

Relative Sensitivity Analysis of the Soil Water Characteristics Curve

Ki-Cheol Eom*

Sejong Institute of Data Analysis (SEIDA), Suwon 16229, Korea

(Received: September 2 2015, Revised: November 4 2015, Accepted: December 20 2015)

This study was conducted to develop the SWCC estimation equation using scaling technique, and to investigate relative sensitivity of the SWCC according to the soil water tension, for the four kinds of soil texture such as Sand [S], Sandy Loam [SL], Loam [L] and Clay Loam [CL]. The SWCC estimation equation of scale factor [Θ_{sc}] (Eq. 1) was developed based on the log function (Eq. 2) and exponential function (Eq. 3).

$$\Theta_{sc} = [(\Theta - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)] \quad (\text{Eq. 1})$$

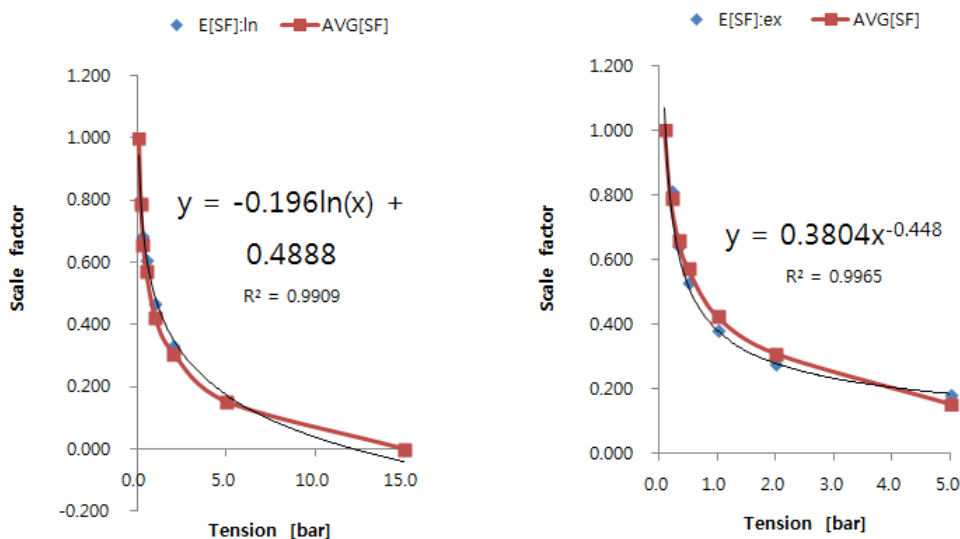
$$\Theta_{sc} = -0.196 \ln(H) + 0.4888 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\Theta_{sc} = 0.3804 (H)^{-0.448} \quad (\text{Eq. 3})$$

where, Θ : water content (g/g %), Θ_s : water content at 0.1bar, Θ_r : water content at 15bar, H: soil water tension (matric potential) (bar)

Relative sensitivity of soil water content was decreased as increase soil water tension, those according to soil water tension were 0.952~0.620 compared to 0.1bar case. Relative sensitivity of scale factor was also decreased as increase soil water tension, those according to soil water tension were 0.890~0.577 compared to 0.2bar case.

Key words: Soil Water Characteristics Curve (SWCC), Relative sensitivity, Scale factor



The measured and estimated value for the scaled SWCC using log function [Left] and exponential function [Right].

*Corresponding author: Phone: +821088568765, E-mail: kceom6578@hanmail.net

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009870)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

토양 물리 분야 연구에 있어, 토양수분 장력과 토양수분 함량의 관계를 나타내는 곡선인 토양수분 특성 곡선 (SWCC: Soil Water Characteristics Curve)은 불포화 토양 특성 구명을 위한 가장 기본적이고 중요한 요인이며(Satyamaga et al., 2013; Zhai and Rahardjo, 2012), 토양수분 공급 특성 구명에 중요한 요인이다 (Shao et al., 2009). 또한 SWCC는 포화수리전도도 (K_s : Saturated hydraulic conductivity)와 함께 불포화 토양의 수리학적 특성을 결정짓는 요인이지만 불포화 토양에 대한 토양물리학적 모델의 결정적인 입력 factor 결정이나 SWCC측정에는 오랜 시간과 노력이 소요된다 (Chiu et al., 2012; Ghanbarian et al., 2015).

따라서 토양물리 분야에서는 오래전부터 최근까지 SWCC 특성에 대한 연구가 많이 수행되어 SWCC가 장력이 높은 범위에서 토양수분 함량의 영향이 크고 (Liu et al., 2012), 석회 시용에 따라 SWCC의 보수력이 증가하며 (Aldood et al., 2014), 유기물 시용에 따라 SWCC가 장력이 낮은 범위에서 수분 함량이 증가하고 (Mollinedo et al., 2015), Bentonite가 주광물인 토양에서 열전도도는 SWCC의 장력과는 직선적인 상관관계를 보였으나 SWCC의 토양 용적수분함량과는 포물선의 상관관계를 보였다는 연구결과 (Kim et al., 2015) 등이 있다. 특히 토양의 불포화 수리전도도 (K_u : Unsaturated hydraulic conductivity)의 간접적인 측정방법에 가장 많이 사용되는 방법은 SWCC와 K_s 에 근거하여 유도되는 불포화 투수함수 (P_u : Unsaturated permeability function)를 추정하는 방법이며, 이때 P_u 는 SWCC의 장력 단계에 따라 크게 영향을 받는다 (Rahimi, 2015)고 알려져 있다.

이와 함께 SWCC의 모델에 관한 연구도 많이 이루어져 왔는데, 그중에서 특히 Brooks and Corey (1964), van Genuchten (1980), Ahuja et al. (1985), Fredlund and Xing (1994), Kosugi (1996), Pedroso et al. (2009) 등이 개발한 모델들이 아직까지 많이 인용되고 있으며, 특히 Fredlund and Xing 모델이 다른 모델보다 정확성이 높다는 연구결과 (Leong and Rahardjo, 1997)에 근거하여 이 모델의 오차에 대한 정량화 분석 연구결과도 있다 (Zhai and Rahardjo, 2013). 이외에도 Campbell model (1974), Hutson - Cass function (1987) 및 Cresswell and Paydar (1996)이 제시한 "Two-Point method"은 북방 아한대 토양의 SWCC (Cresswell and Lilly, 2015)등에 인용되고 있다. 뿐만 아니라, 토양 sample의 dimension (직경과 높이)이 SWCC 추정에 영향을 준다는 연구결과도 있다 (Ghanbarian et al., 2015).

또한 SWCC모델 연구에서 필연적으로 이용되고 있는 방법은 scale technique으로, 이미 조사된 변수를 이용한 변환 변량 (SF: Scale factor)을 구하여 원래의 현상을 구명하는 방법이며(Miller and Miller, 1955; Hiller and Erick, 1990),

토양수분전도 특성의 추정은 여러 가지 수학적 모형에 의한 것 보다 SF에 의한 추정치가 실측치에 근접하며(Reichardt et al., 1972 and 1975; Patricia and Nielsen, 1984), 일중 온도 변화 양상 구명에도 이 scaling technique이 이용(Eom and Eom, 2013)되기도 하지만 현재까지 SWCC 측정 및 추정에 있어 토성별 장력 단계별 상대정밀도 분석에 관한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 토성별 SWCC data (Eom et al., 1995)을 대상으로 scaling technique을 이용한 재해석을 통하여 SWCC에 적합한 scale factor에 대한 평가와 함께 토성별 및 장력단계별 상대정밀도 (Relative sensitivity)를 계량화하여 분석하였으며, 이 결과에 따라 토성별 및 장력단계별로 동일한 수준의 오차를 갖기 위해 필요한 상대 반복수를 구명하였다.

Materials and Methods

재료 및 방법 본 연구는 1993년 1월부터 1994년 12월 까지 2 년간 농촌진흥청 국립농업과학원 실험실에서, 사토 [S], 양질사토 [LS], 사양토 [SL], 양토 [L], 사질식양토 [SCL], 미사질양토 [SiL], 식양토 [CL], 미사질식양토 [SiCL], 미사질식토 [SiC] 및 식토 [C] 등 10개 토성의 총 134점 토양에 대하여 pressure plate를 이용하여 0.01 MPa [0.1 bar], 0.02 MPa [0.2 bar], 1/30 MPa [0.33 bar], 0.1 MPa [1.0 bar], 0.3MPa [3.0 bar], 0.5 MPa [5.0 bar] 및 1.5 MPa [15.0 bar]의 압력단계를 두어 SWCC (Soil Water Characteristic Curve)를 구한 후, 일부 연구 결과를 발표한 논문 (Eom et al., 1995)의 Data 중 사토 [S] 5점, 사양토 [SL] 36점, 양토 [L] 33점 및 식양토 [CL] 10점 등 4개 토성 총 84점의 토양 분석 raw data에 대하여 data 재해석을 실시하였다.

연구사 본 연구에서 검토된 주요 SWCC 모델 및 scale factor [SF]는 다음과 같다

- (1) Eom et al.(1995), Cheng et al. (2013), Pirone et al. (2014), Malamos et al. (2015)

$$H = a [(\Theta_{sc})^b], [SF] \Theta_{sc} = [(\Theta - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)] \quad (\text{Eq. 1})$$

- (2) Zhang et al. (2014)

$$S_r = -a \log(H) + b, [SF] \Theta_{sc} = [(S_r - S_{ro}) / (S_{rmax} - S_{ro})] \quad (\text{Eq. 2})$$

- (3) Al-Badran & Schanz (2014)

$$\log(S_r) = -a \log(H) + b \quad (\text{Eq. 3})$$

단, H: 토양수분 장력 [bar], Θ_{sc} : scale factor, Θ : 토양수분 함량, Θ_w : residual suction, value (15bar) 때의 Θ , Θ_s : air-entry (0.1 bar) 때의 Θ , Sr: 포화도, Sro: 초기 포화도, Sramx: 최대포화도, a & b: 계수임.

(4) Tyler & Wheatcraft model (1990)

$$\Theta(H) = \Theta_s [(H / H_{max})^{(Df-3)}], \text{ [SF] } \log(\Theta_{sc}) = \log(\Theta / \Theta_s) \quad (\text{Eq. 4})$$

(5) Rieu & Sposito, model (1991)

$$\Theta(H) = \Theta_s - 1 + [(H / H_{max})^{(Df-3)}], \text{ [SF] } \log(\Theta_{sc}) = \log(\Theta + 1 - \Theta_s) \quad (\text{Eq. 5})$$

(6) Bird et al. model (2000, 2003)

$$\Theta = \text{function} [\Theta_s, p, s, H, H_{max}, Df] \quad (\text{Eq. 6})$$

(7) Wang et al. model (2005)

$$A = [p / (p + s)]$$

therefore, $\Theta(H) = \text{function} [\Theta_s, A, H, H_{max}, Df]$
(Veltri et al., 2013)

$$\text{[SF] } \log(\Theta_{sc}) = \log[(\Theta + A - \Theta_s) / A] \quad (\text{Eq. 7})$$

단, $\Theta(H)$: water content at H tension, Θ_s : saturated water content, p: pore fraction, s: solid phase fraction, H: hydraulic head, Hmax: air-entry value, Df: fractal dimension, Θ_{sc} : scale factor of $\Theta(H)$

(8) Sun et al. (2014)

$$H = [(R T D_w / W) \ln(1/RH)] \quad (\text{Eq. 8})$$

단, H: soil suction (KPa), R: the molar gas constant [8,314462 J/(mol K)], T: the absolute temperature (K), W: the molecular mass of water vapour [18,016 g/mol], D_w: the mass density of water (kg/m³), RH: relative humidity 임.

또한, 본 연구에서의 SWCC 추정 식 및 이에 사용된 SF (Θ_{sci})는 Eq. 9와 같다.

$$\text{SWCC: } \Theta_{sc} = A \cdot \ln(H) + B \text{ 및 } \Theta_{sc} = a \cdot (H)^{(-b)}$$

$$\text{[SF] } \Theta_{sc1} = [(\Theta - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)]$$

$$\text{[SF] } \Theta_{sc2} = (\Theta / \Theta_s)$$

$$\text{[SF] } \Theta_{sc3} = \log(\Theta / \Theta_s) \quad (\text{Eq. 9})$$

본 연구에서 각 토성의 평균값을 이용한 장력단계 별 비

교를 위한 SF는 Eq. 9의 3가지 SF에 대하여 분석하였고, 각 토성에서 장력단계 별 비교를 위한 SF는 Eq. 9의 [SF] Θ_{sc1} 에 대하여 분석하였으며, 분석의 편의상 장력의 단위는 [KPa] 대신 [bar]를 사용하였다.

상대정밀도의 이론적 배경 본 연구에서 SWCC의 장력 단계 별 상대정밀도 [RS] 분석의 이론적 배경은 다음과 같다.

M 단계의 N 단계에 대한 상대정밀도 [RS (M/N)]는 다음과 같이 정의 된다 (Mandel, 1964; Eom and Eom, 2008).

$$\text{RS (M/N)} = [S(Q_m) / S(Q_n)] = [ABS(dM / dN) / (S_m / S_n)] \quad (\text{Eq. 10})$$

단, S(Q_m): M 단계의 Θ 추정치에 대한 표준오차, S(Q_n): N 단계의 Θ 추정치에 대한 표준오차, S_m: M 단계의 Θ 측정치에 대한 표준편차, S_n: N 단계의 Θ 측정치에 대한 표준편차, ABS: 절대치를 뜻 함.

여기서, 변량 M과 변량 N의 측정치를 M과 N으로, M의 scale factor를 각각 M_c로 나타낼 때, M_c = f(M) 이라 하면,

$$[dM_c / dN] = f'(M) \cdot (dM/dN), S_{m_c} = [f'(M)] \cdot S_m$$

$$\begin{aligned} \text{따라서, RS (M_c / N)} &= [ABS(dM_c / dN) / (S_{m_c} / S_n)] \\ &= ABS([f'(M) \cdot (dM / dN)] / [f'(M) \cdot (S_m / S_n)]) \\ &= ABS[(dM / dN) / (S_m / S_n)] \\ &= \text{RS (M / N)} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

즉, Eq. 11의 결과에서 알 수 있듯이 RS는 원 변량에 대한 것과 변환 변량인 scale factor에 대한 RS는 같으므로 RS는 변환 변량의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

한편, M 단계의 N 단계에 대한 상대정밀도를 각 단계의 CV (Coefficient of Variance)값을 기준으로 비교하는 경우 [CV (M/N)]를 생각해 보면, M 단계와 N 단계에 대한 CV를 각각 CV_m, CV_n 이라 할 때,

$$\begin{aligned} \text{RS (M/N)} &= [ABS(dM / dN) / (S_m / S_n)] \\ &= ABS[(M / N) / (S_m / S_n)] \cdot ABS[(dM / dN) / (M / N)] \\ &= (CV_n / CV_m) \cdot ABS[(dM / dN) / (M / N)] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 12})$$

즉, RS (M/N)과 CV (M/N)이 같아지는 경우는 ABS[(dM / dN) / (M / N)] = 1인 경우이다.

이는 ABS(dM / M) = ABS(dN / N) 인 경우이며, 이 경

우는 $M = k N$ 또는 $M = (k / N)$ 인 경우이다.

만약, $M = B + k N$ 인 경우, RS (M / N) 과 CV (M / N) 은 각각 Eq. 12 및 Eq. 13과 같이 된다.

$$RS (M / N) = ABS (k) / (Sm / Sn) \quad (Eq. 13)$$

$$CV (M / N) = ABS [(k + (B / N))] / (Sm / Sn) \quad (Eq. 14)$$

Eq. (14)의 결과에서 알 수 있듯이 변환 변량인 scale factor에 대한 CV는 절편 (B)의 영향을 받으므로, CV에 의한 상대정밀도는 변환 변량의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 SWCC의 장력 단계별 상대정밀도 분석은 Eq. 10에 의하여 분석하였다.

토양수분 함량에 대한 상기 Eq. 10의 (dM / dN)을 구하는 과정은, 토양수분 장력 0.1 bar부터 15 bar까지의 장력 단계 별 모든 조합에 대하여, 각 장력 단계 별 토양수분 함량과 대응 관계의 토양수분 장력의 토양수분 함량 간 1차 회귀 분석을 하여 1% 유의수준에서 유의성이 인정되며 그 상관계수가 가장 높은 조합을 선정하여, 그 1차 회귀 식의 기울기를 (dM / dN)의 값으로 적용하였다.

또한, scale factor를 이용한 경우의 SWCC에 대한 상대정밀도 분석을 위한 상기 Eq. 10의 (dM / dN)을 구하는 과정은, 토양수분 장력 0.2 bar부터 5.0 bar까지의 장력 단계 별 모든 조합에 대하여, 각 장력 단계 별 scale factor와 대응 관계의 토양수분 장력의 scale factor간 1차 회귀 분석을 하여 1% 유의수준에서 유의성이 인정되며 그 상관계수가 가장 높은 조합을 선정하여, 그 1차 회귀 식의 기울기를 (dM / dN)의 값으로 적용하였다.

Eq. 10의 (Sm / Sn) 항은 각 장력단계 별 반복치 간의 표준편차 값으로 산정하였다.

또한 상대정밀도가 다른 경우 같은 정밀도를 얻기 위한 상대적 반복수(Rr)는 Eq. 15에 의해 산정하였다 (Mandel, 1964; Eom et al, 1988).

$$Rr = [1 / (RS)^2] \quad (Eq. 15)$$

본 연구에서 사용된 토양수분 함량은 건조중량에 의한 (중량 %)의 단위로 나타내는 수분 함량을 뜻한다.

Results and Discussion

토양수분 특성 곡선 (SWCC: Soil Water Characteristics Curve: Fig. 1)에 대하여 scaling technique을 이용하여 토성에 상관없이 SWCC를 추정하기 위한 토양수분 함량에 대한 3 종류의 scale factor [SF: Θ_{sc} : Fig. 2] 즉, $\Theta_{sc1} = [(\Theta -$

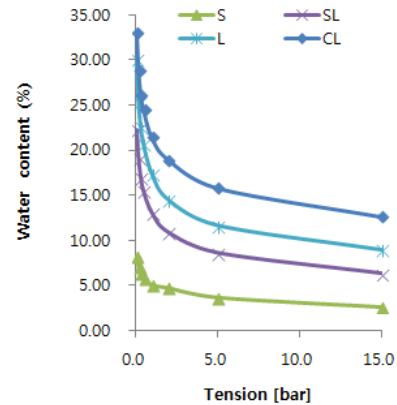


Fig. 1. Soil water characteristic curve (SWCC) for the four kinds of texture.

$\Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)$, $\Theta_{sc2} = [\Theta / \Theta_s]$ 및 $\Theta_{sc3} = \log ([\Theta / \Theta_s])$ 의 장력단계 별 토성 간 CV의 평균값은 각각 5.25%, 5.92% 및 -10.04%이었으며, 본 연구에서는 scale factor [Θ_{sc}] 를 Θ_{sc1} 즉, Eq. 16과 같이 선정하여 연구를 실시하였다.

$$\Theta_{sc} = [(\Theta - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)] \quad (Eq. 16)$$

단, Θ_{sc} : scale factor, Θ : 토양수분 함량, Θ_r : 15bar 때의 Θ , Θ_s : 0.1 bar 때의 Θ 임.

토성별 토양수분 함량에 대한 SWCC와 scale factor에 대한 SWCC의 Log 함수 및 Exponential 함수에 관한 상관식을 구한 결과는 Fig. 3과 같으며, 토양수분함량 및 scale factor는 공히 4가지 토성에서 모두 토양수분 장력과 통계적으로 고도의 유의성이 있는 [$R^2 > 0.9$ **] Log 함수 및 Exponential의 상관관계를 보였다. 또한, 토양수분 함량에 대한 SWCC는 토성에 따라 차이가 크게 나타나지만, Eq. 16에 의해 산출 되는 토양수분 함량의 scale factor에 대한 SWCC는 토성에 따라 큰 차이 없이 하나의 추정 곡선으로 수렴되고 있음을 알 수 있다.

토성 별 scale factor의 SWCC에서 Log 함수 및 Exponential 함수의 토성 별 계수를 평균한 값을 대푯값으로 삼아, 토양수분 장력 (단위: bar)에 따른 토양수분 함량(중량 %)을 추정하기 위한 scale factor (Θ_{sc})의 SWCC 추정식은 Eq. 17의 Log 함수 및 Eq. 18의 Exponential 함수로 나타낼 수 있으며 (Fig. 4), 이들 식에 의해 추정된 토양수분 함량의 scale factor와 그 실측치와의 편차의 평균값은 각각 0.018 및 0.023 으로서 Eq. 17이 Eq. 18에 비하여 실측치와 보다 더 잘 일치하였다.

$$\Theta_{sc} = -0.196 \ln(H) + 0.4888 \quad (Eq. 17)$$

$$\Theta_{sc} = 0.3804 (H)^{(-0.448)} \quad (Eq. 18)$$

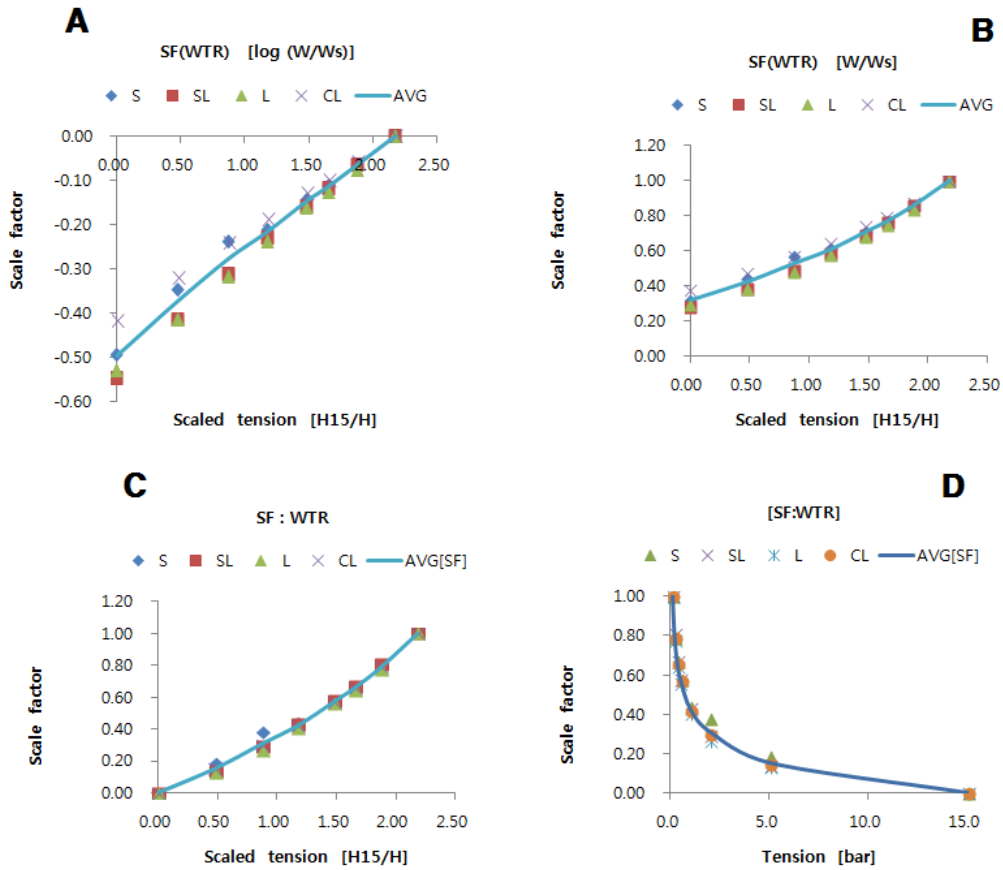


Fig. 2. Scaled SWCC based on the three kinds of scale factor (A, B, C = D) for the four kinds of texture.

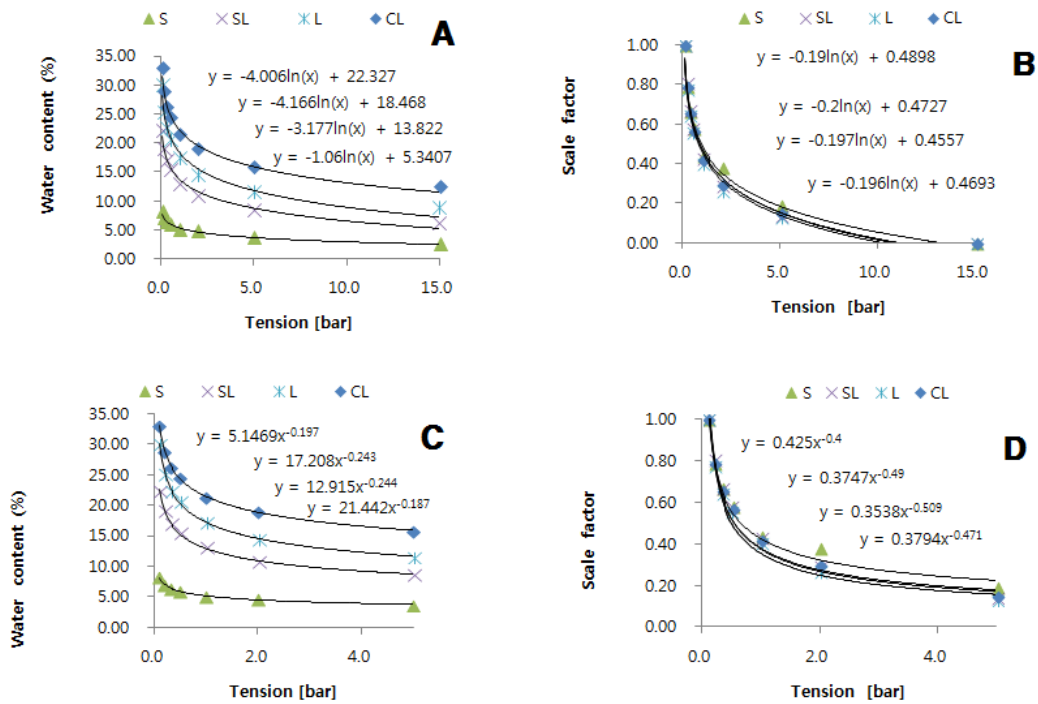


Fig. 3. SWCC as a log function for the water content [A] and scale factor [B] and a exponential function for the water content [C] and scale factor [D].

이와 같은 결과를 선행연구인 Eom et al, (1995)의 연구와 비교하여 볼 때 SWCC 추정 모형 설정에 있어, 선행연구

는 Exponential 함수를 이용하였고 본 연구는 Log 함수 및 Exponential 함수를 이용한 SWCC 추정 모형간의 차이를 분

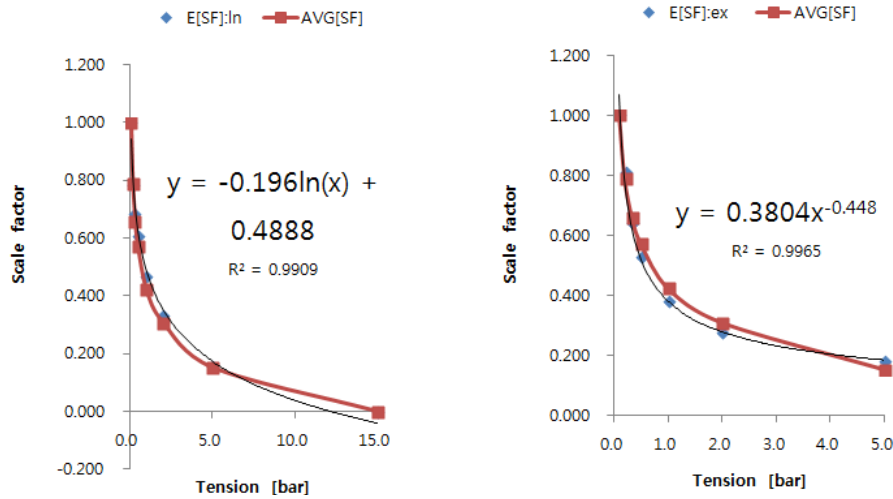


Fig. 4. The measured and estimated value for the scaled SWCC using log function [Left] and exponential function [Right].

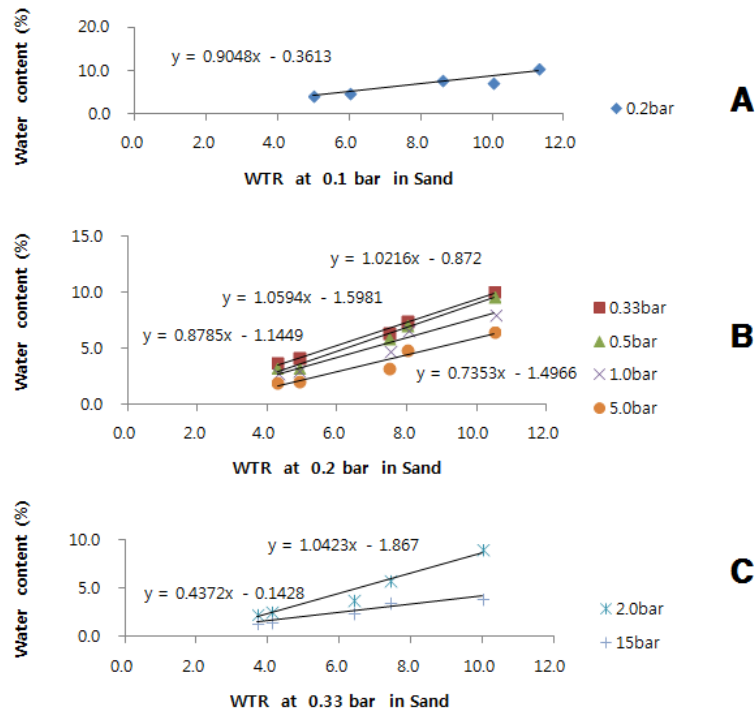


Fig. 5. Relationship between the water content at each soil water tension and the water content at 0.1 bar [A], 0.2 bar [B], 0.33bar [C] in Sand.

석하였다는 것이 그 차별성이라고 판단된다.

토양수분 장력 단계별 상대정밀도 분석을 위하여, 상기 Eq. 10의 (dM / dN)을 구하고자 토성 별 토양수분 함량 및 scale factor의 각 장력 단계 별 토양수분 함량 및 scale factor와 대응 관계 토양수분 장력의 토양수분 함량 및 scale factor간 1차 회귀 분석을 하여 1% 유의수준에서 유의성이 인정되며 그 상관계수가 가장 높은 조합을 선정하여 그 1차 회귀 식의 기울기를 구한 결과는 사토, 사양토, 양토 및 식양토에 대하여 각각 Fig. 5와 Fig. 6, Fig. 7과 Fig. 8,

Fig. 9와 Fig. 10, 및 Fig. 11과 Fig. 12와 같다.

상기 결과에 따라 Eq. 10에 의하여 산정된 토양수분 함량 및 scale factor에 대한 장력단계 별 상대정밀도는 공히 4가지 모든 토성에서 토양수분 장력이 높아질수록 낮아졌으며 (Fig. 13), 토양수분 함량의 상대정밀도는 식양토에서 그 범위 (Range)가 0.980~0.376으로서 가장 컸으며, 장력 단계 별 평균 상대정밀도는 0.1 bar 경우를 기준으로 할 때, 0.952~0.620 이었다. Scale factor의 상대정밀도는 사양토에서 그 범위 (Range)가 0.964~0.269 로서 가장 컸으며, 장

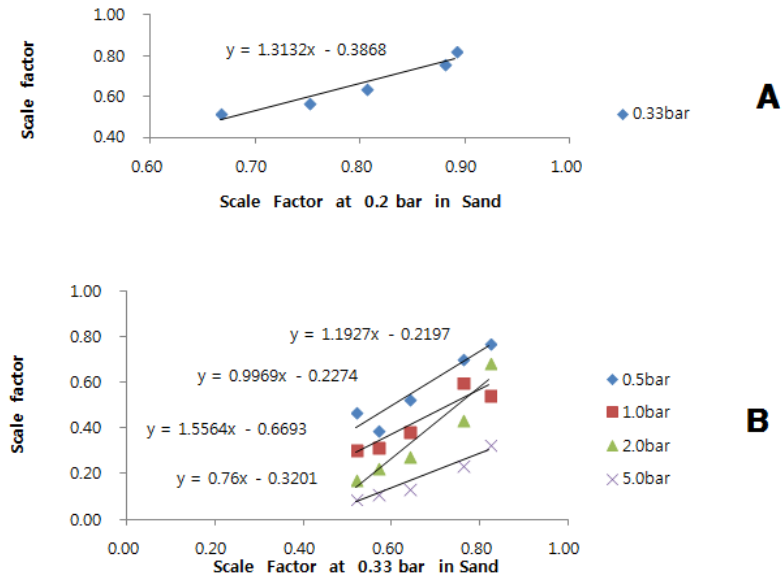


Fig. 6. Relationship between the scale factor at each soil water tension and the soil water tension at 0.2 bar [A] and 0.33bar [B] in Sand.

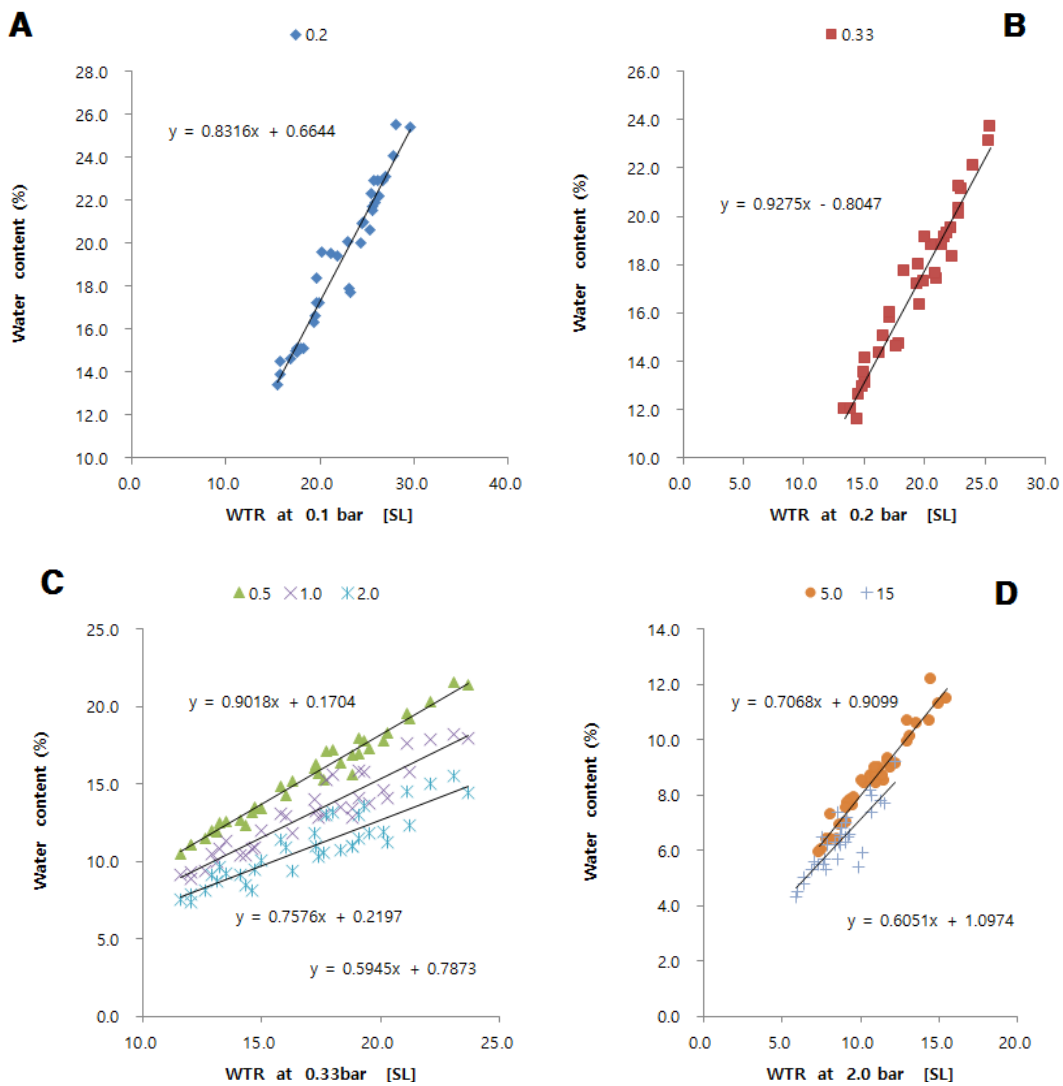


Fig. 7. Relationship between water content at 0.1 bar and that at 0.2 bar [A], between that at 0.2 bar and that at 0.33 bar [B], between that at 0.33 bar and those at three kinds of soil water tension [C], and between that at 2.0 bar and those at two kinds of soil water tension [D] in Sandy Loam.

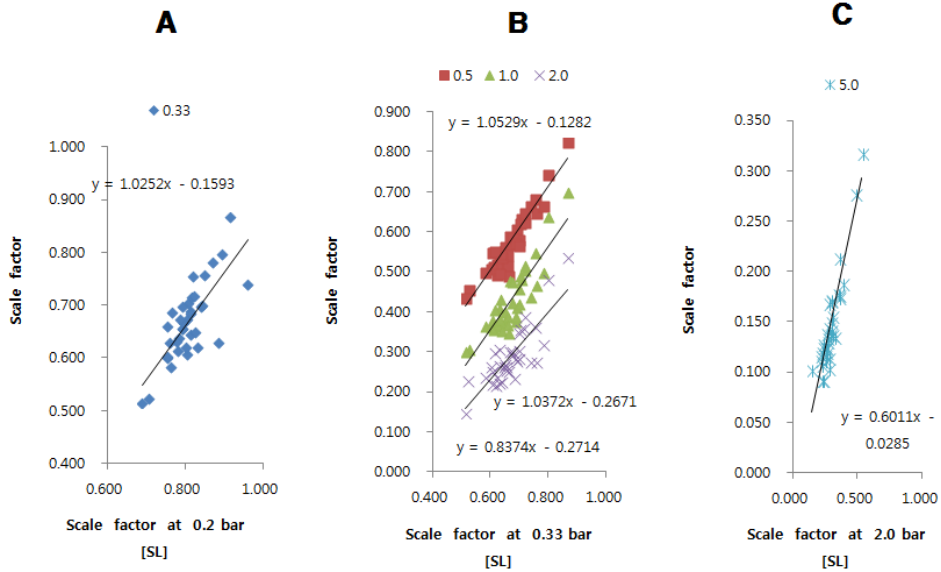


Fig. 8. Relationship between scale factor at 0.2 bar and that at 0.33 bar [A], between that at 0.33 bar and those at three kinds of soil water tension [B], and between that at 2.0 bar and that at 5.0 bar [C] in Sandy Loam.

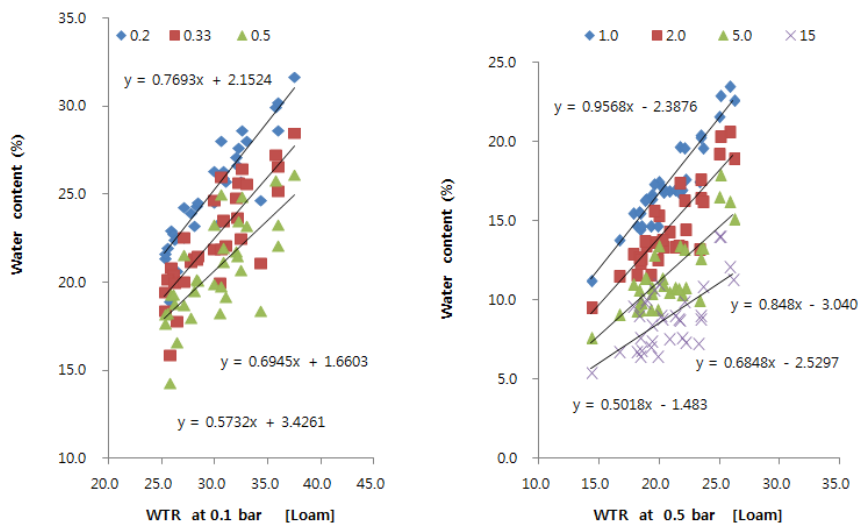


Fig. 9. Relationship between water content at 0.1 bar and those at three kinds of soil water tension [Left], and between that at 0.5 bar and those at four kinds of soil water tension [Right] in Loam.

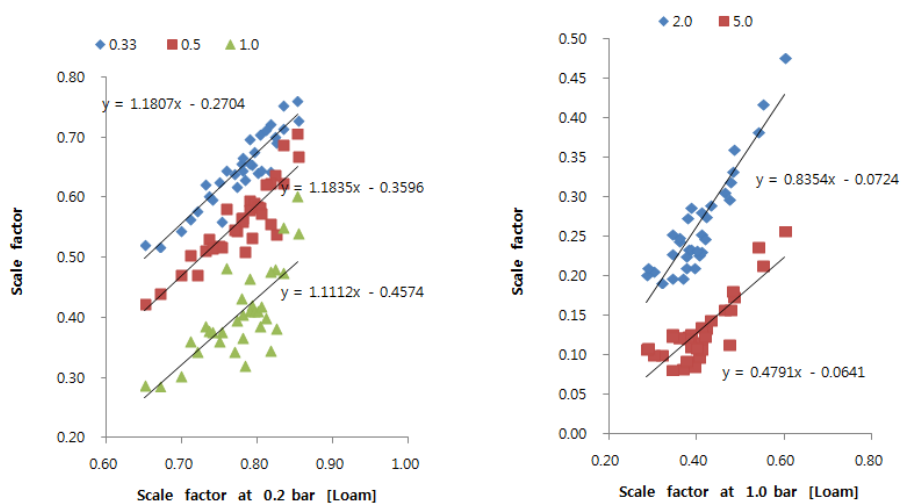


Fig. 10. Relationship between scale factor at 0.2 bar and those at three kinds of soil water tension [Left], and between that at 1.0 bar and those at two kinds of soil water tension [Right] in Loam.

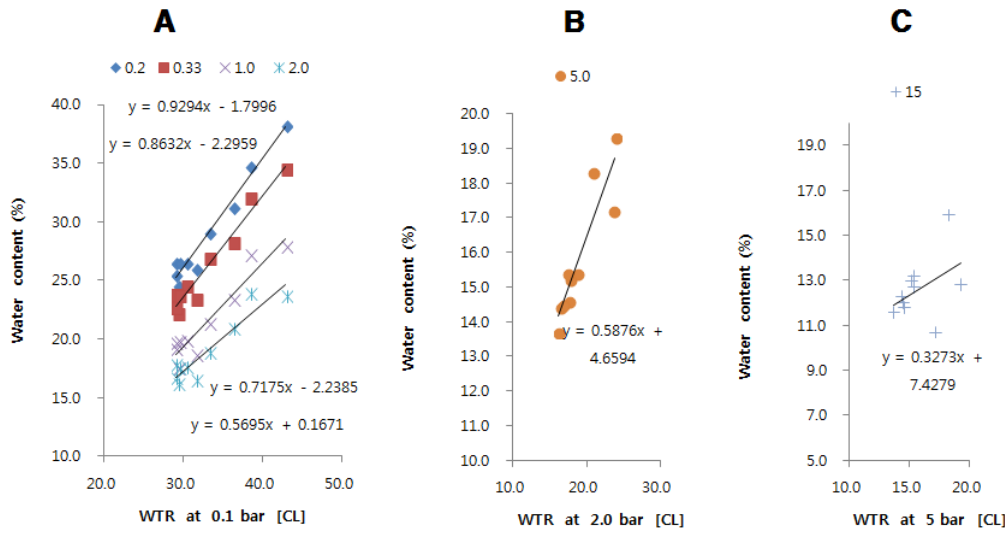


Fig. 11. Relationship between water content at 0.1 bar and those at four kinds of soil water tension [A], between that at 2.0 bar and that at 5.0 bar [B], and between that at 5.0 bar and that at 15 bar [C] in Clay Loam.

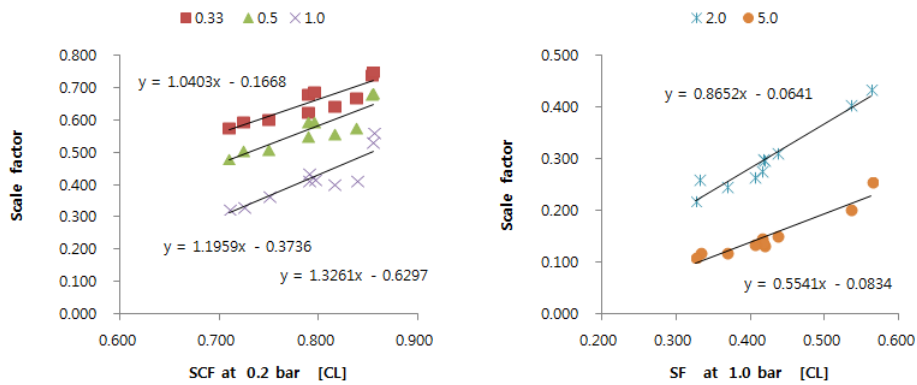


Fig. 12. Relationship between scale factor at 0.2 bar and those at three kinds of soil water tension [Left], and between that at 1.0 bar and those at two kinds of soil water tension [Right] in Clay Loam.

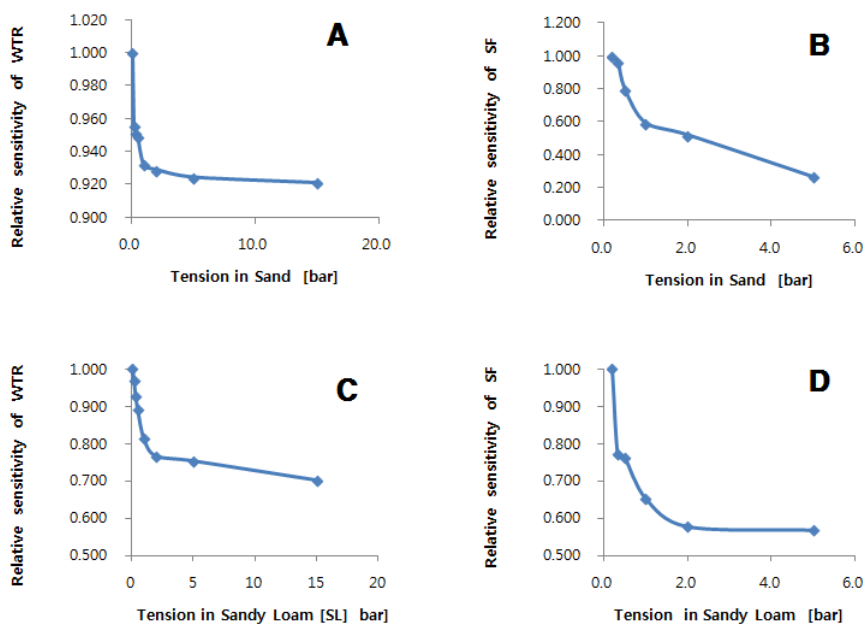


Fig. 13. Relative sensitivity for the water content [Left] and scale factor [Right] in Sand [A, B], Sandy Loam [C, D], Loam [E, F], Clay Loam [G, H] (continued).

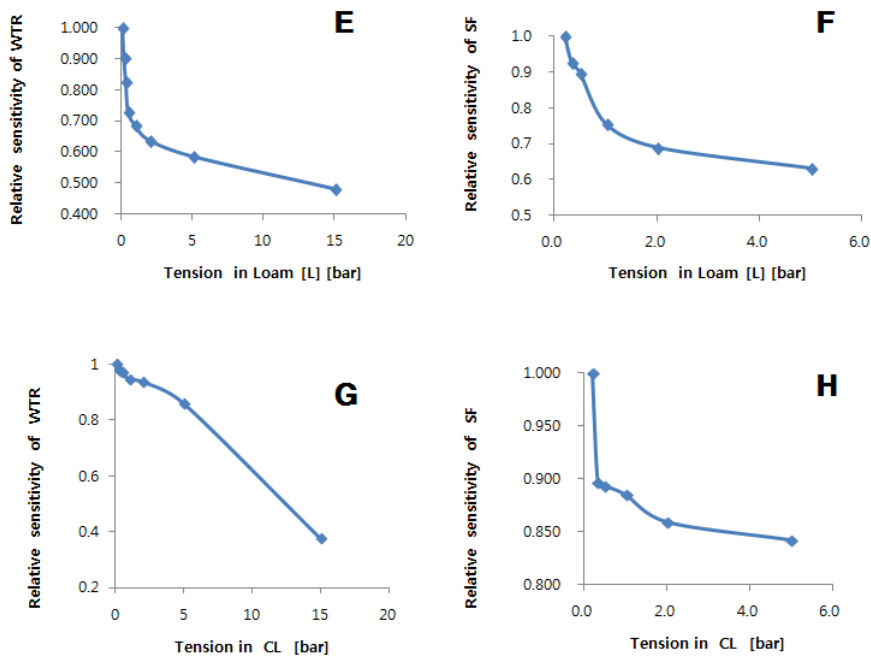


Fig. 13. Relative sensitivity for the water content [Left] and scale factor [Right] in Sand [A, B], Sandy Loam [C, D], Loam [E, F], Clay Loam [G, H] (continued).

Table 1. The relative replicates of soil water content according to the soil water tension for the different soil texture.

Soil water tension [bar]	Soil Texture				Average
	Sand [S]	Sandy Loam [SL]	Loam [L]	Clay Loam [CL]	
0.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.2	1.11	1.07	1.22	1.04	1.10
0.33	1.11	1.16	1.47	1.05	1.18
0.5	1.11	1.26	1.88	1.06	1.28
1.0	1.15	1.51	2.13	1.11	1.40
2.0	1.16	1.71	2.46	1.14	1.50
5.0	1.17	1.77	2.91	1.35	1.64
15.0	1.18	2.03	4.3	7.07	2.60

력 단계 별 평균 상대정밀도는 0.2 bar 경우를 기준으로 할 때, 0.890~0.577 이었다. 이와 같이 토성 및 장력단계별 상대정밀도가 차이 나는 것은, 토성별로 공극의 크기별 분포 양상이 서로 다르기 때문에 공극 내 토양수분의 표면장력이 다르므로 주어진 압력에 대한 반응 정도의 균등성에 차이가 있음에 기인된 것으로 사료된다.

이와 같은 결과는 토양수분 장력이 높아지는 단계일수록 0.1 bar 또는 0.2 bar 경우와 동일한 수준의 오차를 갖기 위한 상대적 반복이 많아져야 된다는 것을 뜻하며, 토양수분 함량 및 scale factor에 대한 토성과 장력 단계 별 요구되는 상

Table 2. The relative replicates of scale factor according to the soil water tension for the different soil texture.

Soil water tension [bar]	Soil Texture				Average
	Sand [S]	Sandy Loam [SL]	Loam [L]	Clay Loam [CL]	
0.2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.33	1.08	1.68	1.16	1.24	1.26
0.5	1.55	1.72	1.25	1.25	1.42
1.0	2.82	2.35	1.76	1.28	1.92
2.0	3.64	2.99	2.11	1.36	2.28
5.0	13.82	3.10	2.52	1.41	3.00

대적 반복수는 각각 Table 1 및 Table 2에서처럼, 토양수분 함량에 대하여 0.1 bar 경우를 기준으로 할 때, 1.04~7.07 범위 (식양토)이었고, 장력 단계별 평균은 (0.2 bar) 1.10~(15 bar) 2.60 범위이었다. Scale factor에 대하여 0.2bar 경우를 기준으로 할 때, 1.08~13.82 범위 (사토)이었고, 장력 단계별 평균은 (0.33 bar) 1.26~(5.0 bar) 3.00 범위이었다.

Conclusion

불포화 토양 특성 구명을 위한 기본적이고 중요한 요인은 토양수분 특성 곡선 (SWCC: Soil Water Characteristics Curve)이다. SWCC 추정식을 scaling technique을 이용하여 토성에 상관없이 설정할 수 있는 equation, 토성별 및 장력

단계별 상대정밀도를 분석하기 위하여 사토, 사양토, 양토 및 식양토 등 4개 토성과 0.01 MPa, 0.02 MPa, 1/30 MPa, 0.1 MPa, 0.3 MPa, 0.5 MPa 및 1.5 MPa의 압력단계를 두어 실험하였다.

토양수분 함량에 대한 3 종류의 scale factor [SF: θ_{sc}] 즉, $\theta_{sc1} = [(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)]$, $\theta_{sc2} = [\theta / \theta_s]$ 및 $\theta_{sc3} = \log([\theta / \theta_s])$ 중 장력단계 별 토성 간 CV의 평균값은 θ_{sc1} 이 가장 낮았다.

토양수분함량과 scale factor는 공히 4가지 토성에서 모두 토양수분 장력과 통계적으로 고도의 유의성이 있는 Log 함수 및 Exponential의 상관관계를 보였다.

토양수분 장력 (단위: bar)에 따른 토양수분 함량 (중량 %)을 추정하기 위한 SWCC 추정식은 scale factor를 이용하여 Eq. 1 또는 Eq. 2로 나타낼 수 있었으며, 이들 식에 의해 추정된 토양수분 함량의 scale factor와 그 실측치와의 편차의 평균값은 각각 0.018 및 0.023 으로서 Eq. A가 Eq. B에 비하여 실측치와 보다 더 잘 일치하였다.

$$\theta_{sc} = -0.196 \ln(H) + 0.4888 \quad (\text{Eq. A})$$

$$\theta_{sc} = 0.3804 (H)^{(-0.448)} \quad (\text{Eq. B})$$

토양수분 함량 및 scale factor에 대한 장력단계 별 상대정밀도는 공히 4가지 모든 토성에서 토양수분 장력이 높아 질수록 낮아졌으며, 토양수분 함량의 장력 단계 별 평균 상대정밀도는 0.1 bar 경우를 기준으로 할 때, 0.952~0.620 이었고, Scale factor의 장력 단계 별 평균 상대정밀도는 0.2 bar 경우를 기준으로 할 때, 0.890~0.577 이었다.

동일한 수준의 오차를 갖기 위한 상대적 반복수는 토양수분 함량에 대하여 0.1 bar 경우를 기준으로 할 때 장력 단계별 1.10~2.60 범위이었으며, Scale factor에 대하여 0.2 bar 경우를 기준으로 할 때, 장력 단계별 1.26~3.00 범위이었다.

이러한 결과는 SWCC 측정에 있어 반복수를 결정할 때 활용될 수 있으며, 오랜 시간과 노력이 소모되는 토성 분석 및 SWCC 측정을 하지 않아도 scale factor를 이용하여 SWCC를 추정할 수 있는 추정 식은 토양수분 balance 및 불포화토양의 수분전도 특성 구명에 중요한 자료로 활용될 수 있으리라 생각된다.

References

Ahuja, L.R., J.W. Naney, and R.D. Williams. 1985. Estimation soil water characteristics from simple properties or limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1100-1105.
Al-Badran, Y. and T. Schanz 2014. Modelling the compaction

curve of fine-grained soils. *Soils & Found.* 54:426-438.
Aldood, A., M. Bouasker, and M. Al-Mukhtan. 2014. Soil-water characteristics curve of lime treated gypseous soil. *Appl. Clay Sci.* 102:128-138.
Bird, N.R.A., E. Perrier, and M. Rieu. 2000. The water retention function for a model of soil structure whit pore and solid fractal distributions. *Eur. J. Soil Sci.* 51:55-63.
Bird, N.R.A. and E. Perrier. 2003. The pore-Solid Fractal model of soil density scaling. *Eur. J. Soil Sci.* 54:467-476.
Brooks R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology paper No. 3*, Colorado State University, Fort Collins. 1964.
Campbell, G.S. 1974. A sample method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.* 117:311-314.
Cheng, X., M. Huang, B.C. Si, M. Yu, and M. Shao. 2013. The differences of water balance components of Caragana korshinkii grown in homogeneous and layered soils in the desert-Loess Plateau transition zone. *J. Arid Environ.* 98: 10-19.
Chiu, C.F., W.M. Yan, and K.V. Yeng. 2012. Reliability analysis of soil water characteristics curve and its application to slope stability analysis. *Eng. Geol.* 135-136(15):83-91.
Cresswell, H.P. and Z. Paydar. 1996. Water retention in Australian soils. I. Description and prediction using parametric functions. *Aust. J. Soil Res.* 34:195-212.
Cresswell, H.P. and A. Lilly. 2015. A two-point method for determining the soil water characteristics of typical northern temperature boreal soils. *Geoderma Regional.* 5:71-76.
Eom, K.C., K.S. Ryu, and K.T. Um. 1988. Comparison of the measurement methods of soil water content by error analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 21(4):367-372.
Eom, K.C., K.C. Song, K.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28(3):227-232.
Eom, K.C. and K.R. Eom. 2008. *Mathematics for agricultural sciences*. Daewon Publishers, Korea, Seoul. 438-491.
Eom, K.C. and H.Y. Eom. 2013. Estimation model of the change in dairy leaf surface temperature using scaling technique. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(5):359-364.
Fredlund, D.G. and A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristics curve. *Can. Geotech. J.* 31(3):521-532.
Ghanbarian, B., V. Taslimitehrani, G. Dong, and Y.A. Pachepsky. 2015. Sample dimensions effect on prediction of soil water retention curve and saturated hydraulic conductivity. *J. Hydrol.* 528:127-137.
Hillel, D. and D.E. Erick. 1990. *Scaling in soil physics : Principles and applications*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 300-318.
Hutson, J.L. and A. Cass. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38:105-113.

- Kim D.H., G. Kim, and H. Baek. 2015. Relationship between thermal conductivity and soil water characteristics curve of pure bentonit based grout. *Inter. J.H. & M.T.* 84:1049-1055.
- Kosugi, K. 1996, Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.* 32:2697-2703.
- Leong, E.C. and H. Rahardjo, 1997. Review of soil-water characteristics curve equations. *J. Geo. & Geo. Eng.* 123(12): 1106-1117.
- Liu, Q., N. Yasufuku, K. Omine, and H. Hazarika. 2012. Automatic soil water retention test system with volume change measurement for sandy and silty soils. *Soils & Found.* 52:368-380.
- Malamos, N., P.E. barouchas, A. L-Tsakalidi, A. Koulopoulos, I. Chatziioakeim, Ph. Vitiniotis, and Ch. Chalvatzis. 2015. Soil hydrodynamic characteristics of reclaimed agricultural land at Messolonghi's polder. *Agric. Agric. Sci. Procedia.* 4:282-289.
- Mandel, J. 1964.. The statistical analysis of experimetal data. John Wiley & Sons, New York, 58-77, 363-389.
- Miller, E.E. and R.D. Miller. 1955. Theory of capillary flow : II. Experimental information. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19:271-275.
- Mollinedo, J., T.E. Schumacher, and R. Chintata. 2015. Influnce of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics. *J.A.& A. P.* 114:100-108.
- Patricia, M.T. and D.R. Nielsen. 1984. Scale factors in soil science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:953-959.
- Pedroso, D. M., D.S. Chao, and J.Z. Dong. 2009. The concept of reference curves for constitutive modeling in soil mechanics. *Comput. Geotech.* 36:149-165.
- Pirone, M., R. Papa, M.V. Nicotera, and G. Urciuoli. 2014, Evaluation of the hydraulic hysteresis of unsaturated pyroclastic soils by in situ measurements. *Proc. Earth & Pl. Sci.* 9:163-170.
- Rahimi, A., H. Rahardjo, and E.C. Leong. 2015. Effect of range of soil-water characteristics curve measurements on estimation of permeability function. *Eng. Geol.* 185(5):96-104.
- Reichardt K., D.R. Nielsen, and J.W. Biggar. 1972. Scaling of horizontal infiltration into homogenous soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:241-245.
- Reichardt, K., P.L. Libardi, and D.R. Nielsen. 1975. Unsaturated hydraulic conductivity determination by a scaling technique. *Soil Sci.* 120:165-168.
- Rieu, M. and G. Sposito. 1991. Fractal fragmentation soil porosity and soil water properties : I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1231-1238.
- Satyamaga A., H. Rahardjo, E.C. Leong, and J.Y. Wang. 2013. Water characteristics curve of soil with bimoda grain-size distribution. *Comput. Geotech.* 48:51-61.
- Shao, X., Y. Wang, L.D. Bl, Y.B. Yuan, X.K. Su, and J.G. Mo. 2009. Study on soil water characteristics of tobacco fields based on canonical correlation analysis. *Water Sci. Eng.* 2(2):79-86.
- Sun, W., D. Sun, L. Fang, and S. Liu. 2014. Soil-water characteristics of Gaomiaozi bentonite by vapour equilibrium technique. *J. Rock Mech. & Geo. Eng.* 6:48-54.
- Tyler S.W. and S.W. Wheatcraft. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Resour. Res.* 26:1047-1054.
- van Genuchten, M.T. 1980, A close form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Veltri, M., G. Severino, S. DeBartolo, C. Fallico, and A. Santini. 2013. Scaling analysis of water retention curves : a multi-fractal approach. *Procedia Environ. Sci.* 19:618-622.
- Wang, K., R. Zhang, and F. Wang. 2005. Testing the pore-solid fractal model for the soil water retention function. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:776-782.
- Zhai, Q. and H. Rahardjo. 2012. Determination of soil water characteristics curve variables. *Comput. Geotech.* 42:37-43.
- Zhai, Q. and H. Rahardjo, 2013. Quantification on uncertainties in soil-water characteristics curve associated with fitting parameters. *Eng. Geol.* 63:144-152.
- Zhang, Y., T. Ishikawa, T. Tokoro, and T. Nishimura. 2014. Influences of degree of saturation and strain rate on strength charateristics of unsaturated granular subbase coarse material. *Trans. Geo.* 1(2014):74-89.