

부정류 유출 및 흡입시험에 대한 불포화 투수계수의 역해석

Back Analysis of Unsaturated Hydraulic Conductivities for Transient Water Release and Imbibitions Measurement

오 세 봉¹ Oh, Seboong
김 도 형² Kim, Do-Hyung
송 영 석³ Song, Young-Sug

Abstract

Tests for transient water release and imbibitions measurement were conducted to estimate the unsaturated hydraulic conductivities by using back analysis. By using transient hydraulic characteristics, both the soil water retention curve and hydraulic conductivity function can be evaluated effectively and accurately. In this study the experiment for three samples were conducted accurately to measure the change of water content with time for various steps of matric suction. The back analysis calculated the amount of transient flow reliably in comparison with the experimental results. In the soil water retention curve there was no significant difference between the result of back analysis and that of experiment. The hydraulic conductivity function from back analysis was compared with the theoretical relation based on retention curve but they showed much difference. However, the unsaturated hydraulic behavior obtained by the combination of experimental and analytical techniques are considered to agree with the actual behavior.

요 지

불포화 투수계수 추정을 위하여 부정류 유출 및 흡입시험을 수행하였고 그 결과를 이용하여 역해석을 수행하였다. 부정류 수리특성을 이용하면 함수특성곡선 및 불포화투수계수를 정확하고 효율적으로 구할 수 있다. 본 연구에서 세가지 시료에 대한 실험을 세분화된 모관흡수력에 대하여 실행하고 시간에 따른 함수비의 변화를 정밀하게 측정하였다. 역해석과 실험결과를 비교한 결과, 시간에 따른 유량의 변화를 신뢰성 있게 계산할 수 있었다. 역해석의 해로 구한 함수특성곡선에서는 실험결과와 근사하게 나타났다. 불포화 투수계수곡선에서는 함수특성곡선으로부터 이론적으로 구한 곡선과 비교하였으나 역해석 결과와는 다소 차이를 보였다. 하지만 실험적 및 해석적 기법을 병행하여 획득한 불포화 수리적 거동이 실제거동에 부합된다고 판단된다.

Keywords : Unsaturated soil, Hydraulic conductivity, Soil water retention

1 정희원, 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ., Tel: +82-53-810-3512, Fax: +82-53-810-4662, sebungoh@yu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 영남대학교 건설시스템공학과 석사 (M.Sc., Dept. of Civil Eng., Yeungnam Univ.)

3 정희원, 한국지질자원연구원 지질환경연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

불포화토의 수리특성은 불포화층에서 간극수의 유동과 역학적 거동을 해석하는 데 핵심적인 역할을 하며, 함수특성곡선(soil water retention curve, SWRC)과 투수계수함수(hydraulic conductivity function, HCF)로 결정된다. 불포화토의 투수계수는 실험적으로 획득하는 것이 필요하지만, 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이로 인하여 함수특성곡선으로부터 불포화 투수계수곡선을 간접적으로 추정하는 기법들이 개발되었다(Kunze et al., 1968; Campbell, 1973; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Fredlund et al., 1994). 특히 van Genuchten 함수 특성곡선의 경우, Mualem 이론을 적용하여 함수특성곡선의 계수로부터 투수계수 함수를 얻을 수 있어서 편리하다.

Mualem 이론에 의한 불포화 투수계수 곡선에서는 실험적 계수 l 이 간극의 연결성을 고려하여 실제 투수계수 곡선을 예측하며 실험적인 근거가 없을 때에는 0.5로 가정한다. 그러나 많은 연구를 통해서 연결성계수 l 이 다양한 범위의 값에서 실제 투수계수곡선을 잘 피팅할 수 있었다(Fredlund et al., 1994; Schaap and Leij, 2000; Peters and Durner, 2008; Salas et al., 2014). 또한 종종 음의 값을 나타내며 국내 풍화토에서는 평균 -1.5~4.3의 값을 보여준 보고가 있다(Peters et al., 2011, Oh et al., 2015).

또 다른 방법으로는 제한적인 유출량 측정자료를 수치적으로 역해석하고 포괄적인 수리특성을 구하는 것이다(Wayllace and Lu, 2012). 즉 함수특성과 유사한 실험적인 관찰과정을 제한적인 모관흡수력 단계에서 시간에 따른 변화를 측정하여 역해석을 통하여 함수특성과 투수계수 효과를 추정한다. 역해석 과정이 해의 유일성을 확보하면, 불포화 투수계수와 함수특성곡선을 동시에 획득할 수 있다. 또한 실험적인 자료를 포함하므로 투수계수의 신뢰성이 확보된다. 이러한 이유로 부정류 유출 및 흡입법(transient water release and imbibitions method, TRIM)을 이용하고 실험자료에 대한 역해석을 수행한다.

이 기법은 두 세계의 모관흡수력 단계에서 건조 및 습윤과정을 수행하고 시간에 따른 유량을 정확하게 측정한다. 각 단계에서는 최종적으로 함수비를 측정하는 함수특성시험과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 국내 시료들에 대한 실험결과를 통하여 TRIM의 적용성을 검증한다. 이를 위하여 시험의 단계를 함수특성시험과 같은 수준으로 충분히 많이 수행하여 함수특

성곡선을 직접 구하고 역해석 결과와 비교한다. 또한 역해석시 구한 투수계수 곡선이 적절한지 검토할 것이다.

2. 부정류 시험을 통한 불포화 투수계수 획득기법

함수특성곡선은 일반적으로 간극수 부피와 모관흡수력의 관계로 정의된다. 모관흡수력은 공기압 u_a 와 간극수압 u_w 의 차(즉, $u_a - u_w$)이며, 대기압 하($u_a=0$)에서 수압의 -1배(즉, $-u_w$)에 해당한다. 이 때 간극수의 부피는 체적함수비 θ 또는 유효 포화도 Θ 를 변수로 나타내며, 유효포화도는 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

여기서, θ_s 는 포화 체적함수비이고, θ_r 는 잔류 체적함수비이다. van Genuchten (1980)에 의한 함수특성곡선은 $(u_a - u_w)$ 와 Θ 의 관계를 다음 식과 같이 제안하였다.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^m \quad (2)$$

여기서 α 는 공기 함입치 u_b 의 역수이며, n 은 곡선 기울기와 관련된 계수이고 $m = 1 - 1/n$ 이다.

Mualem 이론(1976)에 의하면 불포화토의 투수계수 함수는 함수특성곡선으로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K(\Theta) = K_s \Theta^l \left(\int_0^\Theta \frac{d\Theta}{u_a - u_w} \right)^2 / \left(\int_0^1 \frac{d\Theta}{u_a - u_w} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 K_s 는 포화 투수계수이며, 불포화토의 투수계수 함수는 포화투수계수와 상대투수계수 함수의 곱으로부터 계산할 수 있다. 간극 연결성 계수 l 은 실험적 계수이며, 때로는 0.5로 가정한다(Mualem, 1976). 투수계수 함수는 식 (3)에 식 (2)의 van Genuchten(1980)의 함수를 대입하면 다음과 같이 유효포화도의 함수로 나타난다.

$$K = K_s \Theta^l \{1 - (1 - \Theta^{1/m})\}^{2m} \quad (4)$$

불포화토 시료에 모관흡수력이 증가하거나 감소하면 유출 또는 흡입이 발생한다. 실험적으로 모관흡수력을 단계적으로 조절하고, 각 단계의 모관흡수력 하에서 시

간에 따라 부정류의 유량을 측정하여 유량곡선으로 얻을 수 있다. 부정류 간극수 유량이 측정되면, 이를 목적 함수로 역해석하면 불포화토의 수리특성을 획득할 수 있다. 이 때 Richards 방정식을 풀어서 HYDRUS 1D (Simunek et al., 2013) 프로그램의 역해석 절차를 이용한다. 1차원적 연직방향(z) 유동에 대하여 압력수두(h_p)를 변수로 나타내면 Richards 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(h_p) \frac{\partial (h_p + z)}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z} + K(h_p) \right) = \frac{\partial \theta(h_p)}{\partial h_p} \frac{\partial h_p}{\partial t} \quad (5)$$

여기서 $\theta(h_p)$ 와 $K(h_p)$ 는 각각 SWRC와 HCF의 함수값이며 t 는 시간이다.

초기조건 및 경계조건을 적용하여 역해석을 수행하면, 함수특성 식 (2)에 포함된 θ_s , θ_r , α , n 과 투수계수 식 (4)에 포함된 계수 K_s , l 의 값을 구할 수 있다. 이러한 계수들은 건조과정 및 습윤과정에 대하여 따로 구해지며 상이한 값으로 나타날 수 있다. Fig. 1은 SWRC와 HCF를 동시에 얻기 위하여 적용한 역해석의 개요도이다.

3. 부정류 유출 및 흡입 실험

본 연구에서 사용된 시료는 상주(화강암풍화토), 포항(이암풍화토), 임기(부산소재 광산 광미) 시료를 대상으로 하였다. 함수특성곡선은 자동 부정류 유출 및 흡입

법을 활용하였다(Song et al., 2014). Table 1은 연구지역 시료의 기본적인 물리적 특성을 정리하였으며, 상주와 임기 시료는 SM이고, 포항 시료는 CL에 해당한다. 건조단위중량은 상주는 12.10kN/m³, 포항 11.87kN/m³, 임기 15.90kN/m³이며, 현장함수비는 포항이 36.16%로 가장 크게 나왔고, 상주는 19.63%이며, 임기 시료가 6.87%로 가장 작게 나타났다.

다음 Fig. 2는 본 연구에 사용한 TRIM 시험장치의 개요도를 나타낸 것이다(Song et al., 2014). Fig. 2에서 볼 수 있듯이 압력 판넬에 의해 조절된 공기압을 흡시료에 가하면 시료내 간극수가 빠져 나가거나 들어오며, 이 간극수의 양은 고압 공기함입치(high air entry, HAE) 디스크와 공기방울 트랩(air bubble trap)을 거쳐 전자저울로 실시간 측정된다. 전자저울은 컴퓨터와 연결되어 있으며 가해진 공기압과 간극수의 부피는 TRIM 프로그램을 통해 확인 및 저장이 가능하다. 주어진 모관흡수력에서 시료내 평형을 완료하도록 간극수의 양이 변화가 없

Table 1. Basic properties of three samples

Properties	Sangju	Pohang	Imgi
Gs (specific gravity)	2.57	2.44	2.73
γ_t (kN/m ³)	14.48	16.16	17.00
γ_d (kN/m ³)	12.10	11.87	15.90
w (%)	19.63	36.16	6.87
PI (%)	14.05	16.66	-
USCS	SM	CL	SM
e (void ratio)	1.08	1.05	0.71

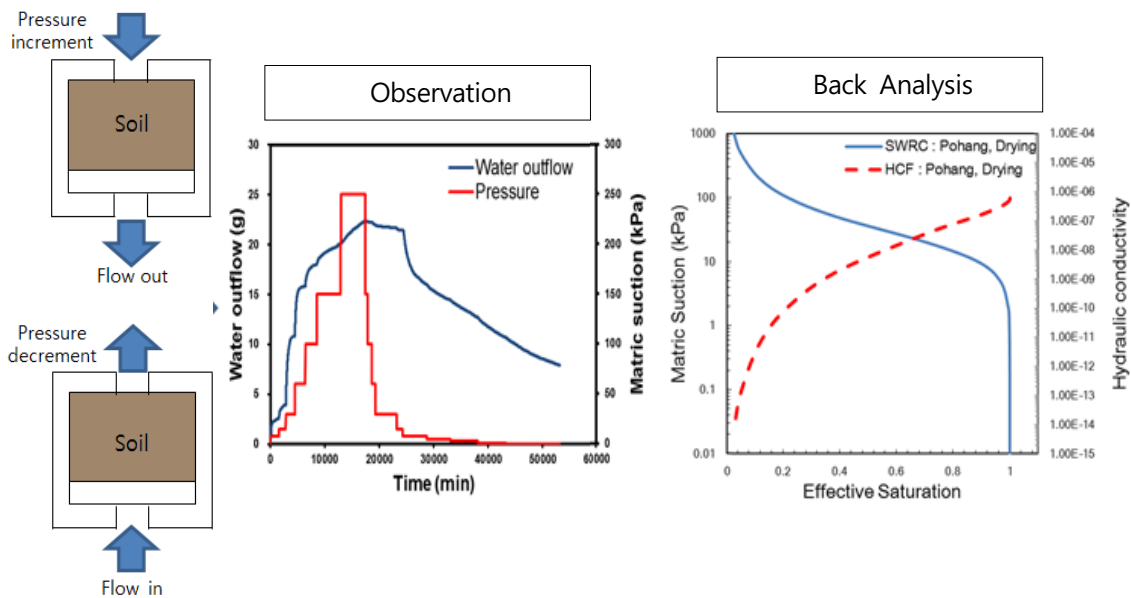


Fig. 1. Conceptual illustration of back analysis

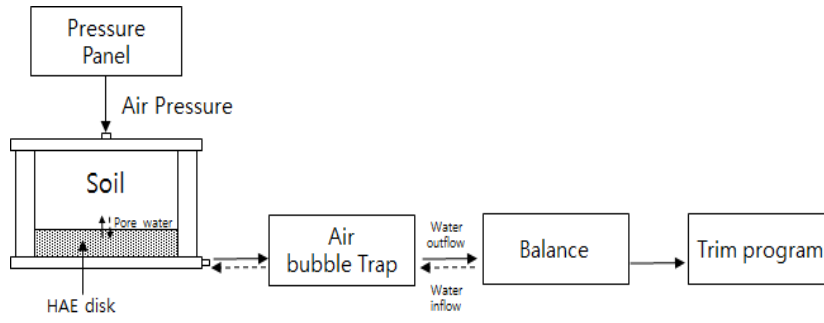
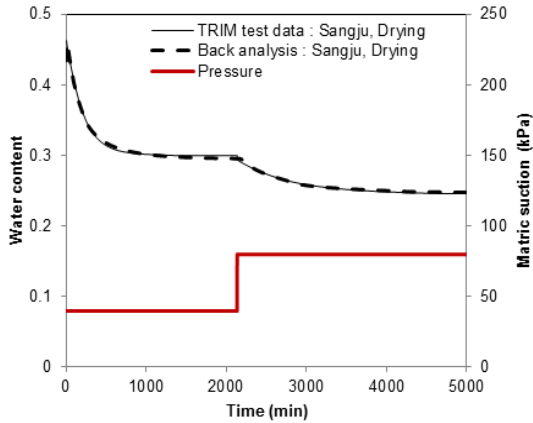
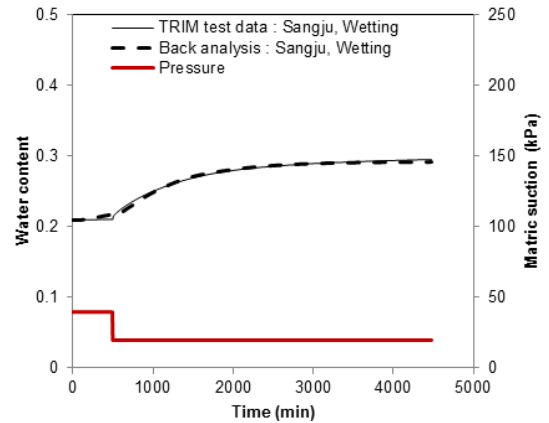


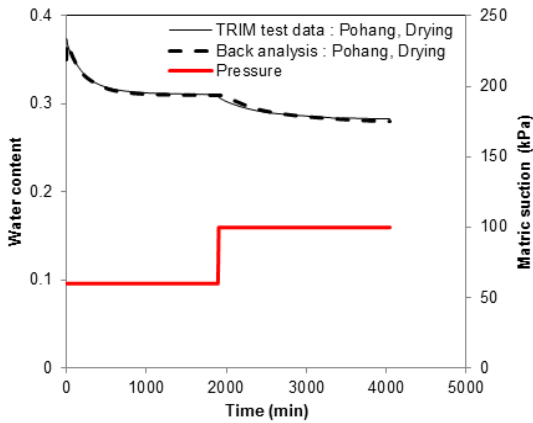
Fig. 2. TRIM apparatus



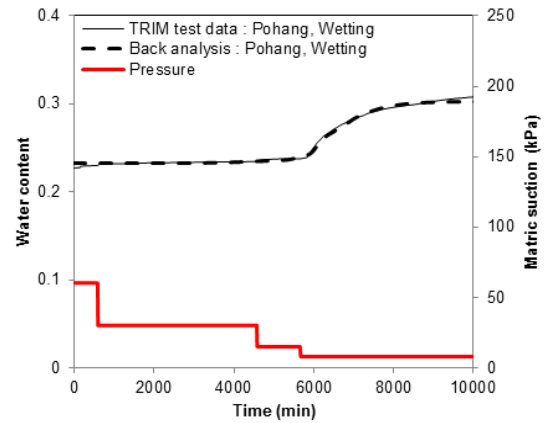
(a) Drying process of Sangju sample



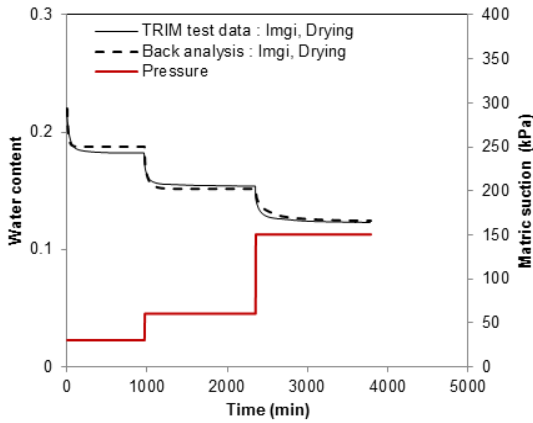
(b) Wetting process of Sangju sample



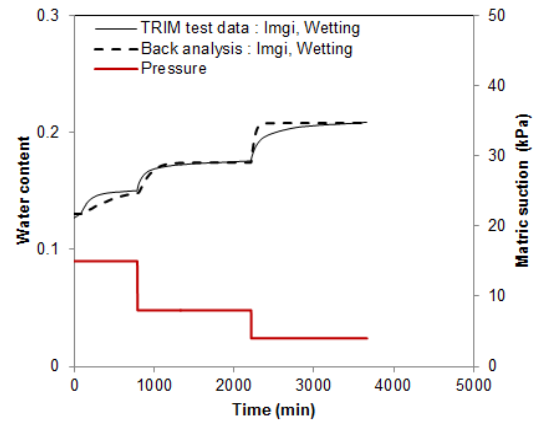
(c) Drying process of Pohang sample



(d) Wetting process of Pohang sample



(e) Drying process of Imgi sample



(f) Wetting process of Imgi sample

Fig. 3. The variation of water content with matric suction

고 수렴할 때까지 각 단계를 진행하며, 이후 다음 모관 흡수력 단계를 진행한다. 단계적으로 모관흡수력을 변화시켜 시료내 간극수를 배출 및 유입을 유도하여 건조, 습윤과정의 함수특성을 측정할 수 있었다.

Fig. 3에서는 부정류 유출 및 흡입법에 의한 상주, 포항, 부산 지역의 시간에 따른 유량을 측정한 결과를 비교하고 있다. 또한 실험결과와 역해석 결과를 비교하여 나타냈으며, 각 단계에서는 상응하는 모관흡수력에 따른 함수비의 변화를 보여준다. 건조과정에서는 모관흡수력이 증가하면서 함수비가 감소하고, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소하면서 함수비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 역해석을 통한 방법에서는 건조 및 습윤과정에서 서너개 정도의 모관흡수력 단계를 측정하고 단기간에 시험을 종료한다. 본 연구에서는 많은 단계의 시험과정을 수행하고 직접적으로 함수특성곡선을 구하여 역해석 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 모든 단계에 대하여 역해석을 수행하고 실험시 획득한 유량-시간 관계를 계산하도록 시도하였지만, 자료의 일부 단계에서 해가 수렴하지 않거나 전반적인 역해석 결과에 정확도를 해치는 결과가 나타났다. 이로 인하여 역해석에 사용한 시험단계는 그중 일부를 추출하였다. 상주, 포항지역 시료에서 건조과정에서 모관흡수력을 2단계로, 부산지역은 3단계로 적용하였다. 습윤과정에서 상주지역은 2단계, 포항지역은 4단계, 부산지역은 3단계로 적용하였다.

실험결과에 의하여 상주지역은 건조과정에서 모관흡수력이 40kPa일 때, 체적함수비는 0.46~0.3의 변화를 보였으며 80kPa일 때는 체적함수비는 0.3~0.25의 변화를 보였다. 또한 습윤과정에서는 40kPa일 때, 체적함수비의 변화는 거의 없으나 20kPa일 때는 체적함수비가 0.21~0.29의 변화를 보였다. 포항지역은 건조과정에서 모관흡수력이 60kPa에서 체적함수비는 0.37~0.31의 변화를 보였고, 100kPa에서는 체적함수비는 0.31~0.28의 변화를 보였다. 또한 습윤과정에서는 60~15kPa일 때, 체적함수비의 변화는 거의 없으나 8kPa일 때는 체적함수비

가 0.24~0.31의 변화를 보였다. 임기지역은 건조과정에서 모관흡수력이 30kPa에서 체적함수비는 0.22~0.18의 변화를 보였고, 60kPa에서는 체적함수비는 0.18~0.15, 150kPa에서 0.15~0.12의 변화를 보였다. 또한 습윤과정에서는 15kPa일 때 0.13~0.15, 8kPa일 때 0.15~0.18, 4kPa에서 0.18~0.21의 함수비 변화를 보였다.

위의 실험결과에 대하여 프로그램 Hydrus-1D를 적용하여 역해석을 수행하였다. 상주 및 포항시료의 역해석 결과에서 건조 및 습윤시 함수비 변화는 실험 결과와 거의 일치하는 경향을 보였다. 임기시료의 경우에는 실험시 유량의 변화를 역해석으로 대체로 유사하게 계산하였다. 이로부터 세가지 시료에 대하여 함수특성곡선과 불포화 투수계수 곡선을 역해석하여 구할 수 있다고 판단하였다.

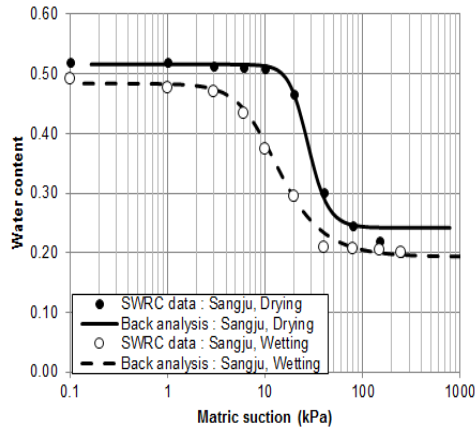
4. 부정류 역해석

TRIM 시험을 수행하는 과정에서 충분히 많은 모관 흡수력 단계에서 평형화를 완료하도록 충분한 시간을 소요하였다. 그리고 각 단계마다 최종적으로 평형상태에 도달하도록 시험을 수행하였으며, 이때 모관흡수력-함수비 관계를 측정하여 함수특성곡선을 획득하였다. 이러한 함수특성곡선 측정자료(SWRC data)를 기준으로 역해석으로 구한 함수특성곡선과 비교하여 역해석 기법을 검증할 수 있다. 역해석으로 구한 함수특성곡선이 검증되면, TRIM 시험 단계를 한-두단계로 줄이거나 시간을 짧게 측정하여 전체 함수특성곡선을 구할 수 있게 된다.

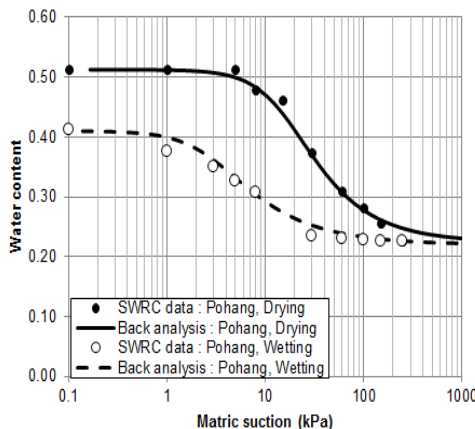
Table 2에서는 세가지 시료에 대한 수리특성 계수를 보여준다. 함수특성곡선과 관련한 네 개 계수는 평형시 함수특성곡선 측정자료(SWRC data)를 van Genuchten 모델에 피팅하여 구한 계수이다. 결과를 보면 건조과정에서 공기함입치(u_b)는 5.55~27.7kPa, 포화체적함수비(θ_s)는 0.45~0.52, 잔류함수비(θ_r)는 0~0.22이다. 습윤

Table 2. Measured parameters of unsaturated hydraulic characteristics for three samples

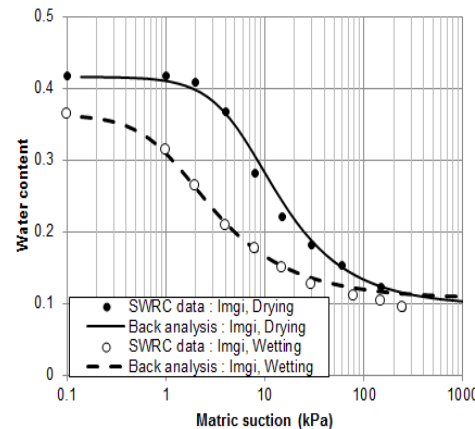
Samples		u_b (kPa)	n	θ_s	θ_r	k_s (m/s)	l
Sangju	Drying	27.72	3.72	0.52	0.22	2.59×10^{-8}	0.5
	Wetting	8.89	2.41	0.48	0.19		
Pohang	Drying	19.26	1.92	0.51	0.21	6.00×10^{-7}	0.5
	Wetting	3.46	1.88	0.40	0.22		
Imgi	Drying	5.55	1.81	0.45	0.01	1.71×10^{-5}	0.5
	Wetting	1.27	1.67	0.36	0.01		



(a) Sangju sample



(b) Pohang sample



(c) Imgi sample

Fig. 4. Comparison of SWRCs for three samples

과정에서 공기함입치는 1.27~8.89kPa, 포화체적함수비는 0.36~0.48, 잔류함수비는 0~0.19이다.

Fig. 4에서는 함수특성곡선 측정자료와 HYDRUS를 이용한 역해석 결과를 비교였다. Table 3에서 보여지듯이, 상주시료 건조과정에서는 역해석시 공기 함입치는 Table 2의 실험치에 비하여 5kPa 작은 22.7kPa를 보이며 습윤과정에서는 비슷한 값을 나타낸다. n값과 포화체적 함수비는 실험결과와 역해석 결과가 유사하지만 잔류함수비에서는 건조과정에서 역해석시 결과가 10% 정도 크게 나타났다. 포항지역의 함수특성곡선 건조과정에서 공기 함입치에 대한 역해석 결과가 3kPa 작은 16.7kPa를 가지지만, 나머지 불포화 계수는 서로 유사한 것을 알 수 있다. 부산 지역의 함수특성곡선은 건조과정에서 n값과 포화체적함수비에서 역해석 결과가 실험결과보다 작은 값을 가진다. 하지만 나머지 불포화 계수는 실험결과와 역해석 결과가 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 3의 시간에 따른 유량곡선은 목적함수이므로 역해석 결과가 실험치와 거의 동일한 결과가 나타나는 것은 역해석의 정확도를 보여준다. Fig. 4의 함수특성곡선은 역해석의 해이므로 실험치와 차이가 나타날 수 있지만, 실제로는 유량의 변화와 관련이 있는 변수이므로 실험치와 역해석치가 매우 유사하게 나타났다.

먼저 기존 방법으로 불포화 투수계수를 산정하고 역해석 결과와 비교할 것이다. 통상적으로 불포화 투수계수를 실험적으로 획득하지 않은 경우에는 식 (4)를 통하여 이론적으로 추정할 수 있다. 함수특성곡선을 식 (3)에 입력하면 식 (4)와 같이 van Genuchten-Mualem(VGM) 모델을 구할 수 있다. Table 2에서 보여지듯이, 실험적으로 획득한 함수특성을 기반으로, 투수계수 함수가 6개의 계수로 정의된다. 포화투수계수는 변수두시험 결과이며, 상주가 $2.59 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 로 가장 작게 나타났고, 포항은 $6.00 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 이고, 임기가 $1.71 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 로 가장 크게 나타났다. 계수 l은 실험적 근거가 없어서 통상적인 값인 0.5로 가정하였다.

Table 3. Back analysis parameters of unsaturated hydraulic characteristics for three samples

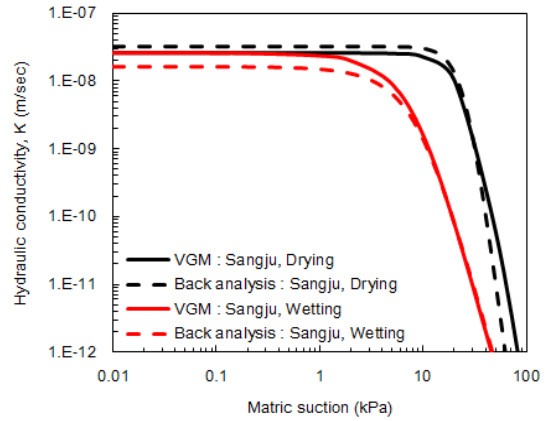
Samples		u_b (kPa)	n	θ_s	θ_r	k_s (m/s)	l
Sangju	Drying	22.65	3.91	0.52	0.24	3.28×10^{-8}	-8.86×10^{-1}
	Wetting	9.95	2.39	0.48	0.19	1.66×10^{-8}	-1.63
Pohang	Drying	16.65	1.93	0.51	0.22	2.52×10^{-7}	1.10×10^{-5}
	Wetting	3.10	1.77	0.41	0.22	2.19×10^{-7}	1.53×10^{-4}
Imgi	Drying	5.99	1.77	0.42	0.10	2.18×10^{-5}	2.40×10^{-1}
	Wetting	1.15	1.67	0.36	0.11	2.18×10^{-5}	6.11×10^{-5}

본 연구에서는 TRIM 시험의 유량곡선에 대한 역해석을 통하여 함수특성곡선 뿐 아니라 불포화 투수계수를 동시에 구할 수 있었다. 불포화상태에서 흡입자 사이의 유로형태와 관련된 계수 l 은 시료에 따라 독특한 물성으로 실험적으로 구해야 한다. Table 3에서는 계수 l 이 1보다 작거나 음의 값으로 나타났다. 이러한 결과는 국내 풍화토를 대상으로 한 기존 연구와 유사하게 나타난다(Oh et al., 2015). 한편 실험결과를 역해석하는 과정에서 정확도를 높이고 다양한 계수연구를 위하여 포화투수계수는 건조시와 포화시에 다르게 가정하여 역해석을 수행하였다. TRIM에 의한 수리물성은 부정류시험에 기반하여 실험적 근거를 확보하고 있으므로, 가정된 경우에 비하여 적절하다고 판단한다.

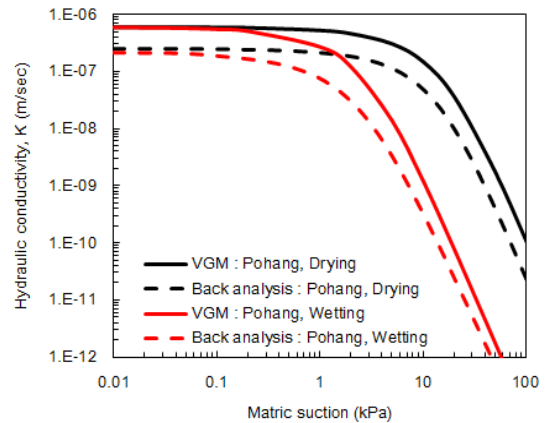
Fig. 5에서는 역해석 결과 구한 불포화 투수계수 함수를 함수특성을 이용한 이론적인 VGM 모델(Table 2)과 비교하였다. 먼저 역해석시 상주지역 건조과정에서는 포화투수계수($3.28 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)는 흡윤 과정의 값($1.66 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)에 비하여 두배 정도 큰 값을 가진다. 그리고 VGM 모델의 포화투수계수($2.59 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)는 그 사이에 있다. 간극 연결성 계수 l 은 건조과정과 흡윤 과정 모두 음의 값을 가진다(Table 3). Fig. 5(a)에서 보여지듯이 역해석시 상주지역의 불포화투수계수는 건조시에는 흡윤시보다 전체 모관흡수력에 대하여 크게 나타나고 있다. 특히 포화부근 공기함입치보다 낮은 모관흡수력 수준에서 VGM 모델과 상이한 결과를 나타낸다.

포항지역 건조 및 흡윤 과정에서 모두 포화투수계수 (2.52×10^{-7} , $2.19 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)가 역해석 모델의 경우가 VGM 모델($6.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)보다 작은 값을 가진다. 이러한 포화투수계수의 차이가 타 시료에 비하여 크게 나타난다. 임기시료는 역해석 결과, 건조와 흡윤시 포화 투수계수가 동일한 값($2.18 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)을 가지고 있으며 VGM 모델 ($1.71 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)보다 큰 값을 가진다. 하지만 TRIM 시험으로 구한 시료의 포화투수계수는 전반적으로 변수두 시험을 통하여 구한 비교치들에 비하여 크게 벗어나지는 않는 값들을 보여준다. 이러한 결과는 시료의 제원이 나 시험조건의 차이로 인하여 영향 받을 수 있다.

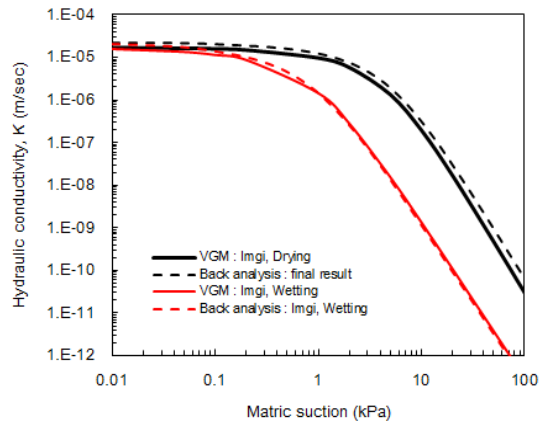
역해석 결과 나타난 포항 지역의 불포화 투수계수 곡선은 VGM 모델과 비교할 때, 포화투수계수의 차이에 따른 영향을 크게 받고 있다. 전반적인 곡선의 양상은 TRIM 결과와 VGM 모델이 유사하게 나타나는 경향이 있다. 또한 역해석시 포화투수계수는 구속조건에 따라 여러 값으로 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 포



(a) Sangju sample



(b) Pohang sample



(c) Imgi sample

Fig. 5. Comparison of HCFs for three samples

화투수계수의 효과는 TRIM 시험 및 역해석 과정에 국한되는 것은 아니며 불포화투수계수 함수에 대하여 보편적으로 나타나는 효과라고 할 수 있다. 이러한 점을 감안할 때 TRIM 기법에 의하여 포화투수계수 및 불포화 투수계수 함수를 동시에 산정하는 것이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상주, 포항, 부산 임기광산 시료에 대하여 부정류 유출 및 흡입법을 이용하여 시간에 따른 함수비의 변화를 측정할 수 있었다. 이러한 측정곡선을 역해석하고 함수특성곡선과 동시에 불포화 투수계수 함수를 도출하였다.

TRIM 시험과정 측정한 시간에 따른 함수비는 다양한 모관흡수력 단계에 대하여 건조 및 습윤과정에 대하여 시험을 수행하였다. 그리고 세 시료에 대하여 유입 및 유출량에 대한 실험결과를 역해석하여 유사하게 계산할 수 있었다. 이를 통하여 역해석의 해로서 불포화 수리물성, 즉 함수특성곡선과 불포화 투수계수 함수를 구할 수 있었다.

함수특성곡선을 비교한 결과, 역해석으로 구한 곡선은 실험치와 유사하게 나타났다. TRIM 시험은 일부 모관흡수력 단계만을 짧은 기간 시험을 수행하여 전반적인 함수특성곡선을 효율적으로 구할 수 있음을 알 수 있다. TRIM 시험 및 역해석을 통하여 불포화 투수계수 곡선을 구할 수 있었고, VGM 모델과 비교하였다. 이때 TRIM의 실험적 근거와 역해석을 통하여 간극 연결성계수 l 을 구할 수 있었다. 역해석시 포화투수계수는 전반적인 투수계수 곡선에 핵심적인 영향을 끼치고 있다. TRIM에 의하여 포화투수계수 및 불포화 투수계수 함수를 산정하는 것이 가능하였다고 판단된다.

본 연구에서는 이론적으로는 VGM 모델만을 다루었고 다양한 모델을 적용한 연구가 후속적으로 필요하다. 포화도에 따른 투수계수에 대한 연구는 이론적인 성과뿐 아니라 실험적 검증과 관찰이 지속적으로 필요하다. 특히 실험속도가 빠르고 결과가 정확한 새로운 시험법들이 개발되고 있으며, 불포화 투수계수의 이론적인 접근법과 병행하여 비교 및 검증 연구를 통하여 불포화 토질역학의 토대를 발전시킬 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 중견과제(과제번호: 2015R1A2A2A01003933)의 연구비와 영남대학교 연구년(2017년) 지원에 의한 성과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Campbell, J. D. (1973), *Pore pressures and volume changes in unsaturated soils*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL.
2. 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.
3. Hydrus-1D, Department of environmental sciences, University of California riverside Simunek et al., 2013.
4. 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.
5. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.12, pp.593-622.
6. Peters, A. and Durner, W (2008), "A Simple Model for Describing Hydraulic Conductivity in Unsaturated Porous Media Accounting for Film and Capillary Flow", *Water Resour. Res.*, Vol.44, doi: 10.1029/2008WR007136.
7. Peters, A., Durner, W., and Wessolek, G. (2011), "Consistent Parameter Constraints for Soil Hydraulic Functions", *Adv. Water Resour.*, Vol.34, pp.1352-1365.
8. Oh, S., Kim, Y.K., and Kim, J.-W. (2015), "A Modified van Genuchten-Mualem Model of Hydraulic Conductivity in Korean Residual Soils", *Water*, 7, 5487-5502.
9. Salas, J.D., Govindaraju, R., Anderson, M., Arabi, M., Frances, F., Suarez, W., Lavado, W., and Green, T.R. Introduction to Hydrology, In *Handbook of Environmental Engineering*, Volume 15: *Modern Water Resources Engineering*, Wang, L.K., Yang, C.T., Eds.; Humana Press-Springer Science: New York, NY, USA, 2014.
10. Schaap, M.G. and Leij, F.J. (2000), "Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.64, pp.843-851.
11. Song, Y.-S., Kim, K.-S., Jeong, S.-W., and Lee, V.-O. (2014), "Estimation on Unsaturated Characteristic Curves of Tailings obtained from Waste Dump of Imgi Mine in Busan", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.3, pp.47-58 (in Korean).
12. van Genuchten, M. T. (1980) "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
13. Wayllace, A. and Lu, N. (2012), "A Transient Water Release and Imbibitions Method for Rapidly Measuring Wetting and Drying Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity Functions", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.35, No.1, pp.103-117.

Received : October 24th, 2017

Revised : March 12th, 2018

Accepted : March 13th, 2018