Korean J. Soil Sci. Fert. Vol.50, No.5, pp.336-344, 2017

Korean Journal of Soil Science and Fertilizer

Article

https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.5.336
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Interpreting *in situ* Soil Water Characteristics Curve under Different Paddy Soil Types Using Undisturbed Lysimeter with Soil Sensor

Mijin Seo, Kyunghwa Han[1]*, Heerae Cho[1], Junghun Ok[1], Yongseon Zhang[1], Youngho Seo[2], Kangho Jung[1], Hyubsung Lee[1], and Gisun Kim[1]

National Institute of Environmental Research, Goryeong 40103, Korea

[1]National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

[2]Gangwon Agricultural Research & Extension Services, Chuncheon 24226, Korea

***Corresponding author:** bearthink@korea.kr

Received: July 4, 2017

Revised: September 15, 2017

Accepted: September 19, 2017

A B S T R A C T

The soil water characteristics curve (SWCC) represents the relation between soil water potential and soil water content. The shape and range of SWCC according to the relation could vary depending on soil characteristics. The objective of the study was to estimate SWCC depending on soil types and layers and to analyze the trend among them. To accomplish this goal, the unsaturated three soils were considered: silty clay loam, loam, and sandy loam soils. Weighable lysimeters were used for exactly measuring soil water content and soil water potential. Two fitting models, van Genuchten and Campbell, were applied. Two models entirely fitted well the measured SWCC, indicating low RMSE and high R^2 values. However, the large difference between the measured and the estimated was found at the 30 cm layer of the silty clay loam soil, and the gap was wider as soil water potential increased. In addition, the non-linear decrease of soil water content according to the increase of soil water potential tended to be more distinct in the sandy loam soil and at the 10 cm layer than in the silty clay loam soil and at the lower layers. These might be seen due to the various factors such as not only pore size distribution, but also cracks by high clay content and plow pan layers by compaction. This study clearly showed difficulty in the estimation of SWCC by such kind of factors.

Keywords: SWCC, Weighable lysimeter, Fitting model, Soil types, Soil layers

Parameters obtained from the Campbell and van Genuchten models and goodness-of-fit results.

Soil texture	Layer (cm)	Porosity (%)	Campbell				van Genuchten			
			Ψ_b	b	RMSE	R^2	α	n	RMSE	R^2
Sandy loam	10	58.1	1.48	9.16	0.30	0.98	0.45	1.12	0.30	0.98
	30	47.9	2.08	7.20	0.17	0.99	0.30	1.17	0.13	0.99
	55	48.3	4.93	13.83	0.05	0.98	0.03	1.37	0.04	0.98
Loam	10	54.7	1.51	11.31	0.34	0.98	0.41	1.10	0.24	0.99
	30	44.5	3.01	17.48	0.12	0.98	0.13	1.09	0.09	0.99
	55	46.8	2.61	19.07	0.09	0.95	0.14	1.09	0.08	0.96
Silty clay loam	10	54.7	2.19	18.00	0.51	0.95	0.20	1.07	0.36	0.98
	30	46.8	0.69	64.87	0.28	0.77	1.20	1.02	0.30	0.75
	55	46.8	2.97	53.24	0.16	0.77	0.12	1.03	0.16	0.79

© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

포화 토양은 토양 내 고상, 액상, 기상 삼상 중 기상에 의한 영향이 제외되며 따라서 물의 이동은 압력포텐셜과 중력포텐셜에 의해 지배된다. 반면, 삼상으로 이루어져 있는 불포화 토양은 메트릭포텐셜과 중력포텐셜에 의한 영향을 받으며 포화 토양과는 다른 물의 이동 양상을 나타낸다. 토양수분특성곡선 (Soil Water Characteristics Curve, SWCC)은 중력포텐셜에 의한 영향 후에 불포화 토양에서의 흡착과 모세관현상에 의한 토양수분포텐셜과 토양수분함량의 관계를 나타내는 곡선으로 토양 내 공극 분포에 따른 물의 이동특성을 파악할 수 있다. 토양수분특성곡선을 통해 토양수분포텐셜에 따른 토양수분함량을 예측 또는 평가함으로써 관개시점, 관개량과 같은 물절약 측면에서의 효율적인 물관리 체계를 구축할 수 있다 (Hur et al., 2006). 또한, 토양 투수, 수리전도도, 양분 이동 등의 연구에도 토양수분특성곡선은 활용된다 (Hillel, 1971; Taylor and Ashcroft, 1972). 이와 같은 토양 내 물 이동 양상의 해석은 대기-식물-토양을 통한 연속적 물순환 시스템에 중요한 정보를 제공할 수 있으며 이에 토양수분특성곡선의 작성은 농업 수자원 관리에 중요한 부분이라 할 수 있다.

이런 토양수분특성곡선의 작성에 대해 많은 연구들은 수학적 모델을 적용한 계수추정방법을 이용해 왔으며 모델의 적합성을 검증하여 왔다 (Eom et al., 1995; Hur et al., 2006; Hur et al., 2010; Jabro et al., 2009; Kang et al., 2002; Ki and Kim, 2008; Kim, 2003; Lee et al., 2005; Too et al., 2014). 계수추정방법을 통해 구명된 토양수분특성 계수들을 이용하는 것은 시간과 돈, 노동력 절감 측면에서 큰 장점을 가지고 있다 (Eom et al., 1995; Hur et al., 2006). 또한, 토양수분 측정이 어려운 상황이거나 또는 측정이 가능할지라도 불확실성이 높은 경우 매우 유용하게 사용될 수 있다. 이런 점에서 토양 특성이 제대로 반영된 계수들을 이용하는 것은 중요하며, 이것은 정확한 실측 자료의 이용을 통해서 가능하다. 하지만 지금까지 대부분의 연구는 실측에 대한 어려움 때문에 실내실험을 통하거나 필드에서 측정된 소수의 자료를 활용한 경우가 대부분이었다 (Jung et al., 2015; Ki and Kim, 2008; Kim, 2003; Park et al., 2010; Shin et al., 2004). 이런 경우 토양 샘플링시 시료의 교란에 대한 문제 (Jung et al., 2015)를 배제하기 힘들다. 이에 반해 정밀 중량 라이시미터 (precision weighable lysimeter)는 비교란 상태로 채취한 토양으로 충진된 시설로 자연상태 그대로의 토양수분 이동 양상에 대한 정보를 제공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 시설은 자동화된 시스템으로 토양수분의 변화에 대해 실시간 연속측정이 가능하며, 측정오차의 최소화로 정확한 자료를 제공할 수 있다 (Seo et al., 2016). 하지만 이러한 시설을 이용하여 토양수분특성곡선을 연구한 사례는 찾아볼 수 없다. 특히, 논 토양의 경우 매년 담수 후 써레질 등으로 인하여 토양구조의 변화가 무척 심함에도 현재까지 토양수분과 관련된 연구가 미흡한 것이 사실이다.

토양수분특성곡선의 형태와 범위는 토성, 공극률, 입도분포, 용적밀도 등 다양한 토양 특성에 따라 달라질 수 있다 (Fredlund and Xing, 1994; Jung et al., 2015; Song, 2013; Tuller and Or, 2004). 토양수분장력의 경우 층 경계에 연속적이지만 토양수분함량은 불연속적이며 (Park et al., 1994), 또한 비슷한 토양 특성으로 이루어진 한 토양일지라도 층위별 토양수분특성곡선은 달라질 수 있다. 따라서 토성별 및 층위별 토양수분특성곡선의 변화를 살펴볼 필요가 있다. 그러나 토성과 층위 모두에 대한 토양수분특성곡선의 연구는 현재까지 미흡한 실정이다. 몇몇 연구자들에 의해 준설토, 화강풍화토, 점성토, 사질토 등 서로 다른 특성을 가진 토양 (Kang et al., 2002; Shin et al., 2004; Song, 2004)에 따른 토양수분특성곡선의 연구가 있었으며, Hur et al. (2010)은 적토한 토양에 대해 120 cm 층위까지 3개 층위로 나누어 층위별 토양수분보유 특성을 해석한 바 있다. 하지만 실측 데이터를 기반으로 한 토성별 및 층위별에 따른 토양수분특성곡선의 작성 및 해석에 대한 연구는 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 논 토양에 대한 토성별 및 층위별 수분보유 특성 정보를 제공하기 위해 물리학적 특성이 서론 다른 토양으로 충진된 중량 라이시미터로부터의 토양수분포텐셜과 토양수분함량 실측 자료를 이용하여 추정모형을 적용하고 평가하였으며, 토성별 및 층위별 토양수분특성곡선의 토양 특성에 따른 영향을 비교 분석하였다.

Materials and Methods

시험토양과 데이터 측정 시험은 한국의 대표적 토양인 미사질식양토 (Silty clay loam), 양토 (Loam), 사양토 (Sandy loam) 세 가지 비교란 상태의 담수 이전 논 토양을 대상으로 하였다. 미사질식양토는 익산에서 채취하였으며 부용통으로 mesic family of Typic Endoaqualfs에 속하며, 양토와 사양토는 전주지역에서 채취하였고 강서통으로 mesic family of Anthraquic Eutrudepts에 속한다. 각 토양에 대한 토성별 및 층위별 물리적 특성은 토양입도 분포의 경우 비중계법 (Gee and Bauder, 1986)으로, 전용적밀도는 코아법 (Blake and Hartge, 1986)을 이용하여 3반복으로 분석하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 미사질식양토는 표토의 점토함량이 30% 정도로 양토나 사양토에 비하여 높은 점토분포를 보였으며, 양토와 사양토의 경우는 높은 모래와 미사의 함량을 나타내었다. 각 토양의 용적밀도는 표토보다는 심토에서 대체적으로 높은 경향을 보였다.

토양수분특성곡선을 작성하기 위한 토양수분장력과 토양수분함량의 측정은 표면적 1 m^2, 깊이 1.5 m의 정밀 중량 라이시미터 시설을 이용하였다 (Fig. 1). 토양수분함량과 장력은 라이시미터 5개 층위 (10, 30, 55, 85, 125 cm)마다 120°로 설치되어 있는 UMP-1 (Soil moisture sensor; UGT, Germany)과 Tensio 160 (Tensiometer; UGT, Germany) 센서를 이용하여 측정하였다 (Fig. 1). 토양수분센서의 값은 토양수분함량 실측치와 보정한 값을 활용하였다. 토양수분장력과 토양수분포텐셜은 부의 관계이며 결과는 토양수분포텐셜로 표현하였다. 일반적으로 토양수분특성곡선은 습윤과정에서의 토양수분포텐셜과 토양수분함량의 관계를 해석하는데 어려움이 있어 건조과정에서 더 많이 해석되어 왔다 (Hillel, 1998). 본 연구에서도 수분이 감소하는 기간 약 10일 동안의 토성과 층위에 따른 시간별 데이터를 연속 측정하였으며, 측정된 데이터는 data logger (UGTLog; UGT, Germany)를 이용하여 자동수집 하였다. 토양수분포텐셜과 토양수분함량은 85 cm와 125 cm 층위에서 변화를 거의 나타내지 않았기 때문에 55 cm 층위까지 토양수분특성곡선의 작성에 이용하였다.

Table 1. Properties of three different types of study soil.

Soil texture (Soil taxonomy)	Soil depth (cm)	Bulk density (Mg m^{-3})	Distribution of soil particles (%)			Soil texture of each layer
			Sand	Silt	Clay	
Silty clay loam (Typic Endoaqualfs)	10	1.11 ± 0.11†	5.9	64.1	30.0	Silt clay loam
	30	1.38 ± 0.09	5.3	54.5	40.2	Silt clay
	55	1.37 ± 0.09	2.7	55.1	42.2	Silt clay
Loam (Anthraquic Eutrudepts)	10	1.20 ± 0.05	42.3	47.7	10.0	Loam
	30	1.47 ± 0.07	44.7	45.3	10.0	Loam
	55	1.41 ± 0.05	43.8	47.2	9.0	Loam
Sandy loam (Anthraquic Eutrudepts)	10	1.20 ± 0.03	52.6	37.4	10.0	Sandy loam
	30	1.41 ± 0.07	50.1	40.9	9.0	Loam
	55	1.41 ± 0.05	50.1	40.9	9.0	Loam

†mean ± standard deviation.

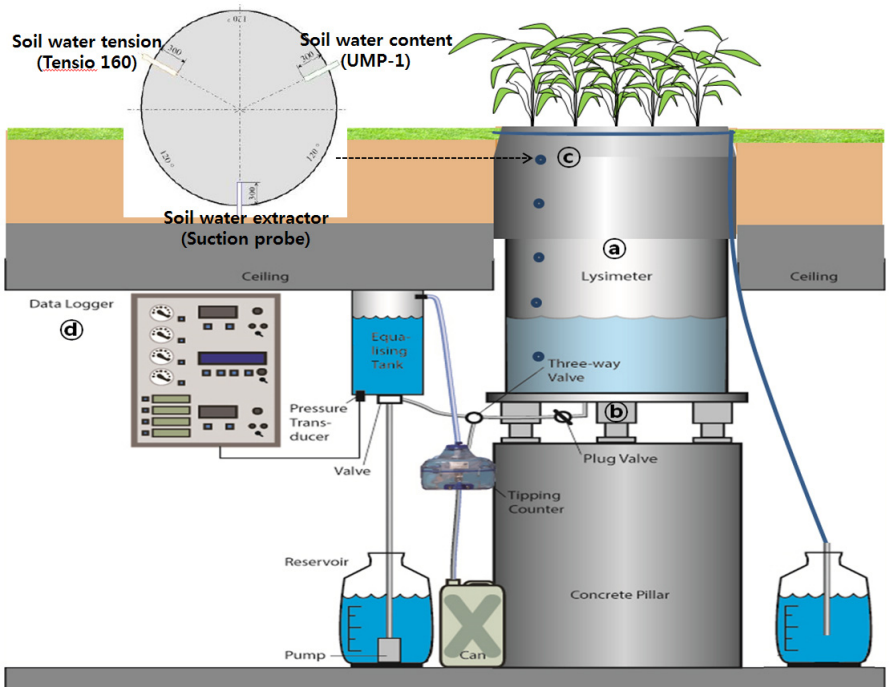

Fig. 1. Weighable lysimeter cross-section (a: weighable lysimeter; b: 10 g accuracy load cells; c: sensors for five measurement levels; d: automatic data logger).

토양수분보유 모형 라이시미터 실측 데이터를 이용한 토성별 및 층위별 토양수분특성곡선은 두 가지 추정 모형(fitting model)을 이용하여 작성하였다. 다양한 모형 중 토양수분특성곡선 해석에 대표적으로 많이 이용되는 van Genuchten (1980) 모형 (Mishra et al., 1989)과 Brooks and Corey (1964) 모형을 바탕으로 한 Campbell (1974) 모형을 적용하였다. van Genuchten (1980)의 모형은 Mualem (1976)의 경험식을 바탕으로 하였으며 Eq. 1과 같다.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha\Psi|^n}\right]^m \qquad \text{(Eq. 1)}$$

여기서, θ_e는 유효수분함량, θ_s는 포화수분함량, θ_r은 잔여수분함량, θ는 현재수분함량, n은 공극 크기 분포와 관련된 계수 (n > 1), m은 잔여수분함량과 관련된 계수 (1-1/n), Ψ는 토양수분 메트릭포텐셜을 나타낸다. α는 공기유입가 (Air-Entry Value, AEV)의 역함수 (α>0)이며, AEV (α^{-1})는 토양 공극으로 공기의 유입이 시작되는 경계지점에서의 메트릭포텐셜을 의미한다. van Genuchten (1980) 모형은 토양수분 메트릭포텐셜의 값에 상관없이 연속적인 토양수분함량의 값을 안정적으로 구할 수 있다 (Park et al., 1994).

Brooks and Corey (1964) 모형을 토대로 한 Campbell (1974) 모형은 Eq. 2와 같으며, b는 공극 크기 분포와 관련된 계수로 실측값에 선형함수를 맞춤으로써 결정되는 경험상수이며, Ψ_b는 공기유입가를 나타낸다. Campbell (1974) 모형은 토양수분함량에 대해 Eq. 3과 같이 변환할 수 있다.

$$\Psi = \Psi_b\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$\theta = \theta_s \left| \frac{\Psi}{\Psi_b} \right|^{-1/b} \quad \text{(Eq. 3)}$$

각 경험식으로부터의 계수들은 엑셀의 해찾기 과정을 통해 얻어졌으며, 실측값과 추정값 사이의 오차가 최소가 되는 값을 산정하였다. 모형으로부터의 예측 신뢰도 평가는 평균제곱근 오차 (Root Mean Square Error, RMSE)와 결정계수 (coefficient of determination, R^2)를 이용하였다.

Results and Discussion

모형적용 결과 두 모형의 적용 결과 전체적으로 van Genuchten 모형이 Campbell 모형에 비하여 낮은 오차와 높은 결정계수의 경향을 보이며 실측값의 경향을 더 잘 추정하는 것으로 나타났다 (Table 2). 하지만 Figs. 2~4에서 알 수 있듯이 두 모형 사이의 차이는 미미하였으며, 모든 토성과 층위에서 실측값과 추정값 사이에 작은 오차와 높은 결정계수를 보이며 두 모형 모두 높은 신뢰성을 나타내었다 (Table 2). 세 토성 중에서는 두 모형 모두 미사질식양토에서 높은 오차와 낮은 결정계수를 보이며 실측값의 경향을 가장 잘 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 양토와 사양토는 비슷한 결과를 보여주긴 했지만 사양토에서 실측값의 경향을 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. 층위별로는 모든 토성에서 하위층으로 갈수록 낮은 오차를 나타내었지만 결정계수 또한 낮아지는 경향을 보였다. 특히, 미사질식양토의 경우 30 cm 층위에서 측정값과 실측값 사이에 큰 차이를 보이며 (Fig. 2) 가장 낮은 결정계수를 나타냈다. 미사질식양토

Table 2. Parameters obtained from the Campbell and van Genuchten models and goodness-of-fit results.

Soil texture	Layer (cm)	Porosity (%)	Campbell				van Genuchten			
			Ψ_b	b	RMSE	R^2	α	n	RMSE	R^2
Sandy loam	10	58.1	1.48	9.16	0.30	0.98	0.45	1.12	0.30	0.98
	30	47.9	2.08	7.20	0.17	0.99	0.30	1.17	0.13	0.99
	55	48.3	4.93	13.83	0.05	0.98	0.03	1.37	0.04	0.98
Loam	10	54.7	1.51	11.31	0.34	0.98	0.41	1.10	0.24	0.99
	30	44.5	3.01	17.48	0.12	0.98	0.13	1.09	0.09	0.99
	55	46.8	2.61	19.07	0.09	0.95	0.14	1.09	0.08	0.96
Silty clay loam	10	54.7	2.19	18.00	0.51	0.95	0.20	1.07	0.36	0.98
	30	46.8	0.69	64.87	0.28	0.77	1.20	1.02	0.30	0.75
	55	46.8	2.97	53.24	0.16	0.77	0.12	1.03	0.16	0.79

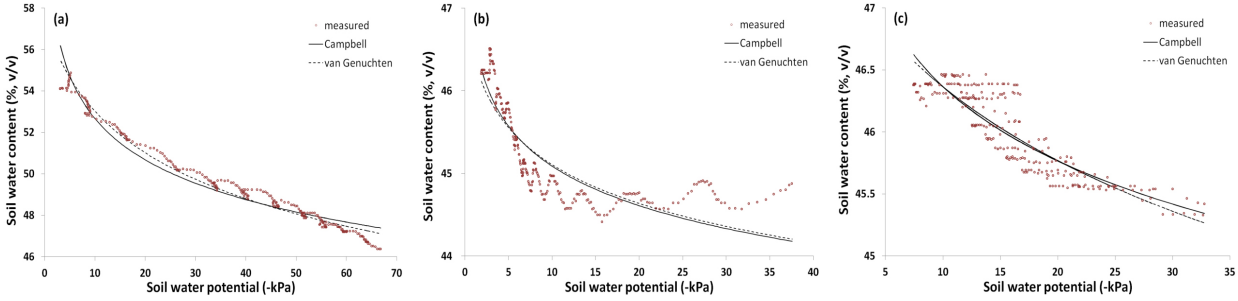

Fig. 2. Soil water characteristics curve of the silty clay loam soil at the 10 cm (a), 30 cm (b), and 55 cm (c) layers.

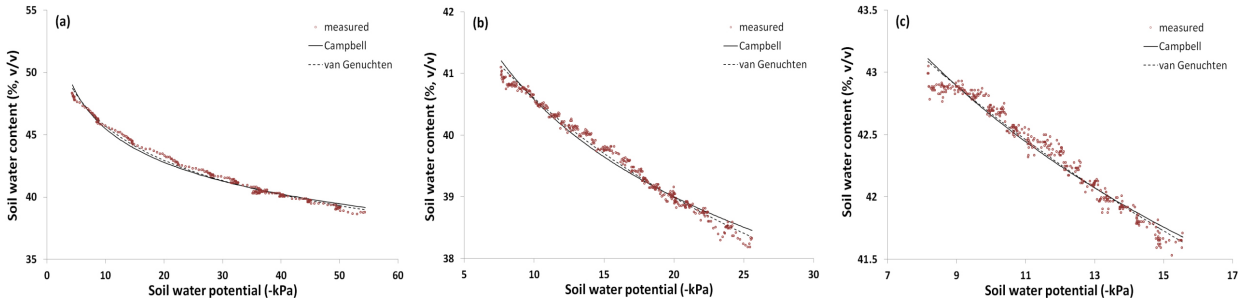

Fig. 3. Soil water characteristics curve of the loam soil at the 10 cm (a), 30 cm (b), and 55 cm (c) layers.

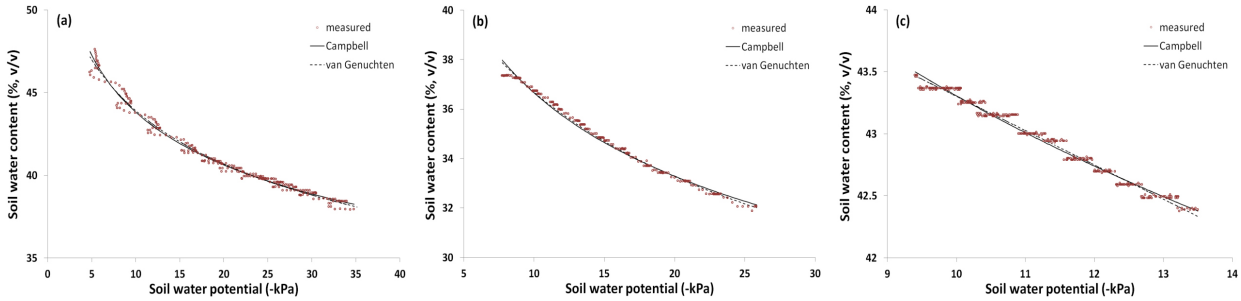

Fig. 4. Soil water characteristics curve of the sandy loam soil at the 10 cm (a), 30 cm (b), and 55 cm (c) layers.

에서 수분함량의 변동폭이 세 깊이에서 양토와 사양토에 비해 작게 나타나는데 이는 수분포텐셜 -100 kPa에 해당하는 공극 크기인 3 mm보다 큰 공극량이 작다는 것을 말한다. Han et al. (2008)에서도 점토함량이 낮은 사양토에서 수분함량의 변동폭이 가장 컸으며 미사질식양토에 비해 모형의 적합도가 높게 나타났다.

토양수분특성곡선을 결정하는 토양수분특성 계수인 공기유입가 (AEV)는 토성별 및 층위별 물리적 특성에 따라 다르게 나타났다 (Table 2). 이 계수는 다른 연구 (Hillel, 1998; Park et al., 2010)에서와 같이 큰 공극을 가진 조립질 토양인 사양토로 갈수록 감소하고 점토의 함량이 높은 미사질식양토로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 사양토에서 경계지점의 공기유입 현상을 더욱 분명하게 드러냈다. 하지만 30 cm 층위에서는 미사질식양토에서 다른 토성보다 매우 낮은 AEV의 값을 드러냈으며, 55 cm 층위에서는 사양토에서 다른 토성보다 매우 높은 AEV의 값을 드러냈다. 각 토성의 층위별 결과는 Hur et al. (2010)의 결과와 비슷하게 층위가 깊어질수록 AEV가 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 양토의 30 cm 층위에서는 55 cm 층위보다 높은 AEV의 값을 나타냈다. Assouline (2006)은 토양수분특성곡선은 토양의 공극률과 용적밀도에 의해 크게 좌우됨을 언급한 바 있는데, 본 연구에서 30 cm 층위가 55 cm 층위에 비해 AEV 값이 높은 것 또한 써레질 등으로 분산된 입자가 대공극을 막아 높아진 용적밀도에 의한 영향으로 판단된다.

토양수분특성곡선 분석 전체적으로 토성별 및 층위별 토양수분특성곡선은 토양수분포텐셜이 증가할수록 토양수분함량이 감소하는 경향을 나타냈다 (Figs. 2~4). 토양수분포텐셜에 대한 토양수분함량은 모세관 현상과 공극 분포와 같은 토양구조에 크게 영향 받는다 (Hillel, 1998). 따라서 다른 토양입자분포를 나타내는 세 토양마다 다른 형태와 범위의 토양수분특성곡선을 나타냈다 (Fig. 5). 미사질식양토는 다른 연구 (Fredlund and Xing, 1994; Hillel, 1998; Park et al., 2010)에서 언급된 바와 비슷하게 다른 두 토성에 비하여 가장 넓은 토양수분포텐셜 분포와 가장 높은 토양수분 보유범위를 나타냈으며 가장 완만한 곡선의 기울기를 나타냈다. 이것은 점토 함량이 높은 토양에서 공극이 작고 물과 토양입자 사이에 흡착에 의한 영향이 크게 작용하므로 더 많은 물이 포획되며, 따라서 토양수분포텐셜이

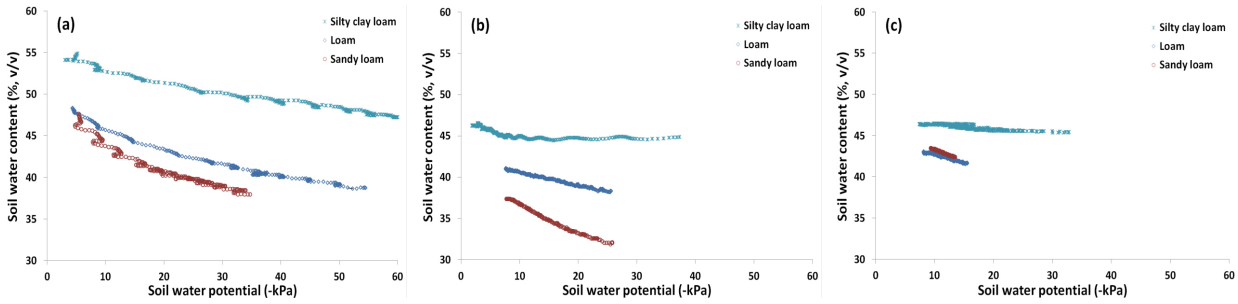

Fig. 5. Comparison of the measured soil water characteristics curves among the three soils at the 10 cm (a), 30 cm (b), and 55 cm (c) layers.

증가함에 따라 토양수분함량이 서서히 감소했기 때문으로 설명될 수 있다 (Hillel, 1998). 반면, 모래함량이 클수록 공극이 크며 흡착에 의한 영향보다는 모세관 현상이 지배적이게 된다. 따라서 사양토로 갈수록 보수력이 작아지고 토양수분함량의 감소에 대한 기울기가 커지는 경향을 보였다.

이러한 토양수분특성곡선의 형태는 10 cm 층위에서 더 넓은 토양수분함량과 토양수분포텐셜의 분포를 보이며 다른 층위에 비하여 더 뚜렷한 형태를 드러냈다 (Fig. 5). 물 이동의 공간적 변이는 하위층으로 갈수록 그 변화범위가 더욱 좁아지며 곡선의 형태가 뚜렷하게 나타나지 않는 경향을 보였다. 이것은 토양수분의 변화가 하위층으로 갈수록 크지 않으며, 여러 요인들에 의해 토양수분 이동이 영향을 받았기 때문이다. 우선, 수분보유력을 살펴보면 각 토성은 10 cm 층위에서 높은 수분함량을, 30 cm와 55 cm 층위에서는 유사한 경향을 나타냈다. 하지만 사양토의 경우 55 cm 층위에서 30 cm 층위보다 높아진 수분보유력과 매우 좁은 수분포텐셜의 범위를 나타냈다 (Fig. 4). 이는 55 cm 층위 근처에 다짐층의 존재로 인한 물 고임 현상으로 나타난 결과로 판단되었다. Seo et al. (2016)도 경운에 의한 쟁기바닥층 등의 다짐층에 의한 물 이동의 제한을 언급한 바 있다. 사양토 55 cm 층위에서 다른 토성에 비해 높은 AEV의 값을 나타낸 것 또한 다짐층에 의한 영향으로 설명될 수 있을 것으로 보인다.

미사질식양토 30 cm 층위의 경우는 토양수분특성곡선의 추정값과 실측값 사이에 큰 차이를 나타냈다. 토양수분포텐셜 -2 ~ -7 kPa에서 2% 정도 수분이 감소하다가 이후 변동은 있으나 감소경향을 나타내지 않았다 (Fig. 2(b)). 미사질식양토 30 cm 층위는 점토함량이 40%로 매우 높기 때문에 담수시 팽창된 토양이 낙수 후 수축되어 균열에 의한 공극이 생성될 수 있다. 토양수분특성곡선으로 볼 때 -2 ~ -7 kPa 범위에 평균 지름 60 mm의 대공극이 약 2% 정도 생성된 것으로 파악되었다. 이 균열은 30 cm 층위에서 양토와 사양토 (-10 ~ -30 kPa)보다 미사질식양토 (-2 ~ -40 kPa)가 토양수분포텐셜의 최저값을 더 낮게 하는데 기여한 것으로 판단된다. 반면 -10 ~ -40 kPa 범위의 공극량은 0.5% 이하로 낮게 나타났다. 즉, 미사질식양토 30 cm 층위는 균열에 의한 대공극 (60 mm)에서 소공극 (10 mm 이하)으로 공극크기가 급격히 달라지는 분포를 보이고 있다. 이런 공극 분포일 때는 van Genuchten과 Campbell 모형과의 적합도가 낮다고 판단할 수 있었다. 다만 30 cm 층위에서 낮은 AEV 값은 균열에 의한 대공극이 있음을 가리킨다고 할 수 있다. 미사질식양토 55 cm 층위에서는 수분포텐셜 -2 ~ -7 kPa 범위의 균열에 의한 대공극은 나타나지 않았으며 -10 ~ -40 kPa 범위의 공극량은 30 cm 층위와 유사하게 0.5% 이하로 낮게 나타났다.

양토와 사양토에서 van Genuchten과 Campbell 모형의 적합도가 높았으나 미사질식양토 30 cm 층위와 같이 공극크기 분포가 대공극과 소공극으로 이원적일 경우는 모형의 적합도가 낮다고 판단할 수 있었다. 토양수분특성곡선에서 van Genuchten과 Campbell 모형의 변수가 추정되면 이 모형을 활용하여 불포화 상태의 토양에서 물의 이동을 해석할 수 있다 (Han et al., 2008).

Conclusions

본 연구에서는 비교란 중량 라이시미터의 논 토양에 장착된 토양수분센서와 토양수분장력계를 활용하여 토성별 및 층위별 토양수분특성곡선을 작성하고 van Genuchten과 Campbell 모형의 적합도를 파악하고 차이를 분석하였다. 논은 담수와 낙수를 반복하면서 토양의 구조 특성이 달라질 수 있어 본 연구와 같은 비교란 상태에서의 토양수분특성곡선의 도출은 유용한 자료로 활용될 수 있으며, 농경지 현장 상태의 물질이동 특성을 유추하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ010867) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

Assouline, S. 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. Vadose Zone J. 5(2):697-705.

Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density in methods of soil analysis, part1. In A. Klute (ed.). Monograph No. 9, ASA, Madison, Wisconsin, USA.

Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrology Paper 3:27. Colorado State University (Fort Collins), Colorado, USA.

Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117(6):311-314.

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.

Fredlund, D.G. and A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Can. Geotech. J. 31(4):521-532.

Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In: methods of soil analysis, part1. In A. Klute (ed.). Monograph No. 9, Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.

Han, K.H., H.M. Ro, H.J. Cho, L.Y. Kim, S.W. Hwang, H.R. Cho, and K.C. Song. 2008. Unsaturated hydraulic conductivity functions of van Genuchten's and Campbell's models tested by one-step outflow method through tempe pressure cell. Korean J. Soil Sci. Fert. 41:273-278.

Hillel, D. 1971. Soil and water: physical principles and processes. Academic press, New York, USA.

Hillel, D. 1998. Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations. Academic Press, California, USA.

Hur, S.O., K.H. Moon, K.H. Jung, S.K. Ha, K.C. Song, H.C. Lim, and G.G. Kim. 2006. Estimation model for simplification and validation of soil water characteristics curve on volcanic ash soil in subtropical area in Korea. Korean J. Soil Sci. Fert. 39(6):329-333.

Hur, S.O., S.H. Jeon, K.H. Han, H.R. Jo, Y.K. Sonn, S.K. Ha, J.G. Kim, and N.W. Kim. 2010. Application of analysis models on soil water retention characteristics in anthropogenic soil. Korean J. Soil Sci. Fert. 43(6):823-827.

Jabro, J.D., R.G. Evans, Y. Kim, and W.M. Iversen. 2009. Estimating in situ soil-water retention and field water capacity in two contrasting soil textures. Irrig. Sci. 27(3):223-229.

Jung, Y.S., H.D. Sa, S. Kang, S.B. Oh, and J.S. Lee. 2015. Soil water characteristic curve using volumetric pressure plate extractor incorporated with TDR system. J. Korean Geotech. Soc. 31(8):17-28.

Kang, J.B., B.J. Lee, and B.W. Shin. 2002. Soil-water characteristics of partially saturated soils. J. Korean Soc. Civ. Eng. 22(5C):535-543.

Ki, W.S. and S.H. Kim. 2008. Soil water characteristic curve of the weathered granite soil through simulated rainfall system and SWCC cell test. J. Eng. Geol. 18(4):523-535.

Kim, S.N. 2003. Analysis of influence by soil water-characteristic curve and permeability-suction relationship for the water flow in unsaturated soil. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 3(2):119-125.

Lee, H.J., S.J. Lee, and S.R. Lee. 2005. Estimation of soil water characteristic curve for weathered granite soils considering structural characteristics. J. Korean Soc. Civ. Eng. 25(4C):249-258.

Mishra, S., J.C. Parker, and N. Singhal. 1989. Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty from particle size distribution data. J. Hydrol. 108:1-18.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12(3):513-522.

Park, J.H., C.K. Park, and J.H. Soun. 1994. Estimation of hydraulic properties in porous media. Water Future 27(3):107-113.

Park, S.W., J.Y. Park, D.H. Tae, and Y.J. Sim. 2010. Effects of overburden pressure and clay content on water retention characteristics of unsaturated weathered soils. J. Korean Soc. Civ. Eng. 30(1C):53-63.

Seo, M., K. Han, K. Jung, H. Cho, Y. Zhang, and S. Choi. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter with paddy sandy loam soil during winter season. Korean J. Soil Sci. Fert. 49(4):300-309.

Shin, E.C., H.J. Lee, and Y.I. Oh. 2004. Prediction of soil-water characteristic curve and unsaturated permeability coefficient of reclaimed ground. J. Korean Geotech. Soc. 20(1):109-120.

Song, C.S. 2004. Prediction of the volumetric water content using the soil-water characteristic curve on an unsaturated soil. J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol. 7(6):39-48.

Song, Y.S. 2013. Estimation on unsaturated hydraulic conductivity function of Jumoonjin sand for various relative densities. J. Korean Soc. Civ. Eng. 33(6):2369-2379.

Taylor, A.S. and G.L. Ashcroft. 1972. Physical Edaphology: The physics of irrigated and nonirrigated soils. W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA.

Too, V.K., C.T. Omuto, E.K. Biamah, and J.P. Obiero. 2014. Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness. Open J. Modern Hydrol. 4(4):173-182.

Tuller, M. and D. Or. 2004. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. Encycl. Soils Environ. 4:278-289.

van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.