

불포화지반의 습윤과정 함수특성곡선 추정을 위한 간편법

A Simple Method for Estimating Wetting Path of Soil Water Characteristic Curve on Unsaturated Soils

박 현 수¹ Park, Hyun-Su
김 병 수² Kim, Byeong-Su
박 성 완³ Park, Seong-Wan

Abstract

Soil-water characteristic curve (SWCC) has been widely used to estimate the shear strength and coefficient of permeability for unsaturated soils. In general, it is divided into the drying path in which the water is discharged and the wetting path in which the water is permeated, and it has a hysteresis indicating different suctions at the same volumetric water content. In reality the field behavior of unsaturated soils is much closer to the wetting path during the infiltration. The drying path has been practically used for various analyses because obtaining the wetting path takes longer than the drying path. Although many approaches for estimating wetting path have been studied till now, these are complex and do not fit well. Therefore, a simple method for estimating wetting path based on empirical approach in this study is proposed in unsaturated soils, and a feasibility study is conducted as well.

요 지

불포화 지반의 전단강도와 투수계수 산정에 이용되는 함수특성곡선은 건조과정과 습윤과정으로 나뉘며, 동일한 체적함수비에서 다른 흡수력을 나타내는 이력현상을 보인다. 강우 침투시 불포화 지반의 현장 거동은 습윤과정에 가깝게 발생하므로 수치해석 시에 습윤과정이 적용되어야 한다. 하지만 습윤과정이 건조과정보다 습득하는 시간이 오래 걸리기 때문에 주로 건조곡선이 사용되고 있다. 이를 보완하기 위해 건조곡선으로 습윤곡선을 추정하는 방법이 연구되어 왔으나, 방법이 복잡하고 잘 맞지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 기존 자료를 바탕으로 습윤곡선 추정이 가능한 간편법을 제안하고 적용성을 검토하였다.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Hysteresis, Wetting path, Unsaturated soils

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ.)

2 정희원, 오카야마 국립대학교 조교수 (Member, Assistant Prof., Graduate School of Environment & Life Science, Okayama Univ., Japan)

3 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8021-7213, spark@dankook.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 지하수위 상부 지반은 불포화 상태로 존재하며 강우와 온도 등과 같은 환경적인 요소의 변화에 많은 영향을 받고 있다. 특히 강우는 불포화상태 지반의 포화도를 증가시키며 대기중의 증발과 지반 내의 물의 이동과 같은 현상은 지반 내의 포화도를 감소시킨다. 한편 흡수력은 흙 입자 사이에 존재하는 물의 양, 즉 메니스커스 수분(meniscus water)의 존재에 따라 크기가 달라지며 포화도가 높은 우기에는 감소하고 포화도가 낮은 건기에는 증가한다. 따라서 불포화지반에서의 포화도와 흡수력은 큰 연관성을 갖고 있다. 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 포화도와 흡수력의 관계를 나타내며 지반의 상태와 흙의 종류에 따라 다른 거동을 보인다. 함수특성곡선은 불포화 지반내의 수리/침투 및 전단 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 불포화지반의 역학·수리학적 거동 예측에 중요한 지반 공학적 인자이다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Barbour, 1998).

불포화지반의 포화도가 증가하거나 감소하는 경향에 따라 함수특성곡선의 이력현상이 나타나며 포화도가 감소하는 과정을 건조과정, 포화도가 증가하는 과정을 습윤과정이라 한다. 이로 인하여 동일한 흡수력에서 건조과정 함수특성곡선의 체적함수비가 습윤과정 함수특성곡선보다 크게 나타난다. 강우 침투 시 불포화 현장지반의 포화도가 증가하는 경향은 습윤과정을 나타낸다고 할 수 있으며, 실제 현장지반의 함수특성은 습윤과정과 유사한 경향을 보인다(Cui et al., 2008). 따라서, 침투 시 불포화지반의 거동을 추정/예측하기 위해서는 함수특성곡선의 습윤과정을 활용하는 것이 적절하다.

그러나 함수특성곡선의 습윤과정을 획득하는 것은 건조과정보다 실험적으로 오랜 시간이 소요된다. 이를 보완하기 위해 습윤과정 함수특성곡선 추정을 위한 다양한 방법들이 제안되었으며, 통계분석을 통한 추정 방법(Gupta and Larson, 1979; Saxton et al., 1986), 맞춤 변수와 고유 물성값 간의 상관관계를 이용한 추정 방법(Vereecken et al., 1989; Scheinost et al., 1997), 간극분포를 기반으로 한 추정 방법(Arya and Paris, 1981; Arya et al., 1999; Tyler and Wheatcraft, 1989), 그리고 인공신경망을 적용하여 추정하는 방법(Pachepsky et al., 1996; Koekkoek and Booltink, 1999; Johari et al., 2006)으로 구분된다. 그러나 기존의 추정 방법은 다양한 변수가 있어야 하고 활용이 현실적으로 어려운 단점이 있다. 또

한, 습윤곡선을 추정하기보다는 스캐닝 곡선(Scanning Curve)을 획득하기 위한 모델이 대부분이다.

반면 Pham et al.(2005)의 경우 건조와 습윤곡선의 관계를 통한 추정식을 제안한 바 있는데 이는 다른 방법에 비하여 습윤곡선만을 추정하는 방법이며 건조곡선을 바탕으로 한다는 점에서 지반재료의 특성을 적절하게 반영했다고 판단된다. 하지만, Pham et al.(2005)의 방법은 재료에 따라 습윤과정의 경향이 다르게 추정된다고 제안하였으나, 지반재료는 간극비에 따라 함수특성곡선의 건조와 습윤과정의 결과가 다르게 작용한다.

이에 본 연구에서는 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 습윤곡선 추정방법에 주목하였으며, 이 방법의 타당성을 살펴보았다. 타당성 검증을 위해 실험과 문헌을 통해 획득한 17개 지반재료의 함수특성곡선의 건조과정을 바탕으로 습윤과정을 추정하고, 실제 측정된 함수특성곡선의 습윤과정 결과와 비교하였다. 그리고, 지반재료의 건조곡선과 습윤곡선의 관계를 분석하고, 이 결과를 바탕으로 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 습윤곡선 추정식에서의 변수획득방법을 간편법으로 새로이 제안하였다. 끝으로, 제안된 방법의 타당성을 검토하기 위하여 함수특성 자료를 바탕으로 습윤곡선을 추정하고 이를 실제 습윤곡선과 비교 및 검증을 시행하였다.

2. 함수특성곡선

함수특성곡선은 Fig. 1과 같이 건조와 습윤과정으로 정의되며, 동일한 포화도에서 흡수력이 다르게 나타나는 이력현상이 존재한다. 이력현상은 잉크병 효과, 접촉각의 차이, 갇힌 공기로 인해 발생한다고 알려져 있다

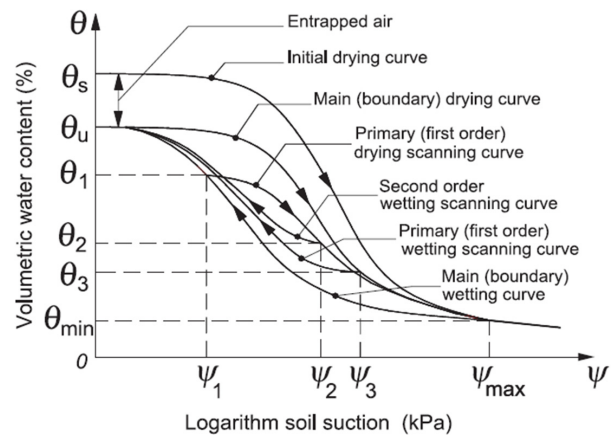


Fig. 1. Hysteresis of soil-water characteristic curves (Pham et al., 2005)

(Klausner, 1991). 이력현상에 의한 함수특성곡선은 크게 초기 건조곡선(Initial drying curve, IDC), 경계 건조곡선(Boundary drying curve, BDC), 경계 습윤곡선(Boundary wetting curve, BWC)으로 분류할 수 있다. 초기 건조곡선(IDC)은 완전 포화 상태의 시료에서 흡수력이 증가하며 물이 배출되는 과정을 나타내고, 경계 습윤곡선(BWC)은 초기 건조곡선 이후에 흡수력이 감소하면서 물이 침투되는 과정을 나타낸다. 그리고 경계 건조곡선(BDC)은 경계 습윤곡선(BWC)의 흡수력이 '0'인 지점에서 흡수력이 증가하는 과정을 나타낸다. 즉, 초기 건조곡선(IDC)이후에 경계 습윤곡선(BWC)을 획득할 수 있으며, 그 이후에 경계 건조곡선(BDC)을 획득할 수 있다. 경계 습윤곡선(BWC)의 흡수력이 '0'인 지점의 체적함수비(포화 체적함수비)는 초기 건조곡선의 흡수력이 '0'인 지점의 체적함수비(포화 체적함수비)보다 작게 존재한다. 이는 시료 내부의 갇힌 공기로 인해 포화 체적함수비(θ_s)와 흡수력이 '0'인 지점에서의 체적함수비(θ_w)의 크기가 다르게 나타난다. 초기 건조곡선(IDC)은 시료가 한번 건조되고 난 뒤에 습윤상태가 되면, 다시는 발생하지 않는 구간이라고 할 수 있다. 따라서, 실제 함수특성은 경계 건조곡선(BDC)과 경계 습윤곡선(BWC)에서 흡수력과 함수비의 변화가 발생한다고 볼 수 있으며, 이를 함수특성곡선의 주 이력 고리(Main hysteresis loop)라고 한다(Pham et al., 2005).

침투 시 현장지반의 함수특성곡선은 Fig. 2와 같이 구속압의 영향을 거의 받지 않는 0.5m의 경우, 현장 함수특성은 경계 습윤곡선에 치우쳐 발생하며, 1.0m와 1.5m의 경우, 구속압의 영향으로 인해 실내 시험에서 획득한 함수특성곡선의 경계 습윤과정보다 크게 나타난다. 따

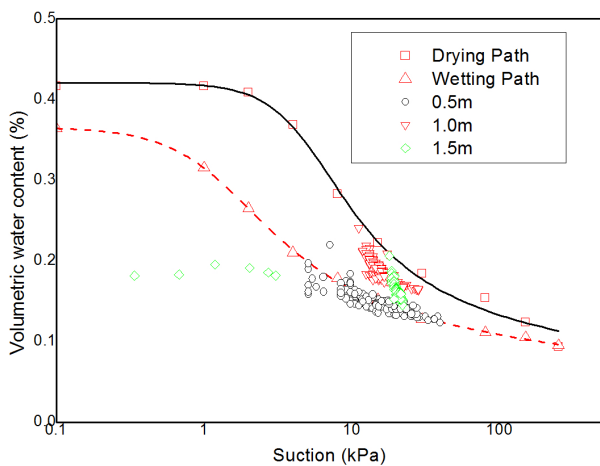


Fig. 2. Field soil-water characteristic curve (Park et al., 2017)

라서, 초기 건조과정보다는 경계 습윤과정을 통한 침투 해석이 강우 시 현장지반의 함수비 변화 및 전단강도의 변화를 좀 더 정확하게 나타낼 수 있다고 할 수 있다. 또한, 침투 과정은 지반의 함수비가 증가하는 과정이므로 습윤곡선을 사용하는 것이 수리학적 관점에서 보았을 때 타당하다.

침투 시 지반의 거동을 나타내기 위해서는 함수특성곡선의 경계 습윤과정을 활용하여야 한다. 그러나 일반적으로 함수특성곡선을 획득하기 위해서는 오랜 시간이 소요된다. 예를 들어 입도분포가 균질한 모래의 경우 초기 건조 곡선(IDC)을 획득하기 위해서 대략 15일 정도가 소요되며 경계 습윤 곡선(BWC)을 얻기까지는 약 30일 정도가 필요하다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 함수특성곡선을 추정하는 방법에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

함수특성곡선 추정방법은 다양한데 크게 4가지로 분류할 수 있다. 통계분석을 통한 추정 방법(Gupta and Larson, 1979; Saxton et al., 1986), 맞춤 변수와 고유 물성값 간의 상관관계를 이용한 추정 방법(Vereecken et al., 1989; Scheinost et al., 1997), 간극분포를 기반으로 한 추정 방법(Arya and Paris, 1981; Arya et al., 1999; Tyler and Wheatcraft, 1989), 그리고 인공신경망을 적용하여 추정하는 방법(Pachepsky et al., 1996; Koekkoek and Booltink, 1999; Johari et al., 2006)이 있다. 그러나 모델 대부분은 초기 건조 곡선과 경계 습윤 곡선, 경계 건조 곡선을 바탕으로 추정하며 초기 건조 곡선과 이력 곡선(Scanning curve)이 필요하다. 반면에 Pham et al. (2005)은 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 관계를 제시하였다. 이는 초기 건조곡선으로 경계 습윤곡선을 추정하는 방법이며, 초기 건조곡선을 사용하였다는 점에서 지반재료의 특성을 고려하였다는 장점이 있다. 하지만, 초기 건조곡선을 바탕으로 경계 습윤곡선을 제시하는 과정에서 시료의 간극비가 고려되지 않았고, 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 초기 포화체적 함수비에 대한 언급이 부족하였다.

따라서 침투 시 불포화지반의 거동을 반영할 때 습윤곡선의 적용이 합리적이거나 획득에 까다롭고 많은 시간이 소요되므로 보다 현실적으로 접근하기 위해서는 습윤곡선을 추정하는 방법이 필요하다. 특히 함수특성곡선의 전체적인 범위를 나타낼 수 있는 경계 습윤곡선의 추정방법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 습윤곡선 추정 모델

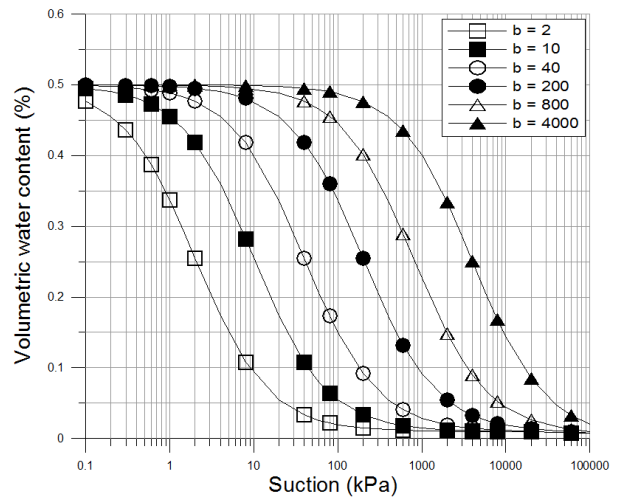
Pham et al.(2005)은 Feng and Fredlund(1999)의 식 (1)을 사용하여 초기 건조곡선으로 경계 습윤곡선을 추정하는 방법에 대하여 제안하였다. Feng and Fredlund(1999) 모델은 식 (1)과 같이 3개의 변수로 이뤄진 함수특성곡선 맞춤모델이다. Fig. 3과 같이 맞춤변수 'b' 값은 공기함입값(AEV)와 관련 있으며, 'b' 값이 증가할수록 공기함입값(AEV)가 증가하는 것을 알 수 있다. 맞춤변수 'c' 값은 잔류 체적함수비를 나타내며, 'c' 값이 감소할수록 잔류 체적함수비가 감소하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 맞춤변수 'd' 값은 불포화 함수특성곡선의 기울기와 관련 있으며, 'd' 값이 증가함에 따라 기울기가 커지는 것을 알 수 있다.

$$\theta(\psi) = \frac{\theta_s b + c\psi^d}{b + \psi^d} \quad (1)$$

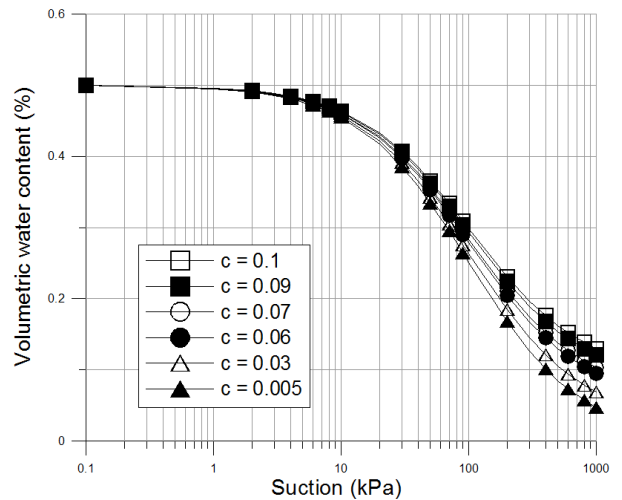
- 여기서, $\theta(\psi)$ = 흡수력에 따른 함수비
- θ_s = 포화시 함수비
- ψ = 흡수력
- b, c, d = 맞춤변수

Pham et al.(2005)은 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 맞춤변수가 식 (2), 식 (3), 그리고 식 (4)의 관계를 갖는다고 제안하였다. 또한, 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 함수력이 '0'인 지점에서의 체적함수비(포화 체적함수비)의 비가 0.9의 관계를 갖는다고 하였다. 이 관계를 바탕으로 초기 건조곡선으로 경계 습윤곡선을 추정할 수 있다고 제안하였다. Fig. 3에서 나타나는 맞춤변수에 따른 함수특성곡선의 변화와 Pham et al.(2005)이 제안한 건조와 습윤과정의 관계식을 분석하였을 때 초기 건조과정과 경계 습윤과정 사이의 네 가지 관계가 존재하는 것을 알 수 있다. 첫 번째는 초기 건조과정과 경계 습윤곡선의 잔류 체적함수비는 동일하며, 두 번째는 공기함입값(AEV)의 차이가 존재한다. 세 번째는 두 곡선의 기울기가 다르며, 마지막으로 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 함수력이 '0'인 지점에서의 체적함수비의 비가 0.9라는 것을 알 수 있다. 또한, 공기함입값(AEV)과 관련이 있는 'b' 값의 추정에 있어서 'd' 값에 대한 영향이 존재한다는 것을 볼 수 있다. 따라서,

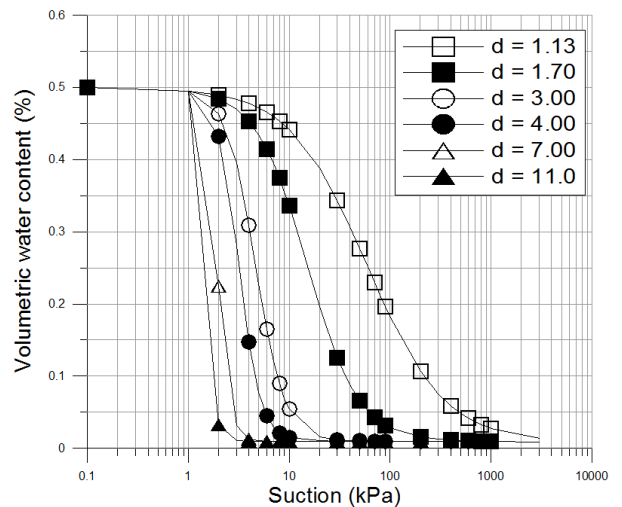
초기 건조곡선의 기울기(d_d)가 습윤곡선의 공기함입값(AEV)에 영향을 주는 것을 알 수 있다.



(a) Effect of parameter 'b'



(b) Effect of parameter 'c'



(c) Effect of parameter 'd'

Fig. 3. Effect of fitting parameters on SWCC

$$c_w = c_d \quad (2)$$

$$b_w = \left[\frac{b_d}{(10^{D_{SL}})^{d_d}} \right] \frac{1}{R_{SL}} \quad (3)$$

$$d_w = \frac{d_d}{R_{SL}} \quad (4)$$

$$D_{SL} = \log(b_d^{1/d_d}) - \log(b_w^{1/d_w}) \quad (5)$$

$$R_{SL} = \frac{d_d}{d_w} \quad (6)$$

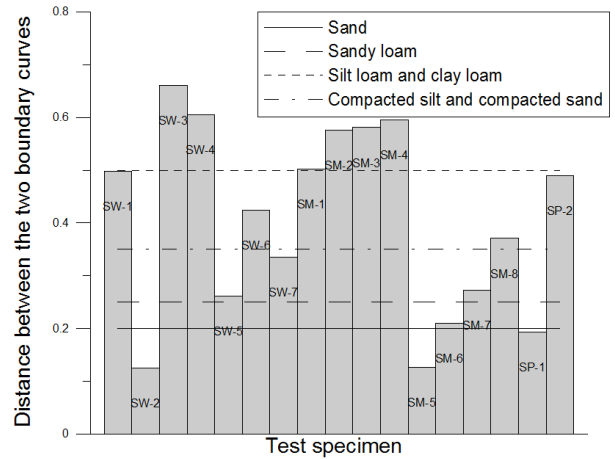
여기서, b_w , c_w , d_w = 경계 습윤곡선의 맞춤 곡선 변수
 b_d , c_d , d_d = 초기 건조곡선의 맞춤 곡선 변수
 D_{SL} = 경계 습윤곡선과 경계 건조곡선의 흡수력 차이
 R_{SL} = 경계 습윤곡선과 경계 건조곡선의 기울기 비

상기 제안한 식을 통하여 초기 건조곡선으로 경계 습윤곡선을 산정 할 수 있으며, 경계 습윤곡선과 초기 건조곡선의 추정에 사용되는 흡수력 차이를 나타내는 변수 R_{SL} 과 기울기의 비를 나타내는 변수 D_{SL} 은 Table 1의 값을 참조하여 추정할 수 있다. 이는 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 값이며, 시료에 따라 분류되었다. R_{SL} 의 값이 1보다 큰 것을 통해 경계 습윤곡선의 'b' 값이 초기 건조곡선의 'b' 값보다 작다는 것을 알 수 있다. 또한, D_{SL} 값은 1보다 작은 값을 나타내며, 이를 통하여 경계 습윤곡선의 기울기(d_w)가 초기 건조곡선의 기울기(d_d)보다 작다는 것을 알 수 있다.

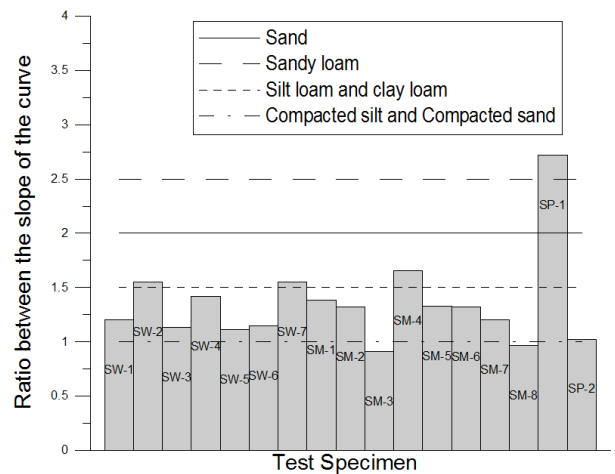
Pham et al.(2005)에 의해 제안된 식의 타당성을 확인하기 위해서 문헌과 시험을 통해 획득한 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선(SW 7개와 SM, 8개, SP 2개)에 적용

하여 타당성을 확인하였다. 검증에 사용된 시료는 Table 2와 같다. 각각의 재료에서 나타나는 함수특성곡선의 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 맞춤변수는 실제 함수특성곡선을 식 (1)에 적용하여 나타낸 맞춤 변수이다.

Pham et al.(2005)의 방법에서 경계 습윤곡선을 추정하는 데에 가장 중요한 값을 나타내는 R_{SL} 과 D_{SL} 을 식 (5)와 식 (6)을 통해 산정하여 기준에 제시된 값, Table



(a) Distance between the two boundary curves, D_{SL}



(b) Ratio between the slope of SWCCs, R_{SL}

Fig. 4. The slope ratio and distance of the soil water characteristic curves

Table 1. Suggested R_{SL} and D_{SL} between the two boundary curves for different soil types (Pham et al., 2005)

Soil type	R_{SL}		D_{SL}	
	Suggested value	Percentage deviation (%)	Suggested value	Percentage deviation (%)
Sand	2.0	22.63	0.20	16.90
Sandy loam	2.5	33.83	0.25	54.26
Silt loam and clay loam	1.5	11.89	0.50	24.81
Compacted silt and compacted sand	1.0	4.50	0.35	7.54

Table 2. Properties of sandy soils for evaluation

No.	G_s	γ_d	e	Drying path				Wetting path				References
				θ_{sd}	b_d	c_d	d_d	θ_{sw}	b_w	c_w	d_w	
SW-1	2.62	1.79	0.46	0.35	161.25	0.11	1.21	0.32	21.75	0.12	1.01	Park et al. (2014)
SW-2	2.66	1.67	0.59	0.37	77.07	0.06	1.76	0.28	11.89	0.05	1.13	Park et al. (2010)
SW-3	2.60	1.40	0.86	0.41	25.13	0.21	0.95	0.33	4.79	0.22	0.84	Ministry of Science (2015)
SW-4	2.70	1.62	0.67	0.36	240.18	0.09	1.57	0.25	10.18	0.10	1.11	Park et al. (2014)
SW-5	2.64	1.53	0.73	0.42	36.35	0.08	1.90	0.40	9.05	0.08	1.70	Song et al. (2016)
SW-6	2.60	1.45	0.80	0.51	33.21	0.34	1.39	0.43	6.50	0.33	1.21	Ministry of Science (2015)
SW-7	2.71	1.35	1.01	0.41	122.99	0.14	3.16	0.34	4.60	0.13	2.04	Gallage and Uchimura (2010)
SM-1	2.73	1.59	0.72	0.42	33.09	0.12	1.48	0.36	3.64	0.10	1.07	Song et al. (2014)
SM-2	2.72	1.22	1.23	0.53	41.95	0.21	1.82	0.43	2.71	0.19	1.38	Gallage and Uchimura (2010)
SM-3	2.72	1.35	1.02	0.48	122.35	0.22	2.15	0.43	8.29	0.22	2.36	
SM-4	2.72	1.72	0.58	0.45	141.02	0.23	1.87	0.42	4.22	0.22	1.13	
SM-5	2.75	1.22	1.25	0.44	21.73	0.09	2.31	0.35	6.11	0.08	1.74	
SM-6	2.75	1.35	1.04	0.41	93.15	0.11	2.61	0.37	11.97	0.09	1.98	
SM-7	2.75	1.50	0.83	0.35	99.19	0.12	2.38	0.31	13.13	0.11	1.97	
SM-8	2.72	1.35	1.01	0.45	47.64	0.18	1.81	0.37	10.95	0.15	1.87	
SP-1	2.62	1.41	0.86	0.45	400.54	0.27	2.14	0.36	6.39	0.26	0.79	
SP-2	2.68	1.66	0.61	0.36	18.45	0.10	1.20	0.32	4.57	0.08	1.17	Lee et al. (2003)

Note: G_s = specific gravity, γ_d = dry density (N/m³), θ_{sd} = saturated volumetric water content on initial drying path, θ_{sw} = saturated volumetric water content on boundary wetting path.

1과 비교분석을 실시하였다. 또한, 산정된 값을 Pham et al.(2005)의 제안된 식에 적용하여 경계 습윤곡선을 추정하였으며, 문헌을 통해 획득한 경계 습윤곡선의 값과 비교분석을 실시하였다.

Fig. 4는 Table 2에 제시된 시료의 D_{SL} 과 R_{SL} 을 계산한 값과 Table 1에서 제시한 값을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 나타낸 D_{SL} 의 결과를 확인하였을 때 제안된 값의 최대 값인 0.5보다 큰 값을 보이는 시료는 SW-3, SW-4, SM-2, SM-3, SM-4이다. 또한, 가장 작은 값인 0.2보다 작은 값을 보이는 시료는 SW-2와 SM-5인 것을 알 수 있다. SW계열 시료와 SM, SP 계열 시료에서 나타나는 것과 같이 시료에 따라서 D_{SL} 의 값이 분류되는 것이 아님을 볼 수 있다. 또한, Fig. 4(b)에서 나타난 R_{SL} 의 값은 SP-1

시료를 제외하고는 거의 1에 가까운 값을 갖는다. 이는 SP-1시료의 초기 건조곡선과 경계 건조곡선의 기울기의 차이가 크게 발생하였기 때문이다.

Fig. 5는 Pham et al.(2005)의 방법을 적용하였을 때의 함수특성곡선과 실제 함수특성곡선을 비교한 데이터이다. 이는 모든 시료에 대하여 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 식 (5), (6)을 적용하였으나, Fig. 4의 일반적인 시료보다 큰 차이를 보이는 시료와 가장 근접하게 나타나는 시료를 선별하여 표현하였다. Fig. 4(a)에서 SW-7의 값은 SW의 시료 중에서 다짐된 모래에 가장 근접하게 나타나며, SW-3은 가장 멀리 떨어져 있다. 또한, SM-8은 다짐된 실트의 값과 가장 근접하게 나타나며, SM-4는 가장 멀리 존재하고 있다. SP계열의 시료는 두 시료

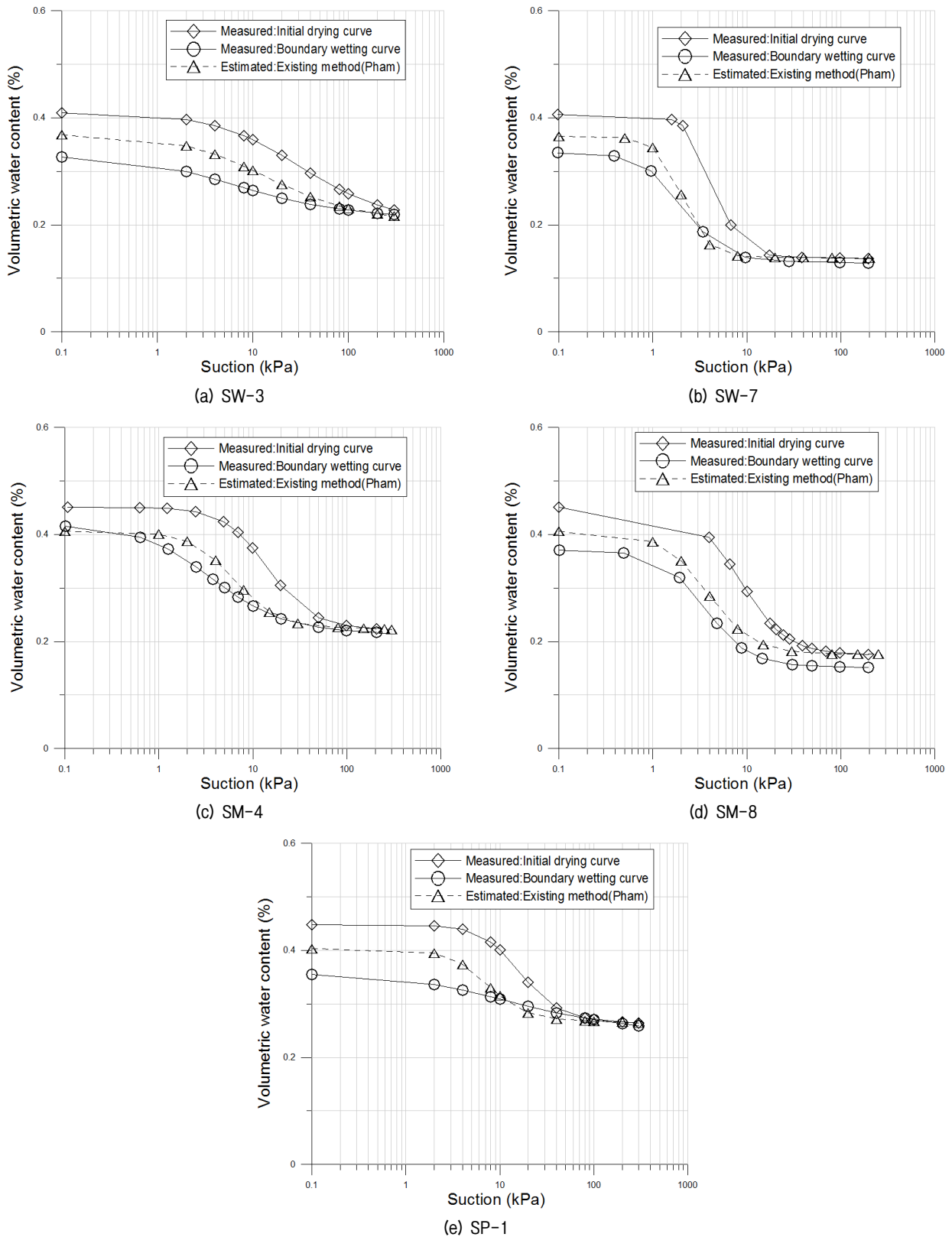


Fig. 5. Comparison of estimated and measured soil water characteristic curve

모두 다짐된 모래시료의 기준값보다 멀리 떨어져 있으며, SP-1의 경우 R_{SL} 의 값이 가장 크게 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서, SW계열의 경우 SW-3과 SW-7,

SM계열의 시료는 SM-4와 SM-8의 시료, SP계열은 SP-1 시료를 대상으로 적용성을 살펴보았다.

식 (3)과 식 (4)에 적용된 흡수력의 차이(D_{SL})와 기울

기의 비(R_{sz})는 다짐된 실트와 모래의 기준인 0.35와 1을 선택하여 적용하였다. SM-4의 적용 결과, 추정된 경계 습윤곡선의 초기 포화 체적함수비는 0.406으로 실험값, 0.419와 0.013의 차이를 나타냈다. 그러나 SW-3은 0.039, SW-7은 0.030, SM-8은 0.035, 그리고 SP-1은 0.04로 초기 체적함수비의 차이가 크게 나타났다. 이는 초기 건조 곡선과 경계 습윤곡선의 비가 0.9이기 때문에 특정시료에는 적용이 되지만, 그렇지 않은 시료도 존재하기 때문이다.

SW-3, SW-7, SM-4, SM-8의 기울기를 나타내는 'd' 값은 측정된 습윤곡선의 'd' 값과 평균적으로 0.509의 값을 나타냈으나, SP-1시료는 1.354로 상대적으로 큰 기울기의 차이를 보였다. 이는 Fig. 4(b)의 그래프에서 나타나듯이 SP-1시료를 제외한 모든 시료의 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 비가 1에 가깝기 때문이다.

Fig. 5(c)에서 SM-4는 SP-1보다 초기 포화 체적함수비와 기울기가 근접하게 추정되었으나 SM-4의 측정된 공기함입값(AEV)은 0.9이며, 추정된 공기함입값(AEV)은 2.0으로 차이가 존재하였다. 이는 Fig. 4(a)에서 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 공기함입값(AEV)의 차와 관련 있는 D_{sz} 의 값이 크기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 SM-1, SM-3에서도 동일하게 나타났다. 따라서 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 식 (2), (3), 그리고 (4)를 적용하여 추정된 경계 습윤곡선이 실제 경계 습윤곡선과 근접하게 나타나지만, 초기 포화 체적함수비, 기울기, 그리고 공기함입값(AEV)에 따라 추정값이 달라지므로 시료종류에 대하여 동일한 값을 적용하기 보다는 시료 자체의 특성이 반영되어야 한다.

4. 곡선 맞춤 변수 관계 분석 및 간편법 제안

본 논문에서는 Pham et al.(2005)에 의해 제안된 초기 식에서 초기 포화 체적함수비, 기울기, 그리고 공기함입값(AEV)에 대한 보정을 위해 과정을 검토하고 더욱 정확한 경계 습윤곡선의 추정을 위해 새로운 간편법을 제안하였다.

Table 2에서 산정된 초기 건조곡선의 맞춤변수 c_d 값과 경계 습윤곡선의 맞춤변수 c_w 값을 확인하였을 때에 두 값의 차이는 최소 0.002에서 최대 0.024만큼의 차이를 보였다. 이를 Fig. 6과 같이 그림으로 표현하였을 때, 두 값의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 'c' 값이 잔류 시 체적함수비와 관련이 큰 인자이며 함

수특성곡선의 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 잔류 체적함수비는 동일한 값을 나타내기 때문이다. 따라서 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'c' 값을 동일한 값으로 사용할 수 있다고 판단된다.

초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'c' 값을 동일한 값으로 하여 맞춤변수 'b' 값과 맞춤변수 'd' 값을 산정하였을 때, 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 관계는 Fig. 7과 같다. 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'b' 값은 상관관계를 갖고 있지 않은 것으로 보이나 'd' 값은 일정한 상관관계를 보이는 것으로 나타난다. 그러나 'd' 값의 차이가 최소 0.12 에서 최대 1.31의 값을 보이며 'd' 값의 관계보다 차이가 큰 이유는 'd' 값이 함수특성곡선의 기울기와 상관관계가 있으며 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 기울기가 완전하게 일치하지 않기 때문이다. 실제 'd' 값의 비가 가장 크게 차이가 나는 SP-1시료의 경우 오차가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 대부분의 다짐된 지반재료의 기울기가 거의 동일한 값을 보인다. 따라서 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 'd' 값을 일정하게 유지하였을 때 경계 습윤곡선의 추정이 가능하다.

Fig. 8의 (a)는 'c' 값과 'd' 값이 일정하지 않은 상태에서 산정된 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'b' 값을 비교한 것이며, (b)는 'c' 와 'd' 값이 일정한 상태에서의 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'b' 값을 비교한 것이다. 경계 습윤과정과 초기 건조과정의 'c' 값과 'd' 값이 동일하지 않을 경우에 경계 습윤과정과 초기 건조과정의 'b' 값이 큰 차이를 보인다. 그러나 동일한 'c'와 'd'

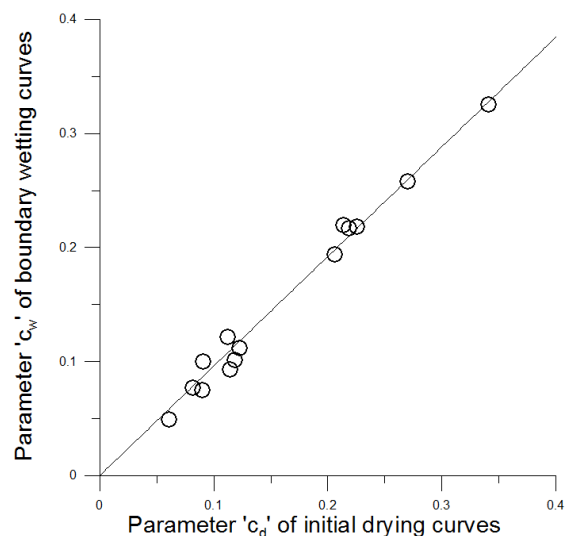
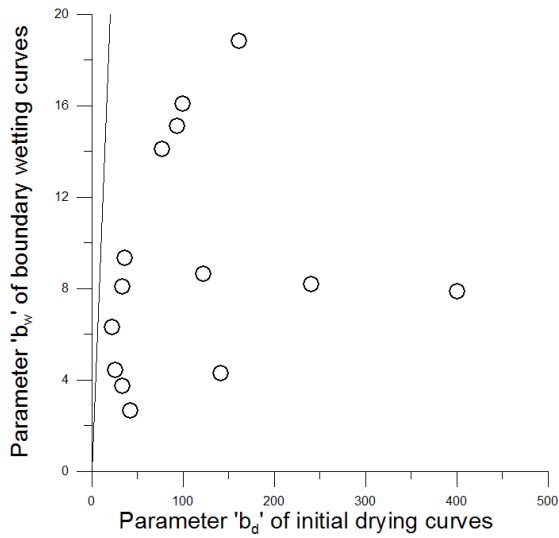
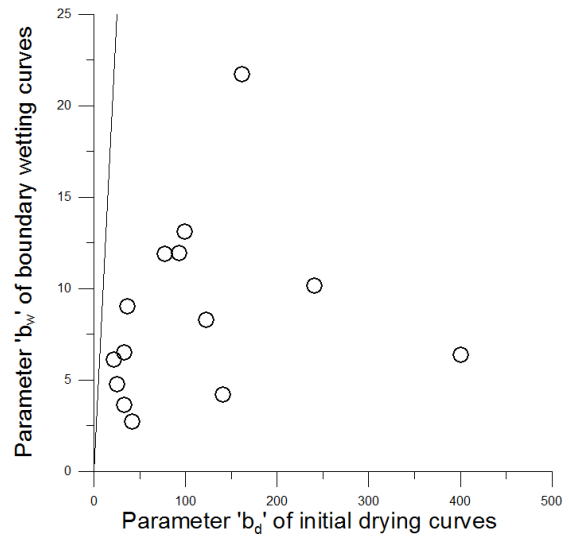


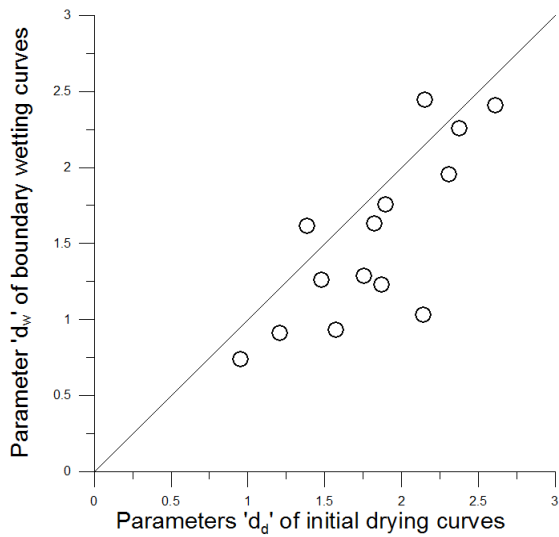
Fig. 6. Comparison of fitting parameters ' c_d ' and ' c_w '



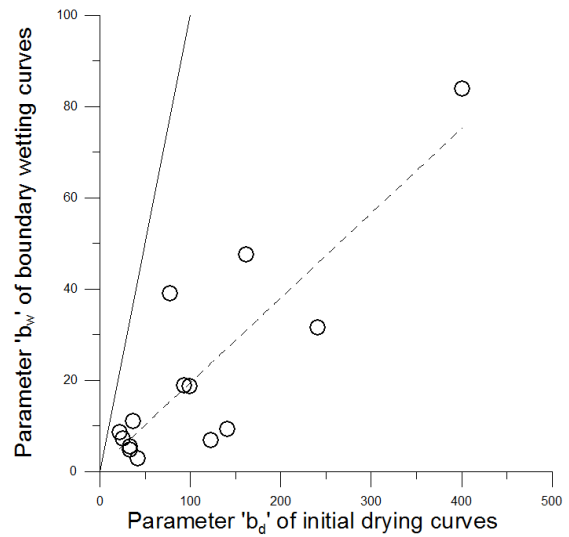
(a) ' b_d ' versus ' b_w '



(a) Relationship of parameters ' b_d ' and ' b_w ' values



(b) ' d_d ' versus ' d_w '



(b) Relationship of modified parameters ' b_d ' and ' b_w ' values

Fig. 7. Comparison of parameters ' b_d ' vs. ' b_w ' and ' d_d ' vs. ' d_w '

Fig. 8. Comparison of initial drying and boundary curve's parameters ' b_d ' and ' b_w ' values

를 사용할 경우에는 기존의 곡선보다 상대적으로 큰 연관성을 보인다. 따라서 초기 건조곡선의 ' b_d ' 값을 통해 경계 습윤곡선의 ' b_w '의 값을 추정하는 것이 가능하다.

Fig. 8(b)의 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 선형관계식은 식 (7)와 같으며, 이를 통해 초기 건조곡선으로 경계 습윤곡선을 산정할 수 있다.

$$b_w = 0.1858 \times b_d + 0.9317 \quad (R^2 = 0.735) \quad (7)$$

또한, 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 흡수력이 '0'일 때 체적함수비(포화 체적함수비)는 큰 차이를 보이는데 이는 갇힌 공기로 인해 발생한다. 일반적인 지반의 경우, 갇힌 공기에 의한 경계 습윤곡선의 초기 체적함수

비는 초기 건조곡선의 0.85에서 0.95배이며, 평균적으로 0.9배인 것으로 알려져 있다(Mualem, 1974). 그러나 초기 건조곡선의 포화 체적함수비(Saturated volumetric water contents of drying path)와 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비(Saturated volumetric water contents of wetting path)의 비가 크게 차이 나는 경우가 존재하기 때문에 모든 시료에 0.9를 적용하는 것이 불가능하다고 판단된다. Fig. 9는 본 연구에 사용된 시료의 초기 건조곡선의 포화 체적함수비와 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비를 나타낸 것이다. Fig. 9의 가장 하단에 위치한 점선은 0.7배를 나타내는 곡선이며, 실선은 1.0배의 관계를 나타내는 곡선이다. 이와 같이 0.85보다 낮은 비율을 갖는 지

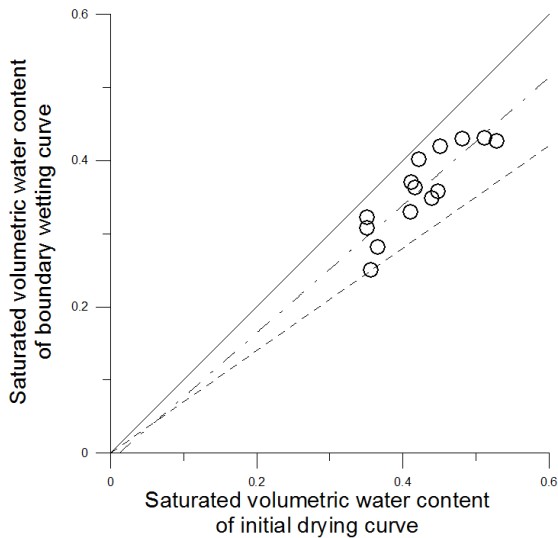


Fig. 9. Saturated volumetric water contents of drying and wetting curves

반재료가 존재하므로 이에 대한 보정이 필요하다.

Fig. 9의 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비의 선형관계식을 통해 식 (8)과 같은 식을 획득하였고 이를 통하여 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비를 획득할 수 있다.

$$\theta_{sw} = 0.873 \times \theta_{sd} - 0.0102 \quad (R^2 = 0.757) \quad (8)$$

5. 간편법을 이용한 경계 습윤곡선 추정 및 비교

Fig. 5와 동일한 시료(SW-3, SW-7, SM-4, SM-8, SP-1)에 대해서 제안된 간편법인 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 경계 습윤곡선을 추정하였고 이를 Fig. 10과 같이 실험 결과와 비교하였다. 전체적으로 기존의 식보다 측정된 경계 습윤곡선의 값에 근접하게 추정하는 것을 알 수 있다. 이는 포화 체적함수비가 보정되었기 때문이며, SW-3시료의 경우 초기 포화 체적함수비가 0.348로 기존의 식을 적용하였을 때보다 0.3정도 감소하여 실제 측정값과 근접하게 추정되었다. 그 외에도 SW-7은 0.01, SM-4는 0.03, SM-8은 0.01의 오차를 보였다. 그러나 SP-1 시료의 경우 0.03의 차이를 보이거나 기존보다 많이 감소하였다. 따라서 추정된 포화 체적함수비가 실제 값과 차이가 있지만 기존의 방법에 비해 포화 체적함수비의 값이 개선되어 경계 습윤곡선을 근접하게 추정함을 알 수 있다. 또한, 초기 건조곡선의 포화 체적함수비를 반영하여 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비를 산정하기 때문

에 재료의 간극 크기를 고려한 추정 방법이라고 할 수 있다.

반면에 SW-7시료는 포화 체적함수비는 거의 일치하지만, 공기함입값에서 오차가 여전히 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한, SP-1 시료의 경우 맞춤변수 'b'의 값이 69정도의 차이를 보인다. 그러나 SW-3과 SM-4, SM-8의 경우, 거의 근접하게 추정할 수 있으며 기존의 방법보다 오차가 감소한 것을 알 수 있다. 이는 SW-7과 SP-1 시료의 초기 건조곡선의 'b' 값의 상대적으로 크게 산정되어 차이가 크게 발생하였기 때문이다. 따라서 제안된 방법의 추가적인 보정을 위하여 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선을 획득하기 위한 시험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 불포화지반의 함수특성곡선 경계 습윤곡선을 보다 효과적으로 추정하기 위하여 Pham et al. (2005) 방법의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 주로 모래계열 재료를 대상으로 함수특성곡선의 건조과정을 바탕으로 습윤과정을 추정하고, 실제 측정된 함수특성곡선의 습윤과정 결과와 비교하였다. 또한, 습윤곡선 추정식에서의 변수획득방법을 제안하고, 실제 측정된 함수특성곡선의 습윤과정과 비교하여 제안한 추정 방법의 타당성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) Pham et al.(2005)에 의해 제안된 습윤곡선 추정식에서 제시된 맞춤변수 'b' 값은 함수특성곡선의 공기함입값의 크기와 맞춤변수 'c' 값은 잔류 체적함수비와 관련이 있으며, 맞춤변수 'd' 값은 함수특성곡선의 기울기와 관련이 있는 것으로 나타났다. 또한, 초기 건조곡선의 'c' 값과 경계 습윤곡선의 'c' 값은 동일한 값을 가지며, 초기 건조곡선과 경계 습윤곡선의 'd' 값을 동일한 값으로 'b' 값을 추정하였을 때, 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 'b' 값은 일정한 상관관계가 있음을 확인하였다.
- (2) 함수특성곡선의 초기 건조과정과 경계 습윤과정의 초기 포화 체적함수비는 초기 건조곡선의 포화 체적함수비가 증가함에 따라 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비가 증가하는 선형적인 관계를 보였다. 따라서 건조곡선의 초기 포화 체적함수비를 바탕으

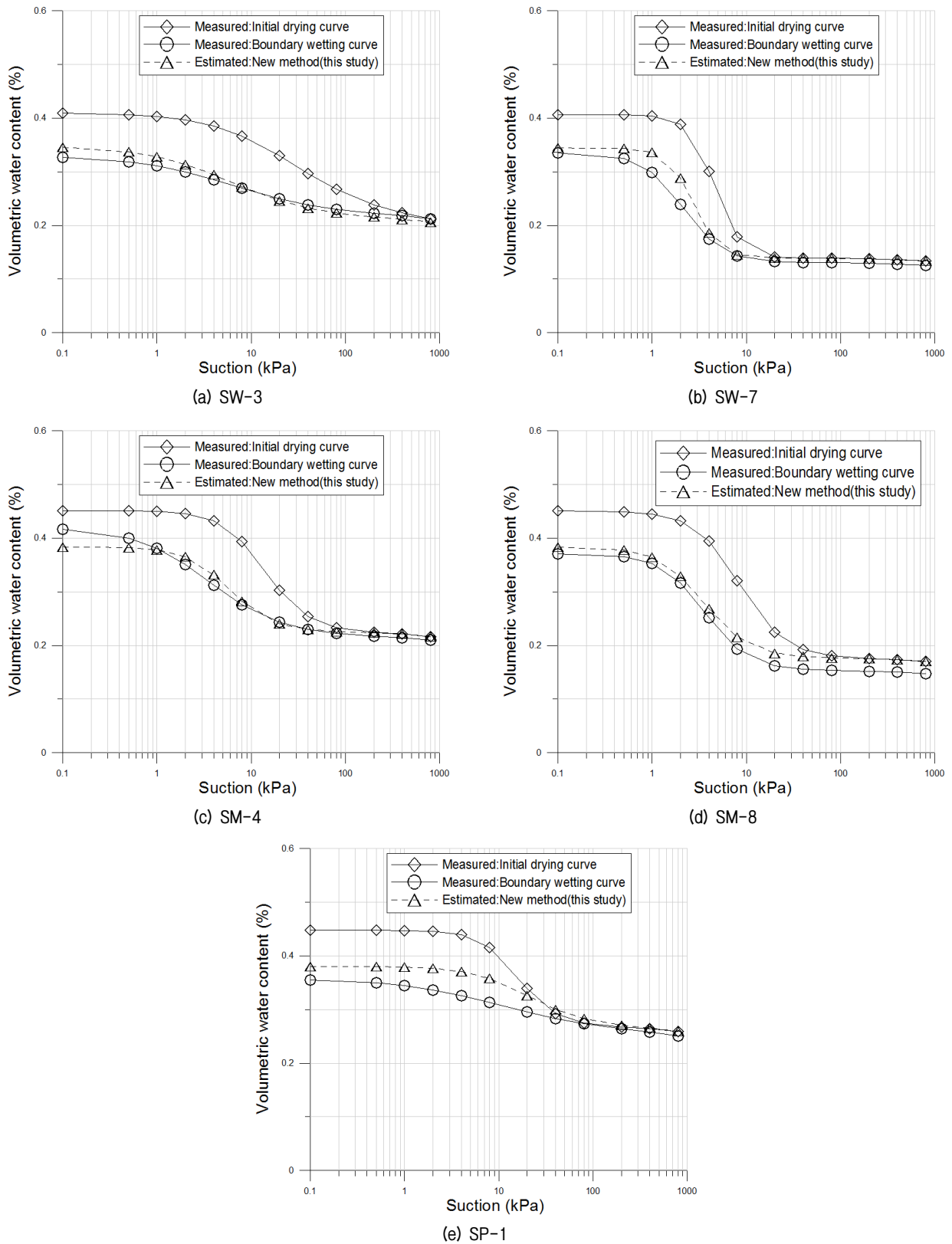


Fig. 10. Comparison of measured and estimated wetting paths

로 경계 습윤곡선의 포화 체적함수비 추정이 가능하였다.

(3) Pham et al.(2005)의 습윤곡선 추정식에서의 맞춤

곡선 변수에 대해 본 연구에서 새로이 제안된 간편법을 적용한 결과, 추정된 함수특성곡선의 경계 습윤과정 결과가 기존의 방법보다 더 개선된 결과를

보였다. 따라서, 본 연구에서 새로이 제안한 간편법을 적용한다면, 불포화지반의 함수특성곡선의 보정 및 경계 값을 더욱 빠르고 효율적으로 획득할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년 한국연구재단의 국제협력사업의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2013K2A2A4003406).

참고문헌 (References)

- Arya, L.M. and Paris, J.F. (1981), "A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-size Distribution and Bulk Density Data", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, No.6, pp.1023-1030.
- Arya, L.M., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., and Shouse, P.J. (1999), "Scaling Parameter to Predict the Soil Water Characteristic from Particle-size Distribution Data", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.63, No.3, pp.510-519.
- Barbour, S.L. (1998), "Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: the Soil-water Characteristic Curve: A Historical Perspective", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.5, pp.873-894.
- Cui, Y.J., Tang, A.M., Mantho, A.M., and De Laure, E. (2008), "Monitoring Field Soil Suction Using a Miniature Tensiometer", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.31, No.1, pp.95-100.
- Feng, M. and Fredlund, D.G. (1999), "Hysteretic Influence Associated with Thermal Conductivity Sensor Measurements", In Proceedings from Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics in Association with the 52nd Canadian Geotechnical Conference and the Unsaturated Soil Group, Regina, Sask., 23-24 October 1999, pp.14:2:14-14:2:20.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), "An Overview of Unsaturated Soil Behavior", *Proceeding of the 1993 ASCE Convention on Unsaturated Soils*, Dallas, Texas, pp. 1-31.
- Gallage, C.P.K. and Uchimura, T. (2010), "Effects of Dry Density and Grain Size Distribution on Soil-water Characteristic Curves of Sandy Soils", *Soil Foundations*, Vol.50, No.1, pp.161-172.
- Gupta, S.C. and Larson, W.E. (1979), "Estimating Soil Water Retention Characteristics from Particle Size Distribution, Organic Matter Percent, and Bulk Density", *Water Resources Research*, Vol.15, No.6, pp.1633-1635.
- Johari, A., Habibagahi, G., and Ghahramani, A. (2006), "Prediction of Soil-water Characteristic Curve Using Genetic Programming", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No.5, pp.661-665.
- Klausner, Y. (1991), "Fundamentals of Continuum Mechanics of Soils", Springer-Verlag, New York.
- Koekkoek, E.J.W. and Booltink, H. (1999), "Neural Network Models to Predict Soil Water Retention", *European Journal of Soil Science*, Vol.50, No.3, pp.489-495.
- Lee, I. M., Cho, W. S., Kim, Y. U., and Sung, S. G. (2003), "In-situ Monitoring of Matric Suctions in a Weathered Soil Slope", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.1, pp.41-49 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Science, ICT and Future Planning of Korea (2015), "Establishing D/B on Retention Characteristics and Stress State of Soil Slopes during Extreme Rainfall" (in Korean).
- Mualem, Y. (1974), "A Conceptual Model of Hysteresis", *Water Resources Research*, Vol.10, No.3, pp.514-520.
- Pachepsky, Ya. A., Timlin, D., and Varallyay, G. (1996), "Artificial Neural Network to Estimate Soil Water Retention from Easily Measurable Data", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.60, No.3, pp.727-733.
- Park, S.W., Kang, B.S., Song, P.H., Kim, H.K., and Kim, J.S. (2014), "Development of a Design Criteria on Slope Drainage of Highway Considering Weather Conditions", Technical Report, Korea Highway Corp., Korea (in Korean).
- Park, S.W., Park, J.Y., Tae, D.H., and Sim, Y.J. (2010), "Effects of Overburden Pressure and Clay Content on Water Retention Characteristics of Unsaturated Weathered Soils", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.30, No.1, pp.53-63 (in Korean with English abstract).
- Park, H.S., Song, Y.S., and Park, S.W. (2017), "Predicted Hydraulic Behavior in In-Situ Soil Slope Using the Path-Dependent Soil Water Characteristic Curve", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.4, pp.25-34 (in Korean with English abstract).
- Pham, Q.H., Fredlund, D.G., and Barbour, S.L. (2005), "A Study of Hysteresis Models for Soil-water Characteristic Curves", *Canadian Geotechnical of Journal*, Vol.42, No.6, pp.1548-1568.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986), "Estimating Generalized Soil Water Characteristics from Texture", *Soil Science of America Journal*, Vol.50, No.4, pp. 1031-1036.
- Scheinost, A.C., Sinowski, W., and Auerswald, K. (1997), "Reginalization of Soil Water Retention Curves in a Highly Variable Soilscape, I. Developing a New Pedotransfer Function", *Geoderma*, Vol.78, No.3, pp.129-143.
- Song, Y.S., Chae, B.G., and Lee, J.T. (2016), "A Method for Evaluating the Slope Stability of an Unsaturated Slope in Natural Terrain during Rainfall", *Engineering Geology*, Vol.210, pp.84-92.
- Song, Y.S., Kim, K.S., Jeong, S.W., and Lee, C.O. (2014), "Estimation on Unsaturated Characteristics Curves of Tailings Obtained from Waste Dump of Imgi Mine in Busan", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.3, pp.47-58 (in Korean with English abstract).
- Tyler, S.W. and Wheatcraft, S.W. (1989), "Application of Fractal Mathematics to Soil Water Retention Estimation", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.53, No.4, pp.987-996.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., and Darius, P. (1989), "Estimating the Soil Moisture Retention Characteristic from Texture, Bulk Density, and Carbon Content", *Soil Science*, Vol.148, No.6, pp.389-403.

Received : May 19th, 2017

Revised : June 9th, 2017

Accepted : June 14th, 2017