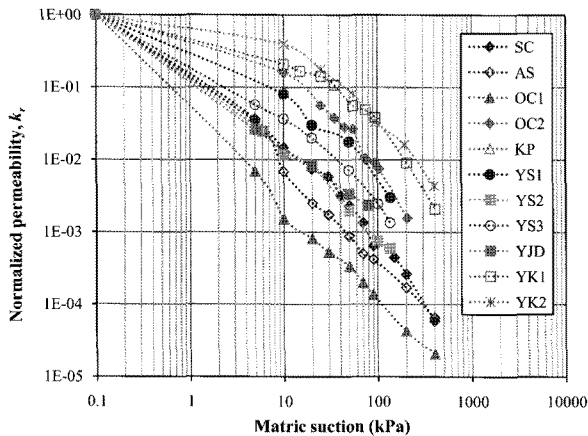
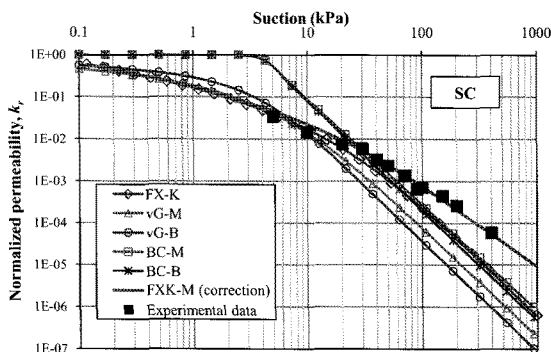


그림 5. 시료별 불포화 투수계수 실험 결과

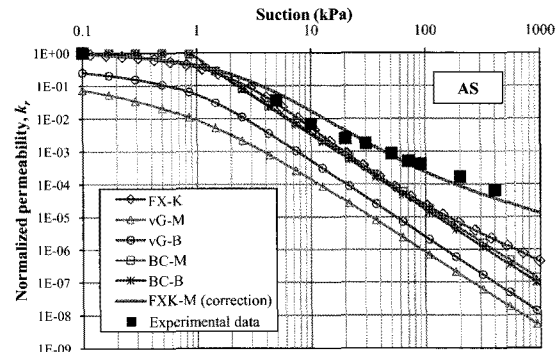


(a) SC

(그림 1)를 이용하여 얻어진 모관흡수력에 따른 불포화 투수곡선을 보여준다. y-축은 포화삼축 투수시험장비에서 얻어진 포화투수계수(0.1 kPa에 해당하는 투수계수)로 나눈 정규화된 투수값(normalized permeability)을 나타낸다. 실험에서 구한 불포화 투수곡선은 모관흡수력이 공기함입치보다 커지면서 투수값이 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 함수특성곡선의 형태와 유사하며, 투수계수가 지반의 함수특성과 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 또한 공기함입치 이상의 모관흡수력에 따른 투수계수의 감소비율은 거의 일정하게 나타났다.

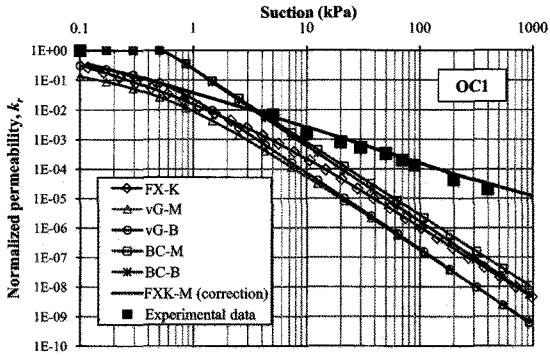
6.2 추정된 불포화 투수곡선

그림 6은 각 모델별로 추정된 불포화 투수곡선과 실험결과를 비교하여 보여준다. 모든 시료에서 추정된 모델이 불포화 투수계수 값을 잘 나타내지 못하고 있음을 알 수 있다(FXK-M 제외). 동일한 모관흡수력에서 대부분 실험에서 얻어진 불포화 투수계수값이 추정된 투수계수값보다 훨씬 크게 나타나고 있으며, 모관흡수력이 클수록 이 차이는 더 커진다. 어떤 경우에는 1000배 이상 투수값이 차이가 나기도 한다. 그리고 모관흡수력 증가에 따른 불포화 투수계수값의 감소를 나타내는 불포화 투수곡선의 기울기도 실험에서 얻어진 결과가 훨씬 완만하게 나타나고 있다. 반면 FXX-M 투수곡선 추정모델은 식 (8)에서 제시한 보정계수(θ^q)를 이용하여 실험 결과에 잘 맞도록 q 값을 산정하였기 때문에 이 모델을 이용할 경우 실험에서 구한 투수계수와 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다.

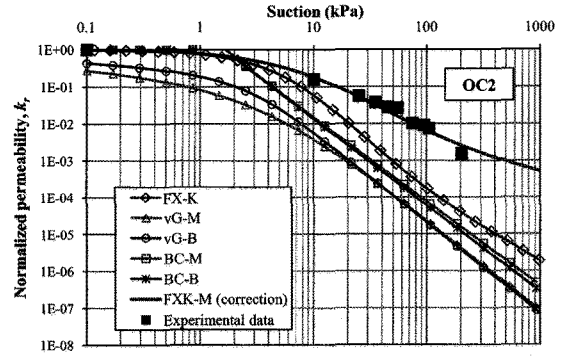


(b) AS

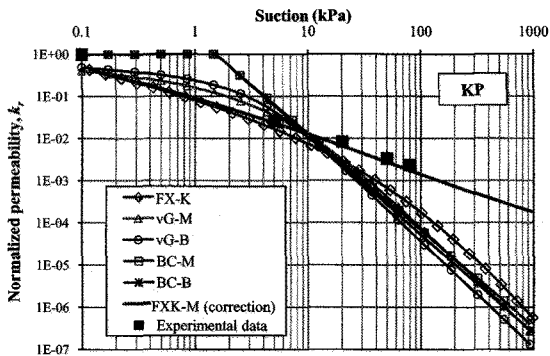
그림 6. 각 모델별로 추정된 불포화 투수곡선과 실험에서 구해진 투수계수값 비교 (계속)



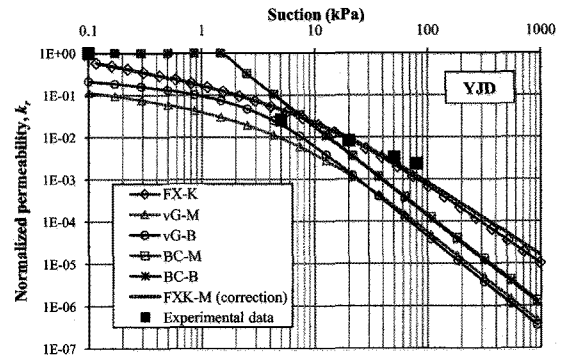
(c) OC1



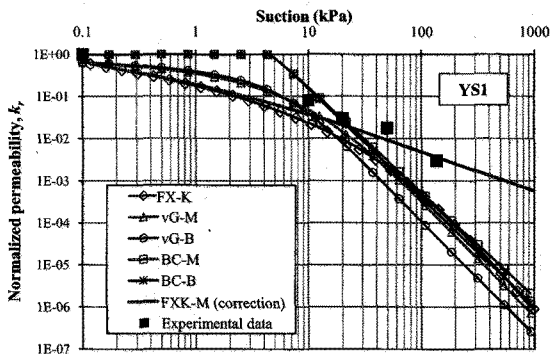
(d) OC2



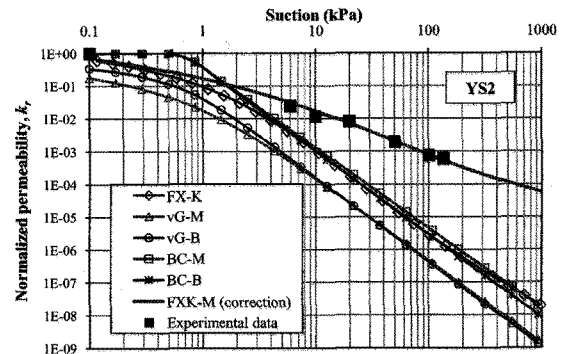
(e) KP



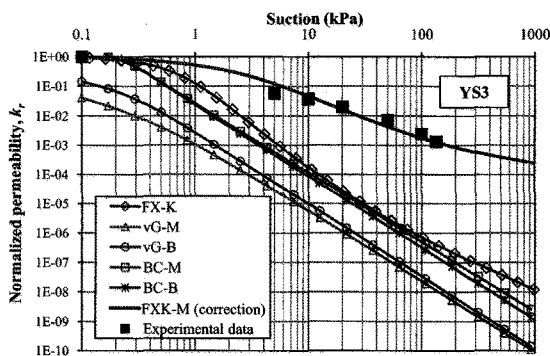
(f) YJD



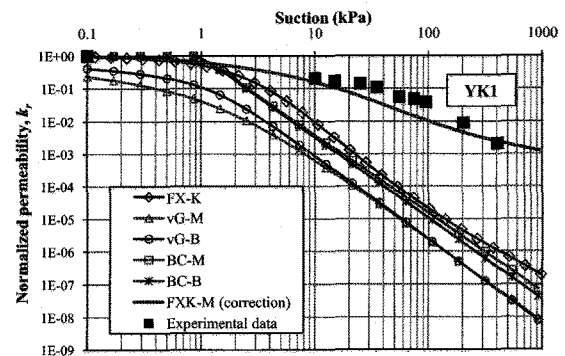
(g) YS1



(h) YS2

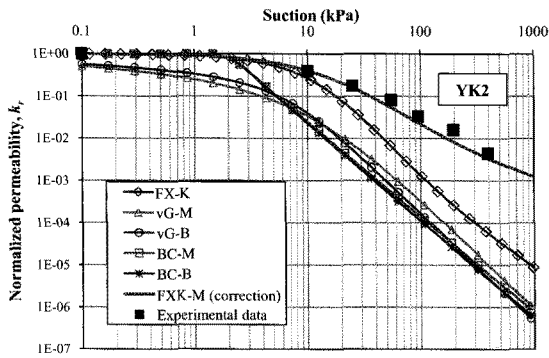


(i) YS3



(j) YK1

그림 6. 각 모델별로 추정된 불포화 투수곡선과 실험에서 구해진 투수계수값 비교 (계속)



(k) YK2

그림 6. 각 모델별로 추정된 불포화 투수곡선과 실험에서 구해진 투수 계수값 비교

7. 제안된 불포화 투수곡선 보정계수

그림 6의 결과에 의하면 정확한 불포화 투수곡선을 나타내기 위해서는 기존 모델에서 추정된 불포화 투수곡선(FX-K)을 보정하여 국내 지반 해석에 적용하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 FXX-M 투수모델에

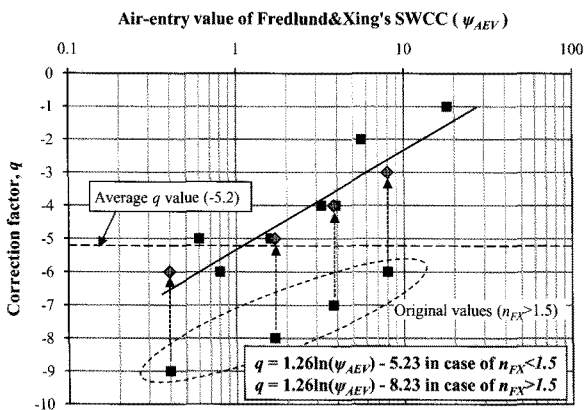
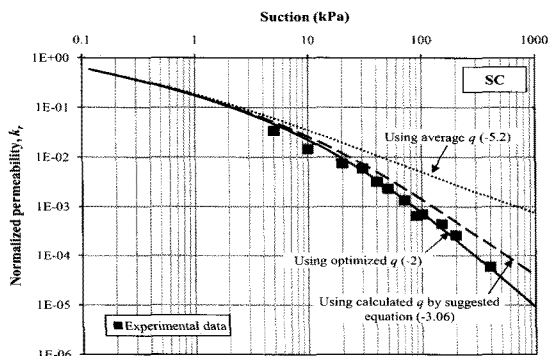


그림 7. 보정계수(θ^q) 매개변수 q 결과 비교 및 제안된 추정식



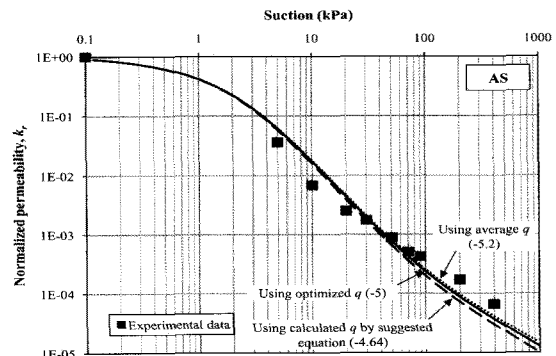
(a) SC

적용된 보정계수 q 값을 국내 풍화토에 맞도록 정확히 산정하여 비교해 보았다. 본 연구에서 수행한 불포화 투수실험 결과를 잘 나타내도록 산정된 q 값은 그림 7과 그림 8에 나타나 있다(최적화된 q 값). 이 값은 -1에서부터 -9까지 큰 폭으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 평균 값은 -5.2로 나타났다. 이렇게 큰 폭으로 변하는 q 값을 이용할 경우 정확한 불포화 투수곡선을 추정하기가 어렵다. 그러나 그림 7에서 살펴보면, $n_{FX} > 1.5$ 인 OC2, YS2, YK1, YK2 시료의 경우 최적화된 q 값이 다른 시료에 비해 아주 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다(점선으로 된 영역). Fredlund & Xing 함수특성곡선에서 얻어지는 n_{FX} 값은 함수특성곡선의 기울기와 관련되어 있는 변수이다. 즉, n_{FX} 값이 크면 모관흡수력 증가에 따라 함수비의 변화가 더 크게 나타남을 의미한다. 따라서, 함수특성실험에서는 모관흡수력 증가에 따라 함수비는 크게 감소하였지만 불포화 투수실험에서는 불포화 투수값이 함수비 변화에 비해 크게 감소하지 않았다는 것을 나타낸다. 그러므로 이 결과를 제외하고 얻어진 추세선에 최대한 접근하도록 $n_{FX} > 1.5$ 인 시료에 대해서는 q 값에 대한 추세선을 다르게 산정하였다(다른 q 값 추세선에 +3을 한 결과: 다이아몬드 모양).

결과적으로 본 연구에서는 그림 7에서처럼 Fredlund & Xing 함수특성곡선에서 얻어진 공기함입치(표 3)와 q 값의 분포를 관련시켜 공기함입치로부터 q 값을 추정할 수 있는 다음과 같은 식 (10)을 제안하였다.

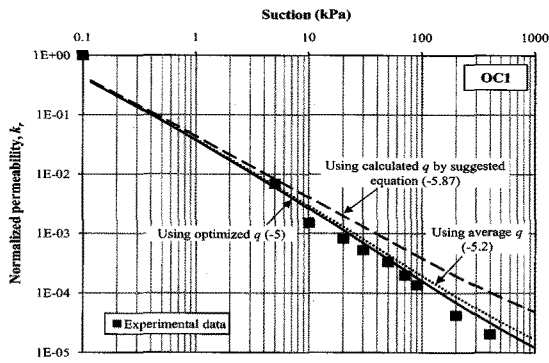
$$q = \begin{cases} 1.26 \ln(\psi_{AEV}) - 5.23 & \text{for } n_{FX} < 1.5 \\ 1.26 \ln(\psi_{AEV}) - 8.23 & \text{for } n_{FX} > 1.5 \end{cases} \quad (10)$$

여기서, ψ_{AEV} = Fredlund & Xing 함수특성곡선 공기함입치

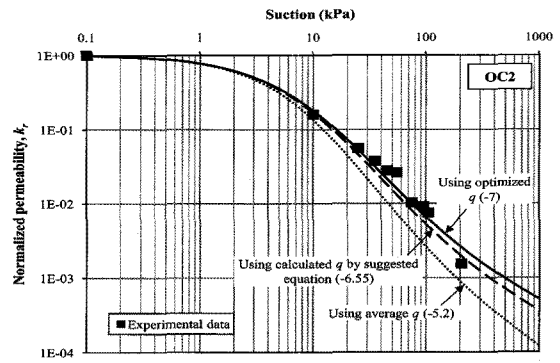


(b) AS

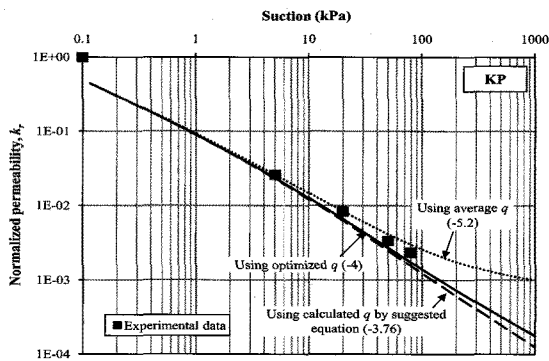
그림 8. 제안된 보정계수(θ^q)를 이용하여 추정된 불포화 투수곡선 비교(FXX-M 모델) (계속)



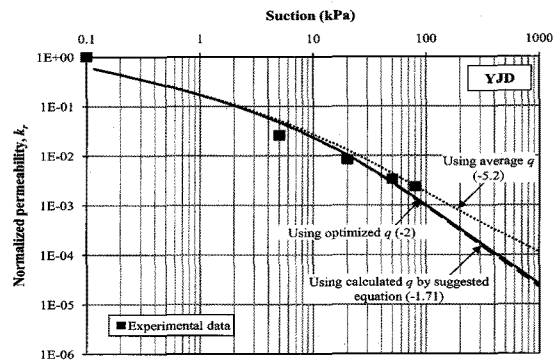
(c) OC1



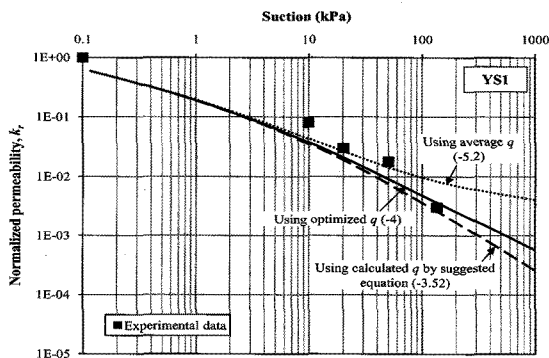
(d) OC2



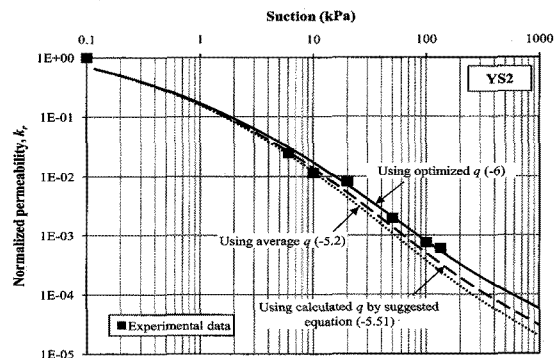
(e) KP



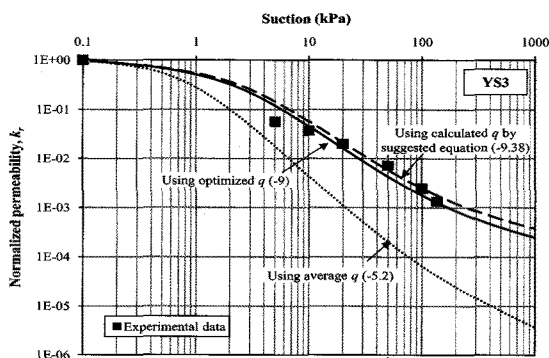
(f) YJD



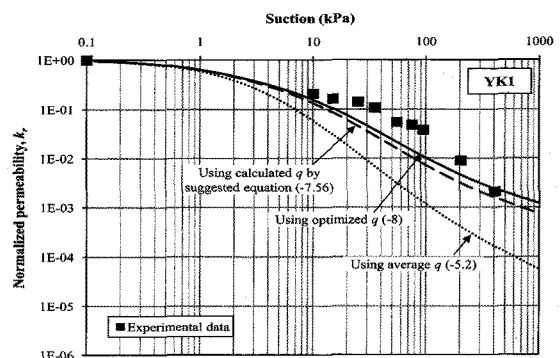
(g) YS1



(h) YS2



(i) YS3



(j) YK1

그림 8. 제안된 보정계수(θ^q)를 이용하여 추정된 불포화 투수곡선 비교 (FXK-M 모델) (계속)

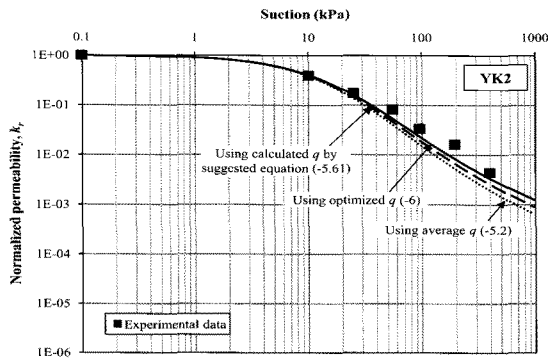


그림 8. 제안된 보정계수(θ^q)를 이용하여 추정된 불포화 투수곡선 비교 (FXK-M 모델)

$$n_{FX} = \text{Fredlund \& Xing 함수특성곡선 맞춤변수}$$

그림 8은 투수실험 결과에 최적화된 q 값과 평균적인 q 값(-5.2), 그리고 제안된 추정식[식 (10)]으로부터 산정된 q 값을 이용하여 FXK-M 투수모델을 적용할 경우 얻어진 결과를 비교하여 보여주고 있다. 평균적인 q 값을 적용할 경우 시료별로 편차가 크게 나타나 실제로 불포화 투수곡선을 잘 추정한다고 판단하기 어렵다. 반면 제안된 식으로부터 추정된 q 값을 이용할 경우 불포화 투수곡선의 변화추세와 투수계수값을 비교적 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 국내 풍화토의 경우 제안된 추세식을 통해 불포화 투수곡선을 보정하여 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

7. 결론

본 논문에서는 우리나라 전 지역에 고르게 분포해 있는 풍화토에 대하여 삼축셀을 이용한 투수장비로 불포화 투수계수를 구하였으며, 모관흡수력 변화에 따른 투수곡선의 변화형태를 살펴보았다. 실험 결과로부터 불포화 투수성은 지반의 함수상태와 밀접한 관련을 맺고 있음을 알 수 있었고, 따라서 함수특성곡선으로부터 투수곡선을 유추하는 방법이 타당함을 보여준다. 하지만 이러한 간접적으로 얻어진 투수곡선과 실험값을 비교한 결과, 기존에 제안된 투수곡선 추정모델들이 국내 풍화토 지반의 불포화 투수특성을 잘 표현하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 기존 추정모델식을 보정하여 국내 7개 지역에서 채취된 풍화토 특성에 맞는 불포화 투수곡선 추정식으로 활용하고자 하였다. 그리고 추정식에 적용되는 보정계수의 변수를 함수특성곡선의 공기함입치로부터 산정할 수 있는 식을

제안하였다. 불포화 투수실험 결과와 비교한 결과, 제안된 식을 이용하여 추정된 불포화 투수곡선은 매우 합리적인 것으로 판단되었다. 하지만 본 추정모델에 7개 지역의 한정된 자료를 적용하였으나, 추후 다양한 지역의 풍화토에 대하여 추가적인 실험을 통해 더욱 정확한 추정모델을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)삼성물산 건설부문 자체연구개발사업과 한국연구재단의 Smart Infra-Structure Technology Center (SISTeC)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김상규, 류지협 (1996), “불포화토의 투수 및 강도특성 측정”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp.375-378.
2. 김윤기 (2003), *투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구*, 석사학위논문, KAIST.
3. 류태진, 임성운 (2008), “불포화토의 투수계수분석 및 투수계수 방정식의 적용성 평가”, *한국지반공학학회논문집*, Vol.24, No.1, pp.5-13.
4. 최경립 (2007), *화강풍화토에 대한 함수특성곡선으로부터 불포화투수계수 유추에 관한 연구*, 석사학위논문, KAIST.
5. 황장수, 김태형 (2004), “불포화 투수계수함수에 대한 연구”, *한국지반공학학회논문집*, Vol.20, No.3, pp.47-51.
6. Ahuja, L. R., Naney, J. W., and Williams, R. D. (1989), “Evaluation of Spatial Distribution of Hydraulic Conductivity Using Effective Porosity Data”, *Soil Science*, Vol.148, No.6, pp.404-411.
7. ASTM (2003), “Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter”, D 5084.
8. Barden, L., and Pavlakis, G. (1971), “Air and Water Permeability of Compacted Unsaturated Cohesive Soil”, *Journal of Soil Science*, Vol.22, No.3, pp.302-318.
9. Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964), “Hydraulic properties of porous media”, Colorado State University Hydrology Paper, Fort Collins, No. 3.
10. Burdine, N. T. (1953), “Relative permeability calculations from pore-size distribution data”, *Transactions of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.*, Vol.198, pp.71-78.
11. Campbell, J. D. (1973), *Pore pressures and volume changes in unsaturated soils*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL.
12. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
13. Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994), “A Equations for the soil-water characteristic curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No.3, pp.521-532.
14. 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*, Vol.31, No.3,

- pp.533-546.
15. Gardner, W. (1956), "Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils", Highway Research Board Special Report 40 International Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, pp.78-87.
 16. Hilf, J. W. (1956), An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. Thesis, Technical Memo No. 654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver.
 17. Huang, S., Fredlund, D. G., and Barbour, S. L. (1998), "Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, pp.426-432.
 18. Kunze, R. J., Uehara, G., and Graham, K. (1968), "Factors Important in the Calculation of Hydraulic Conductivity", *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.32, pp.760-765.
 19. Leong, E. C., and Rahardjo, H. (1997), "Review of soil-water characteristic curve equations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, pp.1106-1117.
 20. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.12, pp.593-622.
 21. Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L. (1985), "Prediction of soil water properties for hydrologic modeling", E. B. Jones and T. J. Ward (Eds.). *Watershed Management in the Eighties*, Proceedings of Symposium sponsored by Comm. on Watershed Management, I&D Division, ASCE, ASCE Convention, Denver, CO, April 30 May 1, pp.293-299.
 22. Schaap, M. G., and Leij, F. J. (1998), "Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity", *Soil & Tillage Research*, Vol.47, pp.37-42.
 23. Sillers, W. S., Fredlund, D. G., and Zakerzadeh, No. (2001), "Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, pp. 243-283.
 24. Soilmoisture Equipment Corporation (2005), "Volumetric Pressure Plate Extractor and Hysteresis Attachments", Operating Instruction manual, Santa Barbara, CA.
 25. van Genuchten, M.T.H. (1980), "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
 26. Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989), "Estimation the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content", *Soil Science*, Vol.148, pp.389-403.

(접수일자 2010. 6. 11. 심사완료일 2010. 10. 4)