



역해석기법을 이용한 불포화토 투수계수함수 산정에 관한 연구

Evaluation of Hydraulic Conductivity Function in Unsaturated Soils using an Inverse Analysis

이준용* · 한진태*

Lee, Joonyong · Han, Jin-Tae

ABSTRACT

Unsaturated hydraulic conductivity function is one of key parameters to solve the flow phenomena in problems of landslide. Prediction models for hydraulic conductivity function related to soil-water retention curve equations in many geotechnical applications have been still used instead of direct measurement of the hydraulic conductivity function since prediction models from soil-water retention curve equations are attractive for their fast and easy use and low cost. However, many researchers found that prediction models for the hydraulic conductivity function can not predict the hydraulic conductivity exactly in comparison with experimental outputs. This research introduced an inverse analysis to evaluate the hydraulic conductivity function corresponding to experimental output from the flow pump system. Optimisation process was carried out to obtain the hydraulic conductivity function. This research showed that the inverse analysis with flow pump system was suitable to assess the hydraulic conductivity in unsaturated soil, and the prediction models for the hydraulic conductivity were led to the significant discrepancy from actual experimental outputs.

Keywords: Unsaturated hydraulic conductivity function; landslide; soil-water retention curve equation; prediction model; inverse analysis; optimisation

1. 서 론

지반공학 설계에 있어 물리적이고 기후변화에 의해 야기되는 하중변화에 대한 토사의 수리학적 거동 및 역학적 거동 분석은 설계수명동안 구조물의 안정성 유지를 위하여 필수적으로 요구되어진다. 특히, 많은 지반공학 현장, 특히 사면, 옹벽, 도로포장 등에 있어 불포화 지반의 거동분석을 위한 불포화토 역학은 지반 구조물의 안정성을 유지하는데 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 하지만 이러한 중요성에도 불구하고 아직까지 현장에서의 불포화토 역학의 적용은 미미한 실정이다. 일반적으로 현장에서 사용되어지고 있는 완전 포화된 지반을 가정으로 한 지반공학 설계는 지반공학 구조물 안정성 유지에 있어 최악의 시나리오를 보여줌으로써, 이는 매우 보수적인 설계 결과를 야기하게 된다 (Zornberg and McCartney, 2010). 따라서, 안정성 유지와 더불어 경제적인 지반공학구조물 설계에 있어 불포화토 역학, 특히 불포화 지반의 흐름특성에 의해 야기되어지는 지반의 강도 및

변형 특성 변화에 대한 예측은 필수적으로 요구되어진다.

지반공학 설계에 있어 불포화토 역학의 적용은 침투 및 배수 과정동안 불포화 지반내 흡입력 분포 및 유량크기 변화에 대한 예측을 할 수 있는 흐름분석을 필수적으로 요구한다. 이와 같은 불포화 지반내에서의 흐름 분석이 합리적으로 수행되어지기 위해서는 함수특성곡선 (soil-water retention curve, SWRC)과 투수계수함수 (hydraulic conductivity function, HCF)로 대표되어지는 불포화토의 흐름특성에 대한 세부적인 지식들이 필요하다. 함수특성곡선은 체적함수비와 흡입력사이의 관계로 소정의 체적함수비상태에서 흡이 불포화가 진행되기 위해 요구되어지는 힘으로 표현되어지며, 투수계수함수는 투수계수와 흡입력 (또는 체적함수비)과의 관계로 지반이 불포화가 진행될수록 물 흐름을 위한 사용가능한 경로의 감소를 의미한다 (Zornberg and McCartney, 2010). 따라서, 불포화된 지반내 침투 및 배수과정 동안의 합리적인 흐름 분석을 위해서는 선행적으로 함수특성곡선과 투수계수함수로 대표되어지는 불포화토 흐름특성에 대한 측정이 선행되어야 한다. 하지만, 불포화토 흐름특성의 측정의 경우 긴 측정시간, 복잡한 실험준비 및 과정이라는 단점으로 인하여 현재까지 많은 현장에서는 불포화토 흐름특성, 특히 투수계수함수를 결정하기 위하여 기존에 제시되었던 경험적 예측식들 또는 이론적 모델들에 크게 의존하고 있다.

* 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

† Corresponding author Tel.: +82-31-910-0787

Fax: +82-32-910-0211

E-mail: joonyong.lee@kict.re.kr

2013년 1월 7일 투고

2013년 2월 5일 심사완료

2013년 4월 16일 게재확정

현재까지 많은 연구자들에 의해서 불포화토의 투수계수함수를 예측하기 위한 다양한 모델들이 제안되었다 (Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Campbell, 1973; van Genuchten, 1980; Fredlund et al., 1994). 투수계수함수 예측을 위한 다양한 모델들 중, 현재 지반공학 적용에 있어 함수특성곡선 모델 변수들을 활용한 Brooks and Corey 모델 (1964), van Genuchten 모델 (1980), Fredlund and Xing (1994) 모델이 가장 널리 활용되어지고 있다. 앞서 언급한바와 같이 불포화토 투수계수함수 예측모델들은 직접적인 투수계수 측정이 없으므로 인하여 빠르고 간편하게 사용할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 하지만, 이러한 장점에도 불구하고 현재 활용되어지고 있는 투수계수함수 예측모델의 사용은 여러 쟁점으로 인하여 제한적으로 활용되어지고 있는 실정이다. 투수계수함수 예측모델의 여러 가지 쟁점 중 하나는 현재 널리 활용되어지고 있는 투수계수함수 예측모델들이 실제적인 투수계수 측정 값과 비교하였을 경우 많은 오차가 일어난다는 것이다. McCartney and Parks (2009)에 따르면 불포화 지반의 투수계수를 예측하기 위하여 함수특성곡선 모델의 변수들을 활용한 투수계수함수 예측모델들은 실제 투수계수 값보다 낮은 함수비에서 최소 10배에서 최대 10,000배 차이가 난다는 것을 확인하였다. 또한 국내외 많은 연구자들은 실제 불포화된 지반의 투수계수 값과의 비교를 통한 기존의 투수계수함수 예측모델들의 적용성에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과 예측모델들은 여러 영향인자들로 인하여 실제 측정 값과 많은 오차가 발생하는 것을 발견하였다 (Khaleel et al, 1995; Meerdink et al., 1996; Huang et al, 1998, Vanapalli et al., 1999; Ng and Pang, 2000; Chiu and Shackelford, 2001; Kim et al., 2005; McCartney, 2007; Lim and Lyu, 2008).

본 연구에서는 플로우 펌프 시스템 (flow pump system)과 역해석기법 (inverse analysis)을 이용하여 불포화 지반내에서의 흐름속도에 따른 토사의 실제 응답흡입력에 상응하는 투수계수함수를 산정하는 방법을 제안하였으며, 그 결과를 바탕으로 기존 투수계수함수 예측모델에 대한 적용성을 검토하였다.

II. 연구배경

침투 및 배수로 인한 불포화 지반내 시간에 따른 흡입력 및 포화도의 분포 경로 변화를 모사하기 위해서는 물흐름 지배방정식 (Richards 식)을 이용하게 되며, 다음과 같이 표현되어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$= \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

여기서, ψ 는 흡입력, θ 는 체적함수비, t 는 시간, $k(\psi)$ 는 투수계수함수이다.

식 (1)에서 간극 안에 존재하는 공기는 대기압으로 가정함으로써 간극에서의 기상흐름은 무시하게 되며, 따라서, 간극 안에 존재하는 공기는 흙의 안과 밖으로 자유롭게 이동할 수 있다. 식 (1)을 이용하여 불포화된 지반내 시간을 고려한 침투 및 배수 해석을 위해서는 함수특성곡선의 기울기 및 투수계수함수가 필요하다. 함수특성곡선의 경우 일반적으로 실험을 통하여 측정되어지며, 실험을 통하여 얻어진 함수특성곡선 지점들은 식 (1)을 풀기 위하여 연속된 곡선으로 표현하여 사용한다. 함수특성곡선 지점들을 연결한 연속된 곡선은 일반적으로 곡선 맞춤 (curve fitting)을 통하여 Brooks and Corey 모델 (1964) 또는 van Genuchten 모델 (1980) 등을 활용하여 산정되어진다. Brooks and Corey 모델은 1964년 제안되어졌으며, 다음과 같이 정의되어진다.

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \psi < \psi_{acv} \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left(\frac{\psi_{acv}}{\psi} \right)^\lambda & \psi \geq \psi_{acv} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 는 잔류체적함수비, ψ 는 흡입력, ψ_{acv} 는 공기함입치, λ 는 공극분포지수이다.

van Genuchten 또한 1980년에 함수특성곡선 모델을 제안하였으며, van Genuchten 모델은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha\psi)^n]^m \quad (3)$$

여기서 θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 는 잔류체적함수비, ψ 는 흡입력, α 는 변곡점의 역수, n 은 토사의 간극크기분포와 관련된 변수, m 은 특성곡선의 전체 대칭과 관련된 변수이다.

상대적으로 잘 정립된 함수특성곡선 산정 방법과는 달리, 불포화토 투수계수함수 산정은 여전히 많은 연구자들에게 도전과제로 남아 있다. 현재까지 많은 연구자들에 의해서 불포화토 투수계수함수를 측정하기 위한 실험기법들이 개발되었으나, 긴 측정시간과 여러 영향인자들로 인하여 아직까지 지반공학 현장에서 보다는 학계에서 제한적으로 사용되어지고 있다. 따라서, 일반적인 지반공학 현장에서는 불포화된 지반에서의 투수계수함수를 산정하기 위하여 함수특성곡선 모델로부터 유도된 투수계수함수 예측모델들은 활용하고 있다. 현재 지반공학 현장에서 가장 많이 활용되고 있는 예측모델로는 Brooks and Corey 모델과 van Genuchten 모델을 들 수 있다. Brooks and Corey 예측모델은 Burdine (1953)이 제안한 통계 모델에 식 (2)의 함수특성

곡선 모델을 대입하여 투수계수함수 예측모델을 유도하였으며, 다음과 같다.

$$k = k_s \times \begin{cases} 1 & \psi < \psi_{aev} \\ \left(\frac{\psi_{aev}}{\psi}\right)^{2+3\lambda} & \psi \geq \psi_{aev} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 k 는 투수계수, k_s 는 포화투수계수, ψ 는 흡입력, ψ_{aev} 는 공기함입치, λ 는 함수특성곡선 모델로부터 얻어진 공극분포지수이다.

van Genuchten은 Mualem (1976)이 제안한 통계 모델에 식 (3)에 나타난 함수특성곡선 모델의 변수를 활용하여 투수계수 함수를 제안하였으며, 다음과 같이 정의되어진다.

$$k = k_s \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{0.5m}} \quad (5)$$

여기서 k 는 투수계수, k_s 는 포화투수계수, α , n , m 은 함수특성 곡선 모델로부터 얻어진 곡선맞춤변수이다.

많은 지반공학 현장에서 활용되어지는 투수계수함수 예측모델은 함수특성곡선 모델로부터 얻어질 수 있다는 편리성으로 인하여 직접적인 투수계수 측정없이 활용할 수 있는 장점을 지니고 있다. 하지만, Khaleel et al. (1995)은 함수특성곡선 모델로부터 유도된 투수계수함수 예측모델은 공극분포, 유기물함량, 광물학적 특징, 체적변화, 응력상태 등 여러 가지 흡구조변수인자의 변화에 의하여 실제 투수계수 측정값과 수천배 이상 차이가 나는 것을 발견하였다. 또한, McCartney and Parks (2009)에 따르면 투수계수함수 예측모델은 실제 투수계수 측정 값과 매우 큰 격차를 보이고 있는 것을 확인하였다. Fig. 1은 여러 연구를 통하여 측정된 함수특성곡선 실험값으로부터 곡선 맞춤 (curve fitting)을 통하여 얻어진 식 (3)의 α 값과 투수계수 실험 측정값으로부터 곡선맞춤을 통하여 얻어진 식 (5)의 α 값과의 비교를 나타내고 있다 (McCartney and Parks, 2009). Fig. 1에서 보는 바와 같이 기존 함수특성곡선 모델의 곡선맞춤 변수들을 활용한 투수계수함수 예측모델의 변수값은 실제 투수계수함수를 표현하는 변수값과 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기존 투수계수함수 예측모델이 실제 투수계수 측정값과 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 투수계수함수 예측모델의 부정확성으로 인하여 현재 불포화토의 투수계수를 측정하고 기존 예측 모델들의 적용성을 확인하기 위한 여러 가지 노력들이 여전히 많은 연구자들에 의해서 진행 중에 있다 (Khaleel et al, 1995; Meerdink et al., 1996; Huang et al, 1998, Vanapalli et al., 1999; Ng and Pang, 2000; Chiu and Shackelford, 2001; Lu

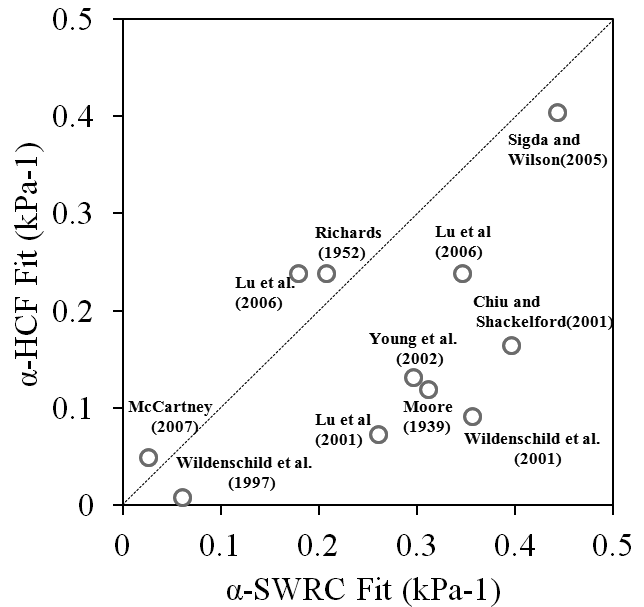


Fig. 1 Comparison between α parameters for different soils obtained from fitting van Genuchten (1980) model to the HCF and SWRC data (McCartney and Parks, 2009)

et al, 2006; McCartney, 2007, McCartney and Zornberg, 2010; Zornberg and McCartney, 2010).

III. 불포화토 투수계수함수 산정방법

불포화토 투수계수함수 측정을 위하여 여러 실험 기법들이 제안되었다 (Klute, 1972, Nimmo et al, 1987, Meerdink et al., 1996; Lu et al, 2006; McCartney, 2007). 일반적으로 불포화토 투수계수 측정 기법에는 정상상태 실험방법 (steady state measurement technique)과 비정상상태 실험방법 (transient measurement technique)로 나뉘어진다. 기존 문헌에 따르면 정상상태 실험방법을 활용하면 일반적으로 투수계수는 10^{-12} m/s 까지 측정할 수 있으며, 비정상상태 실험방법을 활용하면 투수계수는 10^{-14} m/s까지 측정할 수 있다 (Coca and Wright, 1992; Hamilton et al., 1981). 정상상태 실험방법을 통한 투수계수 측정은 일반적으로 함수비가 감소할수록 투수계수함수는 부드럽게 감소하는 경향을 보여주는 장점을 가지고 있는 반면, 실험 공시체내의 물의 흐름이 정상상태에 도달하기에는 상당한 시간이 요구되어지는 단점을 지니고 있다. 비정상상태의 실험방법을 통한 투수계수 측정은 식 (1)을 활용하여 이루어지며, 일반적으로 정상상태 실험방법에 비하여 실험 시간을 감소시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 플로우 펌프 시스템을 활용한 비정상상태 실험결과를 이용하여 투수계수함수를 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

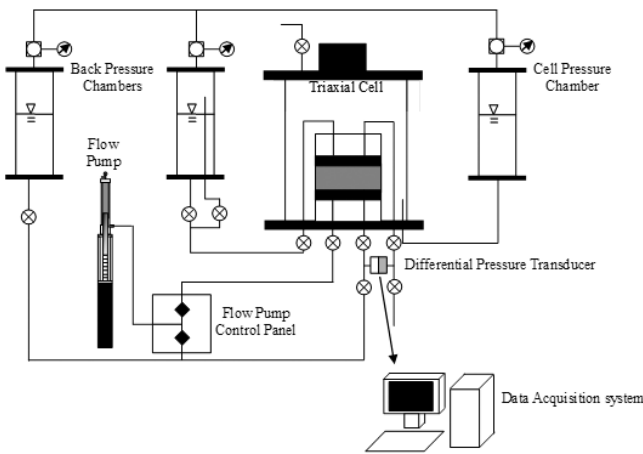


Fig. 2 Schematic of flow pump system (Lee and Yu, 2012)

1. 실험 장비

본 연구에서 활용되어진 플로우 펌프 시스템은 Fig. 2와 같다 (Lee and Yu, 2012). 플로우 펌프 시스템은 삼축압축시험기와 축변환시험기를 바탕으로 설계되어졌으며, 실험 공시체의 하단부에 플로우 펌프가 연결되어 있다. 플로우 펌프내에 물의 흐름을 제어하는 피스톤의 최대 변위 (stroke)와 단면적은 각각 30 cm와 7.92 cm²이다. 본 시스템에서 제어 가능한 플로우 펌프의 유입 및 유출 속도범위는 7.9×10⁻³에서 4.0×10³ mm³/s이며, 6.75 cm의 지름을 가진 원형실험공시체를 사용할 경우 Darcy의 투과율로 환산시 약 2.2×10⁻⁹–1.1×10⁻³ m/s 범위의 속도로 물의 유입 및 유출을 조절할 수 있다 (Lee and Yu, 2012). 실험 공시체의 하단부에서 플로우 펌프가 작동하게 되면 차압변환기는 공시체 하단에서 플로우 펌프에 의해 발생하는 수압과 오른쪽 배압챔버로부터 일정하게 가해지는 공시체의 상부 공기압의 차이를 측정한다. 즉, 차압변환기는 공시체의 바닥으로부터의 플로우 펌프에 의한 실험공시체의 바닥 경계면의 흡입력 변화를 측정하게 되어진다. 세부적인 실험과정은 다음 문헌을 통하여 확인할 수 있다 (Lee et al, 2009; McCartney and Znidarcic, 2010; Khosravi, 2011; Lee and Yu, 2012; Lee et al, 2012).

2. 역해석기법

식 (1)을 이용하여 불포화된 지반내에서의 시간을 고려한 침투 및 배수 해석을 위해서는 불포화토의 영역, 경계조건, 초기조건, 함수특성곡선 및 투수계수함수가 필요하다. 만약 앞서 언급한 조건들을 모두 갖추고 있다면, 식 (1)을 이용하여 불포화토의 침투 및 배수 해석을 수행할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 플로우 펌프 시스템을 활용하여 시간에 따른 불포화된 지반의 바닥면에서의 응답흡입력을 측정할 수 있으므로 이미 식 (1)에 대한 해답

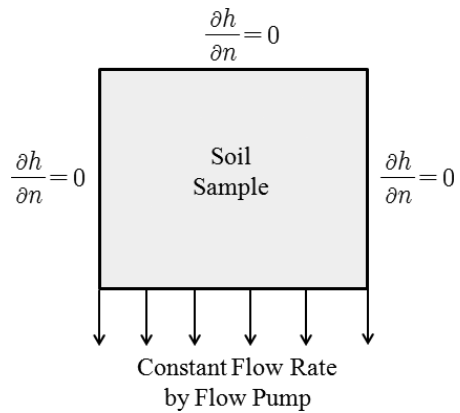


Fig. 3 Boundary conditions and the domain for inverse analysis

을 가지고 있다. 따라서, 불포화토의 영역, 경계조건, 초기조건, 함수특성곡선에 대한 조건을 지니고 있으면 플로우 펌프 시스템의 실험 결과를 활용하여 불포화토의 투수계수를 역으로 산정할 수 있으며, 이와 같은 방법을 역해석기법 (inverse analysis)이라고 한다. 본 연구에서 투수계수함수 산정을 위하여 역해석기법에 사용되어진 불포화토의 영역, 경계조건은 Fig. 3과 같다. 본 해석에서 사용된 함수특성곡선은 기존문헌의 플로우 펌프 시스템을 활용하여 개발되어진 ‘흡입력-포화도 조절 기법 (suction-saturation control technique)’를 사용하여 측정하였으며, 세부적인 실험과정은 다음 문헌을 통하여 확인할 수 있다 (Lee et al, 2009; McCartney and Znidarcic, 2010; Khosravi, 2011; Lee and Yu, 2012; Lee et al, 2012).

IV. 실험결과 및 분석

1. 실험 결과

본 연구에서는 불포화토의 투수계수함수 산정을 위하여 보니토사와 F-75 오타와토사를 사용하였다. 보니토사는 미국 콜로라도의 보니담 지역에서 채취하였다. 보니토사는 동일분류상 ‘CL-ML’에 해당하며 비중은 2.60이다. F-75 오타와토사는 미국 Ottawa Silica Company에서 가공한 모래이며, 비교적 균질한 입경분포를 지니고 있다. F-75 오타와토사는 통일분류상 ‘SP’에 해당하며, 비중은 2.63이다. Fig. 4는 보니토사와 F-75 오타와토사의 입도분포를 보여주고 있다. Fig. 5 (a)는 간극률이 0.4인 보니토사 실험공시체를 이용하여 건조과정에서의 함수특성곡선 측정값과 Brooks and Corey 모델을 이용한 연속적인 곡선을 보여주고 있으며, Fig. 5 (b)는 간극률이 0.39인 F-75 오타와토사 실험공시체를 활용하여 건조과정동안 측정된 함수특성곡선과 van Genuchten 모델을 이용한 연속적인 곡선을 보여주고 있다. Table

1은 각 토사의 함수특성곡선을 연속적으로 곡선으로 표현하기 위하여 최소자승법 (least square method)를 이용하여 얻은 각 모델들의 변수 값을 나타내고 있다.

각 토사의 흐름속도에 따른 흡입력 변화를 측정하기 위하여 보니토사를 이용하여 제작한 실험공시체는 최적함수비 상태로

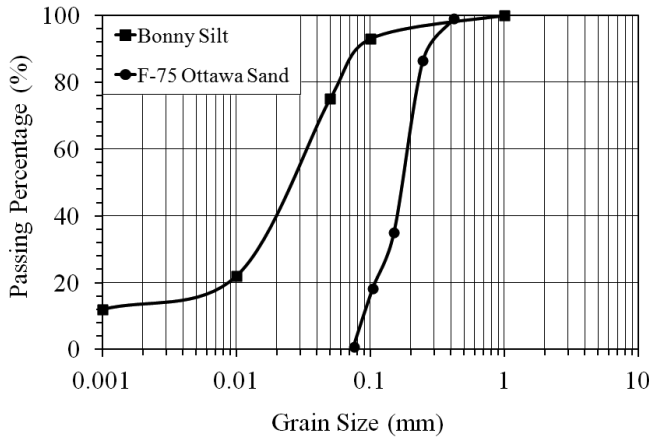


Fig. 4 Grain size distribution of Bonny silt and F-75 Ottawa sand

Table 1 Parameter values of SWRC equations for each soil

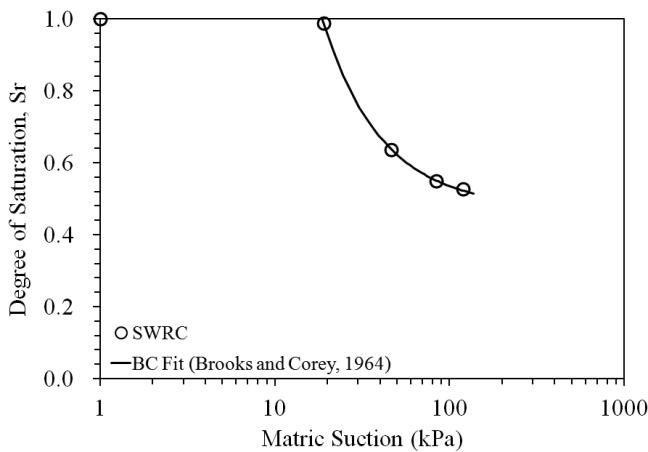
	Bonny silt (BC Model)	F-75 Ottawa sand (VG Model)
ψ_{aev} (kPa)	18.640	-
θ_s	0.400	0.394
θ_r	0.190	0.040
$b (= 1/\lambda)$	0.680	
α (kPa ⁻¹)	-	0.242
n	-	7.8

시료를 잘 혼합한 뒤 공시체 제작몰드에 시료를 넣고 Fig. 5 (a)의 함수특성곡선 간극률에 맞추기 위하여 3층 다짐을 통하여 제작하였다. F-75 오타와토사인 경우 건조상태의 시료를 삼축압축기 내에서 몰드와 멤브레인을 이용하여 성형을 한 뒤 구속압을 가하기전까지 진공을 가하여 Fig. 5 (b)의 함수특성곡선의 간극률에 맞추어 공시체를 제작하였다. 두 가지 토사를 이용하여 제작되어진 공시체의 조건은 Table 2와 같다.

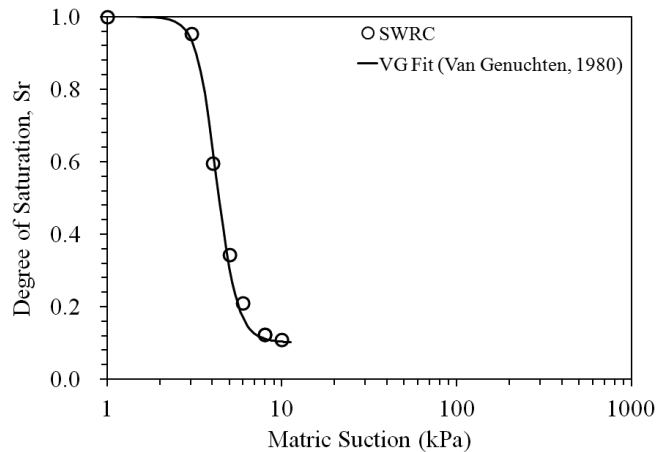
제작되어진 공시체는 삼축압축셀 안에 설치 한 후 플로우 펌프 시스템과 실험공시체를 완전 포화시킨다. 플로우 펌프 시스템과 실험공시체를 완전 포화시킨 후 플로우 펌프의 여러 등속도를 공시체의 하단에 가하여 발생되어진 수두차를 이용하여 각 공시체의 포화투수계수를 측정한다. 본 연구에서 활용되어진 보니토사와 F-75 오타와토사의 포화투수계수는 각각 1.2×10^{-7} m/s와 2.0×10^{-6} m/s로 측정되었다. 포화투수계수를 측정 후 공시체의 상단에 연결되어진 배압챔버와의 연결선을 이용하여 공시체의 상단의 공기를 주입하여 상단에 잔존하고 있는 물을 제거할 수 있다. 이후 각 공시체의 배수실험을 위하여 본 연구에서는 공시체의 하단에 플로우 펌프를 이용하여 포화투수계수와 같은 흐름속도를 가하였다. Fig. 6은 각 공시체의 하단에 포화투수계수와 같은 흐름속도를 가하였을 경우 차압변환기로 측정된 시간에 따른 공시체 바닥의 응답흡입력을 나타내고 있다. 본

Table 2 Soil specimen properties

	Bonny silt	F-75 Ottawa sand
porosity, n	0.40	0.39
height (cm)	7.11	3.22
Diameter (cm)	6.75	7.16
k_s (m/s)	1.2×10^{-7}	2.0×10^{-6}



(a) Bonny silt



(b) F-75 Ottawa sand

Fig. 5 SWRCs for each soil

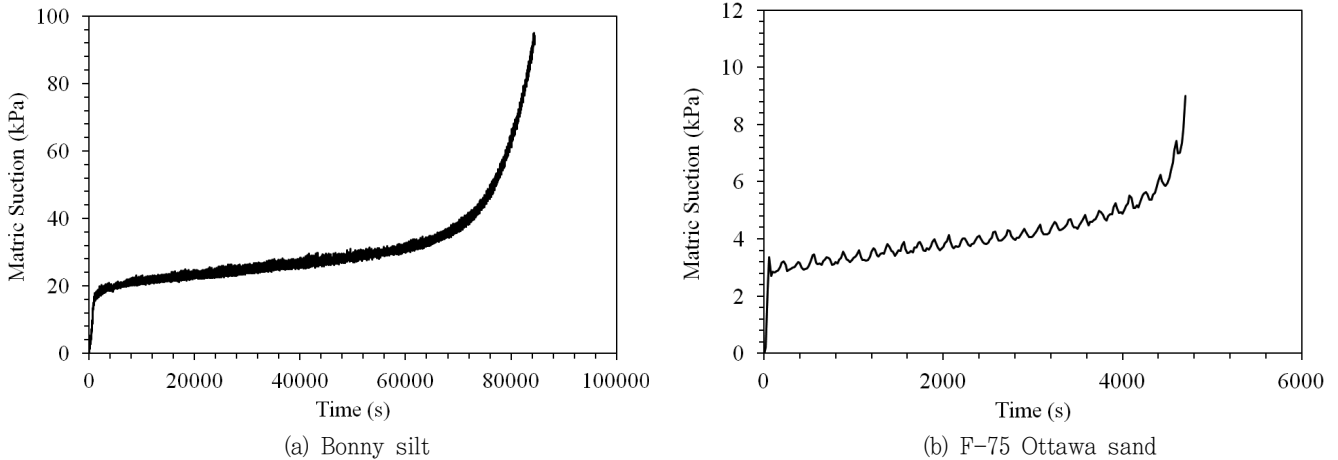


Fig. 6 Suction response results from flow pump system

연구의 배수실험의 경우 플로우 펌프에 의한 각 공시체 바닥면에서의 응답흡입력은 공시체내의 물 흐름이 액상에서 기상으로 넘어가는 경계선을 초과하지 않도록 보니토사의 경우 100 kPa, F-75 오타와토사의 경우 10 kPa까지 측정하였다. 기존문헌에 따르면 보니토사의 경우 100 kPa, F-75 오타와토사의 경우 10 kPa 이후 갇힌 물 (occluded water) 현상이 나타나는 것으로 보고되었다 (Khosravi, 2011; Ghayoomi, 2011).

2. 해석 결과

플로우 펌프에 의해 발생되어지는 응답흡입력에 상응하는 투수계수함수를 산정하기 위하여 본 연구에서는 역해석기법을 활용하였다. 투수계수함수를 산정을 위한 역해석기법에는 미국 Pacific Northwest National Laboratory에서 개발한 UNSAT-H 프로그램 (Fayer, 1990)과 Watermark Numerical Computing에서 개발한 최적화기법 프로그램인 PEST 프로그램 (Doherty, 2004)를 활용하였다. UNSAT-H 프로그램은 불포화 지반내의 1차원적 물흐름을 시뮬레이션하도록 설계되어졌으며, PEST 프로그램은 실제 실험에서 측정된 값과 수치해석을 통한 결과값이 최적화 될 수 있도록 수치해석 모델의 변수 값을 조정할 수 있도록 설계되어졌다.

앞서 언급한 바와 같이 식 (1)을 풀기 위해서는 여러 조건들과 더불어 불포화토의 두가지 흐름특성이 필요하다. 첫 번째 흐름특성은 함수특성곡선이며, 두 번째 흐름특성은 투수계수함수이다. 본 연구에서는 실험을 통하여 첫 번째 흐름특성인 함수특성곡선 (Fig. 5 참조)과 식 (1)의 해당인 시간에 따른 응답흡입력 (Fig. 6 참조)를 측정하였다. 따라서, 투수계수함수는 함수특성곡선과 응답흡입력 결과를 통하여 역으로 산정할 수 있다. 같은 간극률을 나타내는 서로 다른 공시체에서 측정된 함수특성곡선과 응답

흡입력의 경우 각각 실험 공시체가 함유하고 있는 간극 및 입도 분포가 차이가 미세하게 발생할 수 있는 단점을 지니고 있다. 하지만, 본 해석에서는 간극 및 입도분포의 야기할 수 있는 차이를 없다고 가정하고 각각의 함수특성곡선과 응답흡입력의 각 토사의 지정된 간극률을 대표하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

UNSAT-H 프로그램을 활용한 시뮬레이션시 투수계수함수를 표현하기 위한 여러 가지 모델들 중 본 연구에서는 보니토사의 경우 Brooks and Corey 모델 (1964)과 F-75 오타와토사의 경우 van Genuchten 모델 (1980)을 이용하였다. UNSAT-H의 프로그램에서 투수계수함수 모델의 변수들은 함수특성곡선 모델의 변수들과 별개로 입력이 되므로 PEST 프로그램은 보니토사와 F-75 오타와토사 응답흡입력 실험 결과와 UNSAT-H 시뮬레이션 결과가 일치할 수 있도록 적합한 투수계수함수 모델의 변수를 찾아낼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5 (a)의 보니토사 함수특성곡선모델로의 변수로부터 예측된 투수계수함수이며, Fig. 7 (b)에서 보는바와 같이 예측된 투수계수함수를 이용하여 수치해석시 응답흡입력 실험결과와 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 응답흡입력 실험결과에 상응하는 투수계수함수를 산정하기 위하여 본 연구에서는 Brooks and Corey 투수계수예측모델의 변수인 b ($= 1/\lambda$)를 PEST 프로그램 내에서 변화시키며 응답흡입력 결과에 상응하는 투수계수함수를 산정하고자 한다.

UNSAT-H 프로그램 연계된 PEST 프로그램의 운영에 있어 적절한 투수계수함수의 초기 변수 값을 정하는 것은 매우 중요하다. 보니토사의 경우 함수특성곡선 모델의 변수 b 의 값은 0.68이지만 본 최적화기법에서는 초기 변수 값을 0.75로 설정하여 수행하였다. Fig. 7 (a)와 (b)는 초기 변수 값 0.75일 때의 투수계수함수와 이에 따른 응답흡입력 수치해석 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 초기 변수 값을 변화시키는 이유는 적절한 초기

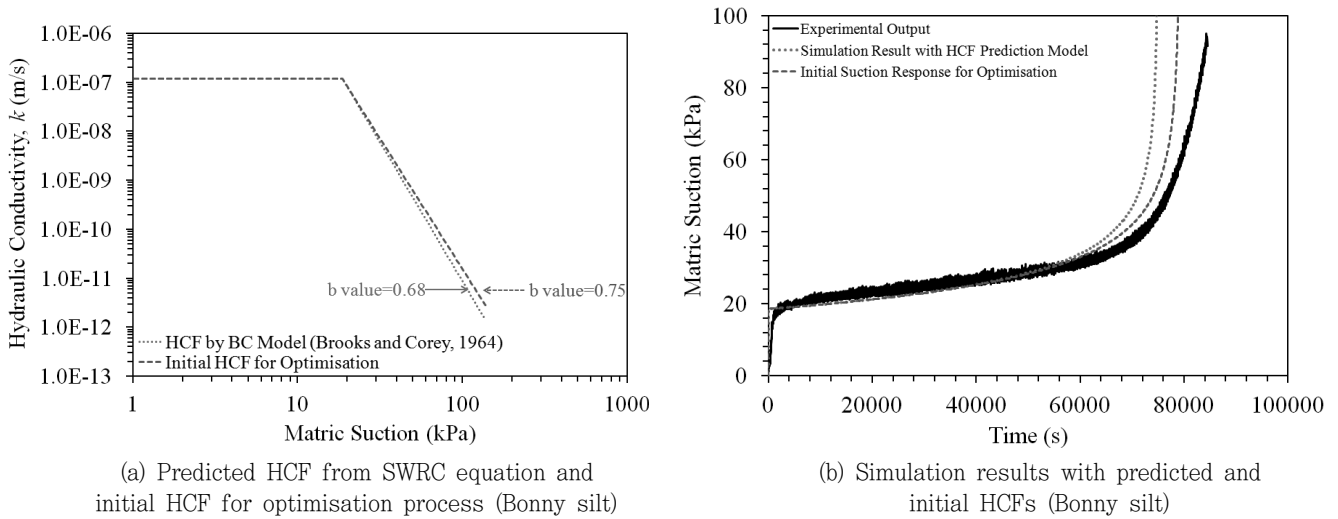


Fig. 7 HCFs and simulation results with predicted and initial HCFs

Table 3 Change of parameter values during optimisation process

	Parameter value from SWRC equation	Starting value	1st iteration	2nd iteration	3rd iteration	4th iteration	5th iteration	6th iteration
b (Bonny silt)	0.6800	0.7500	0.7575	0.7832	0.8167	0.8342	0.8364	0.8366
α (F-75 Ottawa Sand)	0.2420	0.2020	0.2004	0.1969	0.1959			

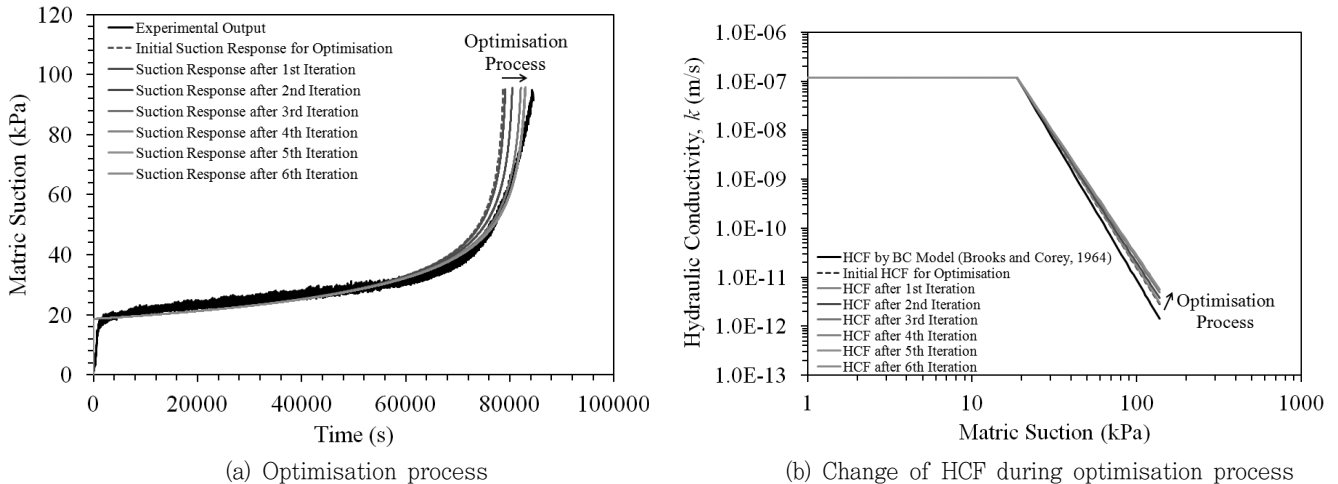
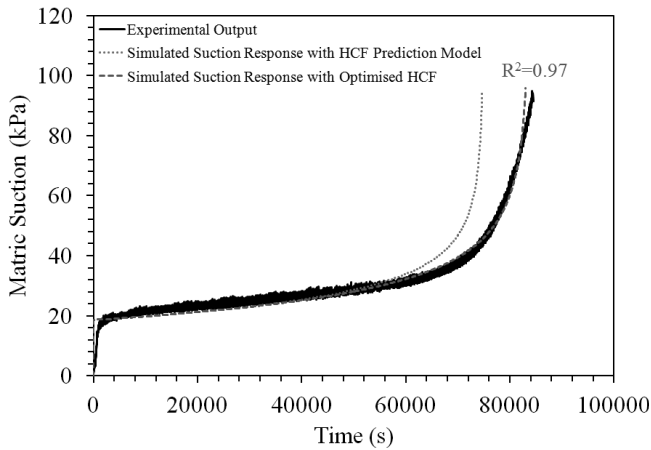


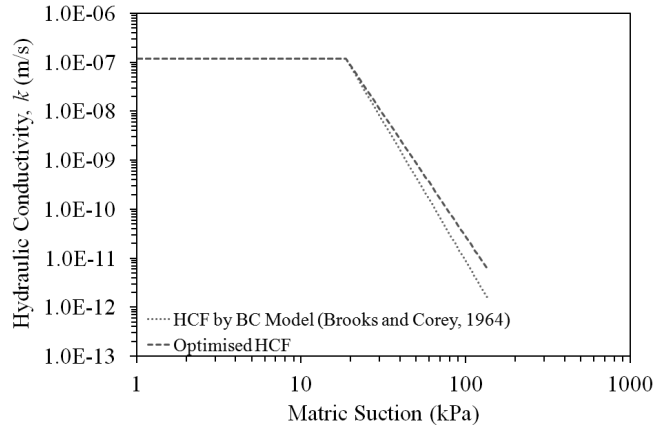
Fig. 8 Optimisation process in order to find proper HCF corresponding to suction response result by flow pump system (Bonny silt)

변수 값의 설정에 의하여 최적화 기법의 효율이 증대될 수 있기 때문이다. 만약 초기 변수 값의 설정이 적절하지 않다면, 프로그램 운영 시 수렴과정이 매우 느리게 되며, 또한 최적화기법에서 많은 반복과정을 요구하게 된다. 일반적으로 초기 변수 값 설정으로 인하여 최적화과정동안 변수들이 수렴하지 않을 경우 초기 변수 값들을 다시 설정하여 최적화기법을 다시 시작하게 된다. 또한 최적화기법에 있어 변수 값의 변화가 적절하게 이루어지도록 각 예측모델에 따른 변수 값의 하한선과 상한선을 적절하게

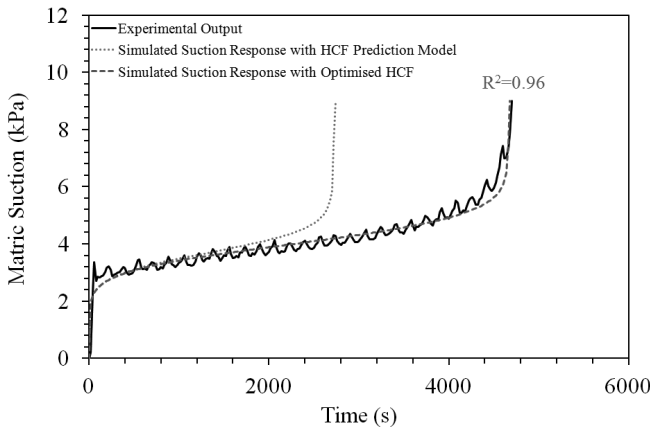
설정하여야 한다. 본 수치해석에 있어 투수계수함수 모델의 변수, b 는 초기 변수 값보다 작아지지 않도록 하한선을 설정하였다. 이와 같은 이유는 최적화기법 중 Brooks and Corey 모델의 변수 값이 초기 설정 값보다 작아지게 되면 UNSAT-H 프로그램의 수치해석에 의한 응답흡입력 결과는 매우 빠른 시간에서 매우 큰 흡입력 값에 도달하게 되어 PEST 프로그램을 이용한 최적화기법에서 실행시간오류 (run time error)가 발생하기 때문이다. 본 연구에서는 응답흡입력 실험결과와 수치해석 결과 사



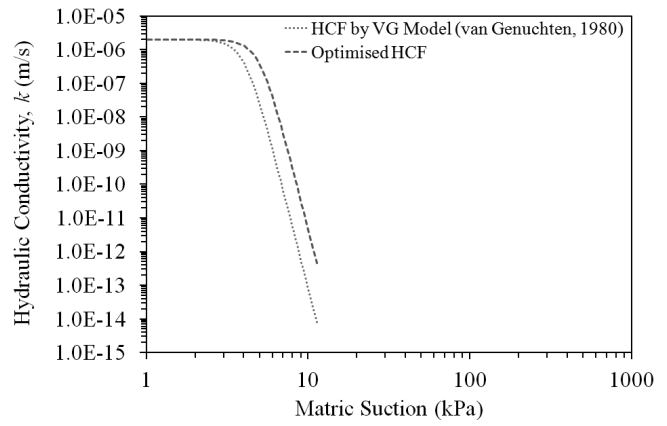
(a) Optimisation result (Bonny silt)



(b) Optimised HCF corresponding to experimental output (Bonny silt)



(c) Optimisation result (F-75 Ottawa sand)



(d) Optimised HCF corresponding to experimental output (F-75 Ottawa sand)

Fig. 9 Optimisation result of each soil for evaluation of the HCFs

이의 결정계수 (coefficient of determination, R^2)가 0.9이상에 도달할 때까지 최적화기법을 수행하였다.

Fig. 8은 보니토사 투수계수함수의 초기 변수 값을 0.75로 하여 수행된 최적화 과정을 나타내고 있다. Fig 8 (a)에서 보논바와 같이 본 최적화기법에서 플로우 펌프 시스템에 의한 응답흡입력에 상응하는 보니토사의 투수계수함수를 산정하기 위하여 PEST 프로그램은 6번의 반복과정을 거쳐 실험결과에 적합한 투수계수함수 변수 값을 찾아내었다. Fig. 8 (b)는 각 반복과정에서 얻어진 변수 값을 가지고 최적화기법 과정동안 투수계수함수의 변화를 나타내고 있다. 각 반복과정동안 얻어진 변수 값의 변화는 Table 3과 같으며, 최적화기법의 최종 결과는 Fig. 9 (a)와 (b)와 같다. 같은 방법을 이용하여 F-75 오타와 토사의 응답흡입력 실험 결과에 상응하는 투수계수함수를 최적화 기법을 통하여 산정하였으며, 그 결과는 Fig. 9 (c)와 (d)와 같다. 보니토

Table 4 Comparison of HCF parameter values between from SWRC equation and optimisation process

	Bonny silt (BC Model)		F-75 Ottawa sand VG Model	
	SWRC equation	Otpimsation process	SWRC equation	Otpimsation process
b	0.6800	0.8366	-	-
α (kPa^{-1})	-	-	0.2420	0.1959

사의 해석과 다르게 F-75 오타와토사는 투수계수함수를 표현하기 위하여 van Genuchten모형을 활용하였으며, 응답흡입력에 상응하는 투수계수함수를 산정하기 위하여 최적화 과정동안 α 변수를 변화시키며 최적화기법을 수행하였다. Table 4는 함수특성 곡선모델의 변수 값과 역해석기법을 이용하여 얻어진 투수계수함수 모델의 변수값의 차이를 나타내고 있다. Fig. 9와 Table 4

에서 보논바와 같이, 함수특성곡선 모델을 활용한 투수계수함수의 예측은 적절하지 못하다는 것을 확인할 수 있다. 보니토사의 경우 흡입력 100 kPa에서 투수계수함수의 예측모델은 실제 응답흡입력에 상응하는 투수계수값과 약 10배 작게 예측하는 것으로 나타나고 있으며, F-75 오타와토사의 경우 흡입력 10 kPa에서 투수계수함수 예측모델은 실제 응답흡입력에 상응하는 투수계수값과 비교시 약 100배 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 플로우 펌프의 응답흡입력 결과를 바탕으로 불포화토의 투수계수함수를 예측할 수 있는 역해석기법을 제안하였다. 또한 본 해석을 바탕으로 현재 지반공학 현장에서 많이 사용되어지는 투수계수예측모델이 내포하고 있는 불확실성에 대하여 언급하였으며, 다음과 같은 결과들을 도출하였다.

1. 현재 지반공학에서 사용되어지고 있는 투수계수함수 예측모델은 많은 국내의 연구를 통해서 실제 투수계수함수를 예측하는데 있어 불확실성을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 따라서, 불포화토 역학의 지반공학적 적용에 있어 현장에 맞는 적절한 투수계수함수를 산정할 수 있는 방법이 필수적으로 요구되어진다.

2. 본 연구에서는 플로우 펌프 시스템을 활용한 실험 결과와 불포화토 비정상상태의 지배방정식을 활용하여 실제 실험값에 상응하는 불포화토 투수계수함수를 산정할 수 있는 방법인 역해석기법을 제안하였다.

3. 본 연구에서 활용한 UNSAT-H 프로그램과 PEST 프로그램은 인터넷 웹상에서 무료로 제공되는 점으로 인하여 경제적으로 활용할 수 있는 장점을 지니고 있다. 불포화토 흐름해석에 있어 UNSAT-H 프로그램은 함수특성곡선모델의 변수와 투수계수함수 예측모델의 변수를 각각 다르게 입력할 수 있도록 설계되어 있어 본 역해석기법에 활용하기에 적합하다. 또한 PEST 프로그램은 기존에 제시된 많은 수치해석 프로그램과 연계가 가능하여 그 활용성이 높다고 할 수 있으며, 최적화할 수 있는 변수의 수에 제한을 두지 않고 있어 실험 결과에 알맞은 적절한 모델의 변수를 찾을 수 있다.

본 연구에서 나타난 바와 같이 함수특성곡선모델의 변수를 이용한 투수계수함수 예측 모델은 실제 투수계수함수 예측에 있어 불확실성을 내포하고 있으며, 기존 예측모델을 이용한 수치해석 시 실제 불포화토의 흐름해석을 정확하게 수행하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 본 연구는 한정된 간극률에 따라 수행된 것으로 향후 연구결과의 폭넓은 활용을 위하여 다양한 영향인자들의 변화를 통한 추가적인 연구수행이 필요할 것으로 판단되어진다. 또한, 본 연구에서 제안되어진 역해석기법을 포함하여

불포화토 투수계수함수에 산정에 대한 다양한 접근이 필요할 것으로 판단되어진다.

본 연구는 소방방재청 지진 및 지진해일 피해저감 기술개발사업인 “국내 발생가능 지진을 고려한 산사태 재해도 작성기법 개발 (총괄명: 지진시 사면붕괴 등 지반피해 예측기술 개발, NEMA-지진-2012-2)” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Brooks, R. H., and A. T. Corey, 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper, 3, March.
- Burdine, N. T., 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng.* 198: 71-77.
- Campbell, J. D., 1973. Pore pressures and volume changes in unsaturated soils. Ph.D. diss., Urbana-Champaign, Illinois: University of Illinois.
- Chiu, T.-F. and C. Shackelford, 2001. Laboratory evaluation of sand undrains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(1): 990-1001.
- Coca, J., and J. Wright, 1992. Diffusion and flow in gravel, soil, and whole rock. *Applied Hydrogeology* 1: 5-24.
- Doherty, J., 2004. *PEST, Model-independent parameter estimation user manual 5th Edition*. Watermark Numerical Computing.
- Fayer, M. J., 2000. *UNSAT-H Version 3.0: Unsaturated soil water and head flow model: theory, user manual, and examples*. Pacific Northwest National Laboratory, Washington.
- Fredlund, D. G., and A. Xing, 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532.
- Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang, 1994. Prediction the permeability function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 533-546.
- 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(4): 228-232.
11. Ghayoomi, M., 2011. Seismically induced settlement of partially-saturated sand. Ph.D. diss., Boulder, Colorado: University of Colorado.
 12. Hamilton J.M., D. E. Daniel, and R. E. Olson, 1981. Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils. In *Permeability and groundwater contaminant transport*, Zimmie T.F. and Riggs C.O. (Eds.), *ASTM Special Technical Publication* 746: 182-196.
 13. Huang, K., B. P. Mohanty, and M. Th. van Genuchten, 1998. A new convergence criterion for the modified picard iteration method to solve the variably saturated flow equation. *Journal of Hydrology* 178: 69-91.
 14. Khaeel, R., J. F. Relyea, and J. L. Conca, 1995. Evaluation of van Genuchten-Mualem relationships to estimate unsaturated hydraulic conductivity at low water content. *Water Resour. Res.* 31(11): 2659-2668.
 15. Khosravi, A., 2011. Small strain shear modulus of unsaturated, compacted soils during hydraulic hysteresis. Ph.D. diss., Boulder, Colorado: University of Colorado.
 16. Kim, S. N., C. W. Park, Y. J. Mok, and S. M. Kum, 2005. Determination of soil water characteristic curve and permeability equation of unsaturated soils using modified apparatus. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(5): 59-64 (in Korean).
 17. Klute, A., 1972. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Science* 113(4): 264-276.
 18. Lee, K. I., J. Lee, and W. J. Back, 2009. Soil-water characteristic curve of weathered granite soils in Pocheon area using flow pump technique. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 11-20 (in Korean).
 19. Lee, J., and C. Yu, 2012. A study on change of soil-water retention curve with different net confining pressures and porosities using a suction-saturation control technique. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 93-103 (in Korean).
 20. Lee, J., C. Yu, U. G. Kim, and D. W. Kim, 2012. Analysis of rainfall induced infiltration considering occluded air in unsaturated soils. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 129-139 (in Korean).
 21. Lim, S. Y., and T. J. Lyu, 2008. The analysis of permeability coefficient and the evaluation of equations of permeability coefficient for an unsaturated soils. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(1): 91-100 (in Korean).
 22. Lu, N., E. M. Kwicklis, and J. P. Rousseau, 2001. Determining fault permeability from subsurface barometer pressure at Yucca mountain, Nevada. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127: 801-809.
 23. Lu, N., A. Wallyace, J. Carrera, and W. J. Likos, 2006. Constant flow method for concurrently measuring soil-water characteristic curve and hydraulic conductivity function. *Geotechnical Testing Journal* 29(3): 1-12.
 24. McCartney, J. S., 2007. Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter. Ph.D. diss., Austin, Texas: University of Texas.
 25. McCartney, J. S and J. Parks, 2009. Uncertainty in predicted hydraulic conductivity functions of unsaturated soils. *17th ICSMGE Conference*, Alexandria, Egypt.
 26. McCartney, J. S and D. Znidarcic, 2010. Test system for hydraulic properties of unsaturated nonwoven geotextiles. *Geosynthetics International* 17(5): 10.
 27. McCartney, J. S and J. G. Zornberg, 2010. Centrifuge permeameter for unsaturated soils II: measurement of the hydraulic characteristics of an unsaturated clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(8): 1064-1076.
 28. Meerdink, J. C. Benson, and M. Khire, 1996. Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 122(7): 565-576.
 29. Moore, R., 1939. Water conduction from shallow water tables. *Hilgardia*, 12: 383-426.
 30. Mualem, Y., 1976. A new model for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
 31. Ng, C., and Y. Pang, 2000. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(2):

- 157-166.
32. Nimmo, J. R., J. Rubin, and D. P. Hammermeister, 1987. Unsaturated flow in a centrifugal field: measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law, *Water Resource Research* 23(1): 124-134
33. Richards, L., 1952. Water conducting and retaining properties of soils in relation to irrigation, *Proc. Int. Symp. On Deser Res.*: 523-426.
34. Sigda, J. M., and J. L. Wilson, 2005. Are faults preferential flow paths through semiarid and arid vadose zones. *Water Resour. Res.* 39(8): 1225-1239.
35. Vanapalli, S., D. Pufahl, and D. Fredlund, 1999. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique* 49(2): 143-159.
36. van Genuchten, M. TH., 1980. A closed-form for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
37. Wildenschild, D., J. W. Hopmans, and J. Simunek, J. 2001. Flow rate dependence of soil hydraulic characteristics. *Soil Science Society of America Journal* 65(1): 35-48.
38. Wildenschild, D., K. H. Jensen, K. J. Hollenbeck, T. H. Illangasekare, D. Znidarcic, T. Sonnenborg, and M. B. Butts, 1997. A two-stage procedure for determining unsaturated hydraulic characteristics using a syringe pump and outflow observations. *Oil Science Society of America Journal* 61(2): 347-359.
39. Young, M., A. Karagunduz, J. Simunek, and K. Pennell, 2002. A modified upward infiltration method for characterizing soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 66: 57-64.
40. Zornberg, J. G., and J. S. McCartney, 2010. Centrifuge permeameter for unsaturated soils I: theoretical basis and experimental developments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(8): 1051-1063.