

장력 침투계(Disk Tension Infiltrometer)와 van Genuchten-Mualem 모형 적용에 따른 불포화수리 전도도의 비교 해석

허승오* · 정강호 · 박찬원 · 하상건 · 김정규¹

농촌진흥청 농업과학기술원, ¹서울시립대학교

Comparison of Disk Tension Infiltrometer and van Genuchten-Mualem Model on Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity

Seung-Oh Hur*, Kang-Ho Jung, Chan-Won Park, Sang-Keun Ha and Geong-Gyu Kim¹

Soil Management Division, National Institute of Agricultural Science & Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea

¹Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

Hydraulic conductivity is the rate of water flux on hydraulic gradient. The van Genuchten Mualem (VGM) model is frequently used for describing unsaturated state of soils, that is composed with the function of soil water potential and soil water content and requests various parameters. This study is to get the value of VGM parameters used Rosetta computer program based on neural network analysis method and to calculate VGM parameters. VGM parameters included K_o (effective saturated hydraulic conductivity), θ_r (residual soil water content), θ_s (saturated soil water content), L , n and m . The unsaturated hydraulic conductivity at 10 kPa was calculated by using Rosetta program. Unsaturated hydraulic conductivities of 17 soil series at 1, 3, 5, 7 kPa were also obtained by applying saturated hydraulic conductivity by disk tension infiltrometer based on Gardner and Wooding's equation. Water flow at the water potential of 3 kPa was very low except Namgye, Hagog, Baegsan, Sangju, Seogcheon, Yesan soil series. Unsaturated hydraulic conductivity at 1 kPa showed the highest value for Samgag soil series and was in order of Yesan, Hwabong, Hagog and Baegsan soil series. Those of Gacheon, Seocheon and Ugog soil series were very low. When the value by VGM was compared with the value by disc tension infiltrometer, there was a tendency with exponential function to soils without gravel but there was no tendency to soils including gravel. Conclusively, it would be limited that VGM model for unsaturated hydraulic conductivity analysis applies to Korean agricultural land including gravel and having steep slope, shallow soil depth.

Key words : Unsaturated Hydraulic Conductivity, Disk Tension Infiltrometer, van Genuchten Mualem Model, Rosetta Program, Gardner-Wooding Equation

서 언

토양에서 액상과 기상으로 이루어진 공극이 차지하는 비율은 대략 50% 정도로 물이나 가스 등이 이동하는 길 역할을 하게 된다. 특히, 관개나 강우에 의해 공극이 가득 채워지면서 발생하는 물의 이동은 주로 중력에 의존하므로 물의 이동이 자유롭고 쉬운 편이다. 이러한 물의 포화상태에서의 이동 특성이 포화수리전도도(saturated hydraulic conductivity)이며, 불포화상태에서의 물의 흐름특성이 불포화수리전도도(unsaturated hydraulic conductivity)이다. 토양의 수리전도도는 수리구배에 대한 물의 이동량의 척도로 토

양의 수리적 해석에 중요한 특성요소이다. 따라서, 수리전도도를 알 수 있다면 그 토양 내에서의 물의 이동특성을 해석할 수 있으며, 그에 따라 토양 표면이나 내부에서의 물의 정량화나 침투에 따른 토양 내부에서의 물의 거동 규명 및 장기유출현상 규명을 위한 물수지(water balance)의 오차를 현격하게 줄일 수 있을 것이고 유역 내에서 발생하는 수자원의 이동을 동역학적으로 해석할 수 있다.

물의 이동특성을 대변할 수 있는 수리전도도에 영향을 미치는 토양특성은 주로 토양공극의 크기와 형태다. 물이나 공기 등의 이동통로인 공극은 대공극, 소공극, 미세공극으로 분류되나 이들을 구성하는 기본입자의 크기, 유기물 함량이나 구조가 공극을 형성하는 기본이 되므로 수리전도 특성을 파악할 시에는 이러

접수 : 2006. 7. 18 수리 : 2006. 9. 16

*연락처 : Phone: +82312900273,

E-mail: sohur@rda.go.kr

한 토양특성을 파악하는 것이 도움이 된다(Warrick, 2002).

Jung et al.(1980)은 인공강우기를 이용하여 삼각 사양토, 전남 미사질 양토, 송정 식양토 등 3개의 토양에서 포화수리 전도도를 측정 보고한바 있으며, Park and Yoo(1982)는 수리전도도 측정 방법별 비교를 통해 침투계를 이용한 측정과 inverse auger hole 방법간의 유의성이 있음을 보고했다. Ro and Yoo(1984)는 토양수분 특성 분석 장치인 pressure plate extractor 내의 토양수분 함량 변화로부터 불포화 수리전도도를 이론식에 따라 계산하고 측정했다.

보통 수리 전도도의 측정은 실내와 실외에서 이루어지는데, 실외에서의 측정이 시간과 노력투입이 과다한 관계로, Jung et al.(1981)과 Ro and Yoo(1984)의 경우에서처럼 실내실험을 통해 측정이 이루어진다. 그러나, 토양에서 발생하는 물의 이동은 실외에서 벌어지는 현상이며 많은 수문모형들이 실외에서의 수리전도도 자료를 요구하므로 이를 위해서라도 실외에서의 측정 자료가 필요하다. Double ring 침투계는 고전적으로 실외에서 수리전도도나 침투속도를 측정하기 위해 많이 사용하였으나(Jung et al., 1981), 이동을 위한 공간적 제약 및 측정 준비 소요시간과 노력투입의 과다로 인해 많은 자료를 획득할 수 없어 최근에는 장력 침투계를 많이 활용한다(Ankeny et al., 1988; Hussen and Warrick, 1993; Logsdon and Jaynes, 1993; Schwartz and Evett, 2002). 장력 침투계는 토양의 포화수리전도도를 통해 토양으로의 침투속도를 계산하는 것으로서, 이론적으로 불포화수리전도도를 추정할 수 있다. 불포화 수리 전도도는 포화수리 전도도와는 달리 측정 당시의 토양수분 함량이나 에너지 상태에 따라 달라지므로 정량적으로 기술하기가 쉽지가 않아 많은 경우 모형으로서 해석하고 있으며, 그 대표적인 모형이 van Genuchten Mualem (VGM) 모형이다. VGM 모형은 토양수분 포텐셜과 수분함량의 함수로 구성된 모형으로 몇 가지 매개변수가 필요하며 이는 토성이나 토양수분 특성에 따라 달라진다.

따라서, 본 연구에서는 장력침투계로 측정한 포화수리전도도 자료를 활용해 불포화수리전도도를 추정하고, 토양입자 특성과 토양수분 보유특성곡선 자료를 VGM 모형에 적용해 구해진 불포화수리전도도를 비교해 VGM 모형의 유용성을 검증하고자 하였다.

재료 및 방법

토양에서의 관개나 강우에 의해 발생하는 침투현상은 물이 토양표면 경계로부터 토양단면으로 들어가는 현상을 일컫는 것으로서(유, 2000) 포화된 상태에서의

흐름은 포화수리 전도도와 같은 값을 나타낸다. 따라서, 대부분의 침투측정 장치들은 포화수리전도도 값으로 얻어지며, 대표적인 장치로는 double ring 침투계와 장력침투계가 있다. 본 연구에서는 최근에 침투속도 측정을 위해 가장 많이 활용되고 있는 장력침투계를 활용하였으며, 논토양인 남계토를 비롯하여 밭토양, 산림토양을 포함하는 17개의 토양통을 선정하여 측정하였다. 측정에 이용된 장력침투계는 Fig. 1과 같이 디스크의 직경이 20 cm이며 좌측의 water reservoir의 내경과 길이는 5.1 cm, 81 cm 이며, 우측의 bubble tower의 내경은 2.54 cm, 디스크의 아랫면에 부착시키는 bubble membrane의 압력은 수두 30 cm이다. 이것을 포장에 설치할 때는 토양의 표면을 디스크의 직경보다 넓게 평평하게 만들고 그 위에 디스크 membrane과의 접촉을 유지시키는 역할을 하는 금속성 ring을 토양표면 위에 살짝 압력을 가해서 놓은 후 ring 안에 토양표면과의 접촉물질인 세사(fine white silica sand)를 채운다. 세사의 표면을 평평하게 한 후 스프레이로 세사의 표면이 골고루 충분히 젖을 수 있도록 물을 뿌려준다. 이 후 디스크 membrane을 ring의 중앙에 부드럽게 올려놓아 세사와 완전히 밀착하도록 한다. 디스크 membrane은 측정 이전에 물에 완전히 포화시켜 내부에 공기방울이 발생하지 않도록 한다. 측정을 위한 수두(3, 6, 12 cm)는 우측의 bubble tower에서 유지시키며, 좌측의 water reservoir 내의 물의 눈금 높이를 읽어 시간에 따른 물의 높이 변화를 기록하는데 일정한 값을 얻을 때까지 계속 측정한다.



Fig. 1. Disc tension infiltrometer.

이론적 배경 장력 침투계는 다음과 같은 Wooding(1968)의 방정식을 이용하는데, 이것은 일정 면적에서 발생하는 정상류(steady state flow)에 대한

해석이 가능하다.

$$Q = \pi r^2 K_{wet} \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r} \right] \quad (1)$$

여기서, Q는 토양으로 침투된 물의 총량[L³T⁻¹]이고, r은 장력계의 disc 직경(L)이며, K_{wet}은 물을 공급하는 potential에 대응하는 수리전도도[L²T⁻¹]를 나타내며 λ_c는 대공극의 모세관 길이(L)를 나타낸다. 측정에 이용된 것과 같이 단일 디스크를 가진 장력 침투계에서 다양한 값의 포텐셜을 적용하면 제공된 포텐셜에 대응하는 정상류에 대한 수리전도도를 구할 수 있는데 (Lien, 1989; Ankeny et al., 1991; Hussen, 1991; Reynolds and Elrick, 1991), 그 관계는 식 (2)와 같이 매트릭포텐셜을 고려하는 Gardner(1958) 모형을 이용하여 구할 수 있다.

$$K = K_s \exp(\alpha h) \quad (2)$$

여기서, K는 불포화 수리전도도[L²T⁻¹]이고, K_s는 포화 수리전도도[L²T⁻¹]이며, h는 매트릭포텐셜 [L]을 나타내며 α는 λ_c⁻¹과 동일한 값을 갖는 상수[L⁻¹]이다. 여기서, 식 (1)의 K_{wet}에 식 (2)의 K 값을 대입하면 식 (1)은 다음의 식 (3)과 같이 된다.

$$Q = \pi r^2 K_s \exp(\alpha h) \left[1 + \frac{4}{\pi \alpha r} \right] \quad (3)$$

동일한 장소에서 n개의 장력에서의 정상류 측정은 두 개의 변수 K_s와 α를 가진 측정 장력 개수만큼의 방정식을 생산한다. 장력이 2개의 경우엔 식 (3)에 각각의 장력에서 얻어진 값을 대입하고 나누면 미지의 α를 얻을 수 있지만, 본 실험에서는 정확도를 높이기 위해 3개의 장력을 적용하였으며 그 장력 값은 토양특성이나 침투속도에 따라 현장에서 다르게 적용했으나, 기준은 3 cm, 6 cm, 12 cm를 기본으로 했다.

VGM 모형은 토양의 불포화 수리전도도를 추정하는 간접적 방법으로서, 다음의 식 (4)와 같이 유효수분 범위에 대한 현재의 토양수분 상태를 매트릭포텐셜의 비선형 함수로 나타낸 van Genuchten(1980)의 모형과 토양수분 특성곡선으로부터 유추할 수 있는 토양수분 함량의 함수인 불포화 수리 전도도의 포화 수리 전도도와와의 관계를 표현한 식 (5)와 같은 Mualem(1976) 모형이 수치해석에 의해 결합된 것으로서, 상대적 포화도로서 불포화 수리전도도를 표현할 수 있다(식 (6)).

$$\phi = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right]^m \quad (4)$$

여기서, φ는 포화도를 의미하고, θ는 현재의 토양수분 함량, θ_r은 1500kPa에서의 토양수분 함량, θ_s는

포화수분함량을 나타내며, α, n, m은 토양수분특성곡선의 모양에 직접적으로 의존하는 매개변수로서 α는 공기 흡입력의 역함수로서 cm⁻¹으로 표시하고 n은 공극크기 분포에 관한 매개변수로 곡선의 형태와 관련이 있으며 m은 1-1/n의 다른 형태이다.

$$K(\theta) = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^L \left[\frac{\int_{\theta}^{\theta_s} \frac{d\theta}{h(\theta)}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{h(\theta)}} \right]^2 \quad (5)$$

여기서, K(θ)는 불포화 수리전도도, L은 공극의 연결성을 나타내는 매개변수, h(θ)은 토양수분 함량으로 표현되는 포텐셜이다

$$K(\theta) = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^L \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right]^2 \quad (6)$$

식 (6)과 같은 VGM 모형에서는 다양한 매개변수를 필요로 한다. 그러나 이들을 일일이 계산하여 얻어내기란 수월한 일이 아니다. 미 농무성(USDA-ARS)은 이러한 복잡함을 쉽게 계산하기 위해 매개변수만을 생산해 낼 수 있는 모형을 작성해 프로그램으로 만들었다. 따라서, 본 연구에서도 VGM 모형의 매개변수를 얻기 위해 매개변수 계산 프로그램인 Rosetta(Schaap and Bouten, 1996; Schaap et al., 1998)를 사용하였다. Rosetta 모형은 일종의 통계적 분석방법인 신경그물 열개(neural network)를 이용하여 토양의 물리적 자료들인 토성이나 모래, 미사, 점토 함량 또는 용적밀도나 33kPa, 1500kPa에서의 토양수분 함량 자료를 가지고 VGM의 매개변수인 Ko(effective saturated hydraulic conductivity), θ_r(residual soil water content), θ_s(saturated soil water content), L, n, m을 계산해 그 값을 제공하는 프로그램으로 미국 농무성(USDA-ARS)에서 개발했다. 이런 Rosetta에 사용된 신경그물 열개는 Rumelhart et al.(1986)의 "Parallel Distributed Processing"이라는 저서에 제시된 전방향 역전파(feed-forward back propagation) 신경그물 열개로서 사람의 신경구조를 본떠 만들었기 때문에 많은 양의 입력 자료를 분석자료로 활용할 수 있으며, 학습을 통해 입력자료별 가중치를 결정하고 결정된 가중치를 새로운 입력자료에 반영해 원하는 결과를 도출하는 특성이 있다. 이것은 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 사이에 은닉층(hidden layer)이라 부르는 하나 이상의 중간층이 존재하는 계층 구조를 갖는데, 열개는 입력층, 은닉층, 출력층 방향으로 연결되는 전방향의 구조로 Rosetta에서는 2085개의 토양을 입력자료별 가중치 결정을 위한 학습 자료로 사용했다. 본 연구에서는 토양통별로 토성을 분석하여

Table 1. Soil characteristics for application to Rosetta program.

Soil Series	OM	Sand	Silt	Clay	Soil Texture
----- % -----					
Gacheon	1.7	53.1	34.2	12.7	L
Gocheon	1.7	51.0	35.0	14.0	L
Namgye	2.6	69.9	21.7	8.4	SL
Chilgog	1.6	58.5	29.2	12.3	SL
Haggog	1.0	70.1	23.9	6.0	SL
Hoigog	2.3	39.7	34.1	26.2	L
Baegsan	2.0	53.6	32.1	14.3	SL
Sangju	0.8	77.8	13.0	9.2	SL
Seogcheon	2.5	17.4	64.9	17.7	SiL
Suam	1.6	74.8	19.7	5.5	SL
Anryong	1.5	70.0	24.5	5.5	SL
Yesan	0.5	49.6	35.1	15.3	L
Ugog	1.8	41.4	42.3	16.3	L
Jigog	1.4	77.0	16.0	7.0	SL
Pungcheon	2.6	46.4	40.7	12.9	L
Hwabong	0.8	83.6	10.0	6.4	LS
Samgag	3.0	71.2	18.0	10.8	SL

VGM 모형의 매개변수 예측을 위한 새로운 입력 자료로 활용하였다(Table 1).

Pedo-Transfer 함수 일반적으로 측정된 기본 토양자료로부터 토양의 수리적 특성을 예측하는 관계식을 만들어 실험이나 측정을 통하지 않고도 수리특성을 쉽게 표현할 수 있는 시뮬레이션 모형을 pedo-transfer function(PTF)이라하며 매개변수로서는 토성이나 유기물 등의 기본적 토양 자료를 필요로 한다. 대부분의 토양 수리특성 측정기술들이 상대적으로 시간소비형이며 비용이 소모되므로 직접 측정하는 대신에 수리적 특성들을 잘 예측하는 PTF를 활용하면 시간과 비용을 절약하는 등의 긍정적 결과를 얻을 수 있다(Cornelis et al., 2001). 식 (7)과 (8)은 그런 특성을 가진 PTF를 모래와 미사 및 유기물 함량의 함수로 엄 등(1995)이 우리나라의 토양을 분석하여 작성한 것이다. 이것들은 모래, 미사 및 유기물 함량을 알면 토양 수분 장력 10kPa과 1500kPa에서의 토양수분 함량을 예측할 수 있다. 식 (7)과 (8)의 PTF로 예측한 토양 수분 함량은 중량수분 함량이므로 이것을 용적수분 함량으로 변화해 주어야 하는 절차가 필요하지만 토양수분을 직접 측정하지 않고 토성분석 자료만으로도 수분 함량을 예측할 수 있는 장점이 있다. 이 PTF를 이용한 실측치와 추정치간의 상관관계는 0.85($P < 0.01$)로 고도의 상관관계를 보이며 1:1 line에 매우 근접하게 분포하고 있다고 엄 등(1995)은 보고하고 있다.

$$\theta_{10kPa} = 26.8 - 3.99\ln(S) + 2.36\sqrt{Si} + 2.88(OM) \quad (7)$$

$$\theta_{1500kPa} = 15.75 - 2.86\ln(S) + 0.55\sqrt{Si} + 0.7(OM) \quad (8)$$

결과 및 고찰

장력 침투계에 의한 불포화 수리전도도 토양 내에 존재하고 있는 토양수분 함량의 영향을 받는 불포화 수리전도도는 토양종류별로 토양수분 특성곡선에 의해 에너지로 변환된 토양수분 포텐셜의 함수로 표시할 수 있으므로 포화수리 전도도 측정을 위해 이용한 장력 침투계의 침투 유량 측정결과와 Gardner와 Wooding 모형을 조합한 식 (3)을 이용해 불포화수리 전도도를 추정하였다. 포화수리전도도 측정을 위해 선정된 토양은 17개였는데, 가천통을 비롯한 6개의 논 토양과 백산통을 비롯한 10개의 밭토양 및 산림토양인 삼각통이 그 대상이었다. 수두가 대략 1,000 cm 이면 수분 potential이 100 kPa이므로 수두높이를 10, 30, 50, 70 cm로 했을 때의 장력은 1, 3, 5, 7 kPa과 동일한 값이고, 이런 potential에서의 수리전도도는 다음의 Table 2와 같다. 토양수분 potential이 3 kPa에 이르면 6개 토양의 수리전도도가 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 이하의 값을 보여 중력에 의한 물의 이동이 거의 없음을 보였으나 남계통을 비롯한 11개의 토양은 약간의 물의 이동이 있음을 알 수 있는데 이는 모암이 화강 편마암인 관계로 토양 내에 물의 이동에 영향을 미치는 자갈의 함량이 높았기 때문일 것으로 생각되고 추후의 연구에서는 이 부분에 대한 내용도 검토되어야 할 것이다. 5 kPa에서는 4개의 토양을 제외한 13개의 토양이, 7 kPa에서는 모든 토양의 수리전도도가 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{day}^{-1}$ 이하의 값을 보였다. 남계, 학곡, 백산통의 경우는 포화수리 전도도가 다른 토양에 비해 크지 않음에도 불구하고 7 kPa에 이르기까지 약

Table 2. Unsaturated hydraulic conductivity estimated by disc tension infiltrometer.

Soil Series	Land Use	Ks	α	1 kPa	3 kPa	5 kPa	7 kPa
		cm · sec ⁻¹	cm ⁻¹	----- cm · sec ⁻¹ -----			
Gacheon	Paddy Land	2.8 × 10 ⁻⁴	0.37	0.7 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Gocheon	"	6.3 × 10 ⁻⁴	0.34	2.0 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Namgye	"	1.8 × 10 ⁻⁴	0.13	4.7 × 10 ⁻⁵	3.2 × 10 ⁻⁶	2.2 × 10 ⁻⁷	1.5 × 10 ⁻⁸
Chilgog	"	2.7 × 10 ⁻⁴	0.27	1.8 × 10 ⁻⁵	0.1 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Haggog	"	5.1 × 10 ⁻⁴	0.13	13.9 × 10 ⁻⁵	10.5 × 10 ⁻⁶	7.9 × 10 ⁻⁷	5.9 × 10 ⁻⁸
Hoigog	"	8.8 × 10 ⁻⁴	0.26	6.8 × 10 ⁻⁵	0.4 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Baegsan	Upland	5.3 × 10 ⁻⁴	0.15	11.9 × 10 ⁻⁵	6.0 × 10 ⁻⁶	3.0 × 10 ⁻⁷	1.5 × 10 ⁻⁸
Sangju	"	5.8 × 10 ⁻⁴	0.17	10.7 × 10 ⁻⁵	3.7 × 10 ⁻⁶	1.3 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Seogcheon	"	0.3 × 10 ⁻⁴	0.13	1.0 × 10 ⁻⁵	0.7 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Suam	"	68.1 × 10 ⁻⁴	0.64	1.1 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Anryong	"	15.7 × 10 ⁻⁴	0.37	3.9 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Yesan	"	14.0 × 10 ⁻⁴	0.22	15.7 × 10 ⁻⁵	2.0 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Ugog	"	2.7 × 10 ⁻⁴	0.35	0.8 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Jigog	"	5.2 × 10 ⁻⁴	0.34	1.3 × 10 ⁻⁵	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Pungcheon	"	12.3 × 10 ⁻⁴	0.30	5.8 × 10 ⁻⁵	0.1 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Hwabong	"	65.3 × 10 ⁻⁴	0.38	14.5 × 10 ⁻⁵	0.1 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸
Samgag	Forest	132.2 × 10 ⁻⁴	0.35	40.8 × 10 ⁻⁵	0.4 × 10 ⁻⁶	<1.0 × 10 ⁻⁷	<1.0 × 10 ⁻⁸

간의 물의 흐름이 존재함을 알 수 있었다. 또한, 1 kPa에서 물의 이동은 삼각통에서 $40.8 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 로 이동 속도가 가장 컸으며 그 뒤로 예산, 화봉, 학곡, 백산통 등이 빠른 속도로 이동하였다. 가천통이나 석천통 및 우곡통은 1 kPa에서의 이동 속도가 아주 느린 토양으로 판단되었다.

VGM 모형에 의한 불포화 수리전도도 추정 VGM 모형은 토양의 불포화수리전도도를 추정하는 간접적 방법으로서, 식 (6)과 같이 토양수분의 상대적 포화도

로서 불포화수리전도도를 추정할 수 있으나 여러 개의 매개변수가 필요해 토양수분 함량만으로는 계산이 어렵다. 신경그물알개를 기반으로 한 Rosetta 프로그램은 그런 매개변수를 추정해주는데 본 연구에서는 토양통별 입도분석 자료를 새로운 입력자료로 활용하였다. 모래, 미사 점토 함량을 Rosetta의 입력자료로 사용해 매개변수를 추정한 결과 1500kPa에서의 토양수분 함량을 나타내는 θ_r 은 용적수분 함량이 토양종류별로 안룡통의 3.4%에서부터 회곡통의 7.2%까지의 분포를 보여주고 있으며, 포화 토양수분 함량인 θ_s

Table 3. VGM(van Genuchten Mualem) parameters by Rosetta.

Soil Series	θ_r	θ_s	α	n	K_o	L	m=1-1/n
	(cm ³ · cm ⁻³)	(cm ³ · cm ⁻³)	cm ⁻¹		cm · sec ⁻¹		
Gacheon	0.0472	0.3898	0.0171	1.4328	0.9 × 10 ⁻⁴	-0.6324	0.3020891
Gocheon	0.0500	0.3914	0.0155	1.4418	0.8 × 10 ⁻⁴	-0.5696	0.3064145
Namgye	0.0395	0.3863	0.0359	1.4342	2.6 × 10 ⁻⁴	-1.1018	0.3027316
Chilgog	0.0459	0.3875	0.0230	1.4041	1.3 × 10 ⁻⁴	-0.9120	0.2878032
Haggog	0.0352	0.3895	0.0379	1.4451	3.0 × 10 ⁻⁴	-1.0589	0.3080097
Hoigog	0.0723	0.4163	0.0130	1.4279	0.5 × 10 ⁻⁴	-0.6051	0.2996744
Baegsan	0.0503	0.3901	0.0182	1.4213	0.9 × 10 ⁻⁴	-0.7366	0.2964418
Sangju	0.0454	0.3813	0.0367	1.5631	2.7 × 10 ⁻⁴	-1.0084	0.3602652
Seogcheon	0.0673	0.4370	0.0047	1.6626	0.2 × 10 ⁻⁴	0.3642	0.3985493
Suam	0.0362	0.3886	0.0416	1.5230	3.6 × 10 ⁻⁴	-1.0061	0.3434013
Anryong	0.0340	0.3906	0.0385	1.4474	3.1 × 10 ⁻⁴	-1.0486	0.3091242
Yesan	0.0528	0.3929	0.0146	1.4461	0.7 × 10 ⁻⁴	-0.5466	0.3084876
Ugog	0.0558	0.3999	0.0089	1.5198	0.4 × 10 ⁻⁴	-0.1032	0.3420392
Jigog	0.0405	0.3850	0.0398	1.5635	3.3 × 10 ⁻⁴	-0.9903	0.3604125
Pungcheon	0.0484	0.3940	0.0109	1.4925	0.5 × 10 ⁻⁴	-0.2082	0.3299611
Hwabong	0.0457	0.3811	0.0371	1.8634	3.2 × 10 ⁻⁴	-0.8685	0.463339
Samgag	0.0445	0.3833	0.0350	1.4338	2.3 × 10 ⁻⁴	-1.1481	0.302571

도 용적수분함량으로 화봉통의 38.1%부터 석천통의 43.7%까지 분포한다. 포장에서의 포화 수리전도도를 나타내는 유효포화수리 전도도 K_o 는 석천통의 $0.2 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{day}^{-1}$ 부터 수암통의 $3.6 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{day}^{-1}$ 까지 다양한 범위의 값을 보여주고 있다. 유효포화 수리전도도의 값이 가장 작은 석천통은 유효수분 범위가 가장 넓어 이것이 수리전도도가 작아지는 요인으로 작용했을 것으로 여겨진다. 공극의 연결성을 나타내는 매개변수인 L 값은 모든 토양이 음의 값을 보였으며, 공극 크기분포에 대한 매개변수인 n 은 화봉통이 1.8634로 가장 컸으며 칠곡통이 1.4041로 가장 작았다. 공기 흡입력과 관련이 있는 α 는 석천통이 0.0047로 가장 작았으며 수암통이 0.0416으로 가장 큰 값을 보였다(Table 3).

토양수분 특성을 예측하는 Rosetta는 복미와 유럽의 토양을 분석대상(Givi et al., 2004)으로 하고 있기 때문에 이것으로 추정된 값들이 우리나라 토양에 적합한지의 여부를 살펴보는 것도 VGM 모형의 적용 가능성을 판단하는 한 측면이 될 수 있다. Fig. 2은 엄 등(1995)에 의해 만들어진 토양수분장력 1500 kPa에서 PTF(식 (7))를 이용해 예측한 토양 수분함량과 Rosetta에 의해 추정된 토양수분 함량(θ_r) 간의 비교 결과를 보여주고 있는데, Warrick(2002)은 잔여수분 함량인 θ_r 은 토양수분 장력 1500 kPa에서의 수분함량으로부터 얻어진다고 보고하고 있어 이와 같은 비교는 의미가 있다. 여기서, 논토양은 결정계수가 0.8851로서 비교적 잘 맞고 있으며, 밭토양의 경우도 결정계수가 0.6657로 논토양의 값보다는 작지만 토양수분 함량이 조금 높은 곳에서는 비교적 잘 맞고 있음을 보여주고 있다. 따라서, Rosetta로 예측한 매개변수 값들의 우리나라 토양에의 적용 가능성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

Rosetta의 적용 가능성을 판별하고 매개변수 값을

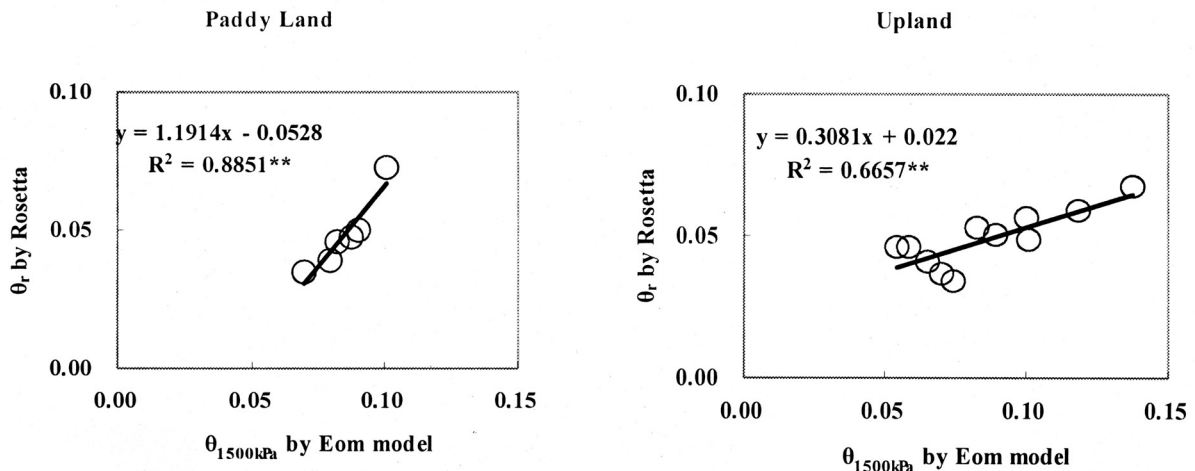


Fig. 2. Comparison of Rosetta parameters and PTF.

구했다면, 그 매개변수들을 이용해 식 (4)에 제시되어 있는 van Genuchten (VG) 모형에 적용해 토양수분 포텐셜에 따른 토양수분 함량을 예측할 수 있다. 식 (4)는 토양수분 함량과 포텐셜의 함수로 되어 있는 모형이기 때문에 그 토양의 토양수분 장력이나 포텐셜을 알면 토양수분 함량을 알 수 있으며, 그 반대의 경우도 성립된다. 따라서 이렇게 예측할 수 있는 값과 우리나라 토양의 수분특성을 측정해서 만든 PTF를 비교해보면 식 (4)의 유용성 정도도 판단할 수 있다. Fig. 3는 불포화 상태인 10kPa에서 엄 등(1995)에 의한 PTF(식 (8))로 예측한 토양수분 함량과 식 (4)로 예측한 값과의 관계를 나타낸 것이다. 엄 등(1995) 등의 PTF와 VG 모형에 의한 예측 값들이 1:1선에 거의 부합되게 나타나고 있는데 이것은 토양수분 포텐셜에 따른 토양수분 함량 예측에 대한 VG 모형의 유용성을 의미하므로, 식엄 등(1995)에 의해 PTF가 만들어진 10 kPa(식 (7))이나 1500 kPa(식 (8))이외의 토양수분 포텐셜에서는 이를 이용해 토양수분 함량을 예측할 수 있을 것이다.

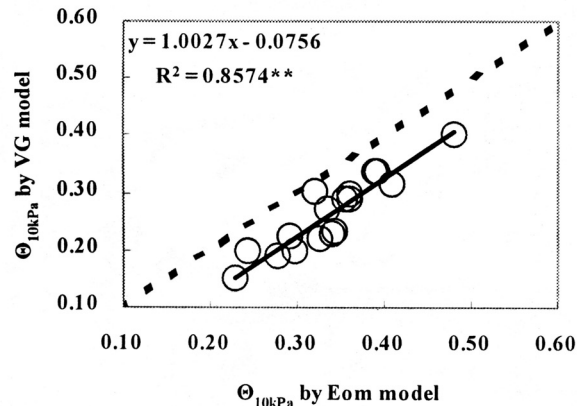


Fig. 3. Comparison of soil water content by estimated VG model and PTF.

Rosetta에 의한 매개변수 이용 가능성과 VG 모형의 유용성을 판단했다면, 식 (6)에 이들을 적용해 VGM 모형에서의 수리전도도를 구할 수 있다. 불포화 상태인 10kPa에서 수리전도도를 PTF로 구한 수분 함량을 식 (6)에 적용한 것과 식 (4)를 나타내는 VG 모형으로 구한 수분함량을 식 (6)에 대입해 구한 값을 비교했을 때(Table 4), VG 모형으로 얻어진 토양수

분 함량을 VGM에 적용해서 구한 불포화수리전도도의 편차가 크지 않은 범위 내에서 모든 토양이 어느 정도 물의 흐름이 있음을 보여주고 있으나, PTF로 구한 수분함량을 VGM에 적용해서 구한 불포화수리전도도는 VG에서 구한 값들보다 편차도 크면서, 값이 계산되지 않는 토양통들(석천, 지곡, 풍천, 삼각)이 존재한다. 이것은 예측 값의 정확성을 언급하기 이전에 불포화수리전도도 특성평가에 대한 VGM 모형의 적용성을 떨어뜨리는 결과를 나타내고 있다.

Table 4. Unsaturated hydraulic conductivity estimated with θ_{10kPa} by VG & PTF applied to VGM.

Soil Series	PTF [†]	VG [‡]
	----- cm · sec ⁻¹ -----	
Gacheon	0.86×10^{-5}	0.13×10^{-5}
Gocheon	0.89×10^{-5}	0.14×10^{-5}
Namgye	1.93×10^{-5}	0.10×10^{-5}
Chilgog	0.66×10^{-5}	0.10×10^{-5}
Haggog	0.66×10^{-5}	0.10×10^{-5}
Hoigog	0.58×10^{-5}	0.12×10^{-5}
Baegsan	1.03×10^{-5}	0.12×10^{-5}
Sangju	0.37×10^{-5}	0.12×10^{-5}
Seogcheon	-	0.35×10^{-5}
Suam	1.41×10^{-5}	0.10×10^{-5}
Anryong	1.55×10^{-5}	0.10×10^{-5}
Yesan	0.23×10^{-5}	0.14×10^{-5}
Ugog	1.31×10^{-5}	0.21×10^{-5}
Jigog	-	0.10×10^{-5}
Pungcheon	-	0.19×10^{-5}
Hwabong	0.99×10^{-5}	0.13×10^{-5}
Samgag	-	0.10×10^{-5}

[†] Pedo-Transfer Function

[‡] Van Genuchten

불포화 수리전도도의 비교 장력 침투계로 구한 포화수리전도도는 Gardner 모형인 식 (2)에 대입해 불포화수리전도도를 구할 수 있다. 불포화수리전도도 측정에 대한 현장평가나 실험실에서의 평가는 어렵기 때문에 이렇게 구한 불포화수리전도도는 지금과 같은 측정 상황에서는 매우 유용하다. 따라서 이런 자료와 앞에서 언급한 VGM에 의해 예측한 값을 비교해 보는 것도 VGM 모형의 적용성 평가와 Gardner 모형의 확장성에도 도움이 될 것이다. Gardner 모형에 의한 값은 이미 Table 1에서 제시되어 있지만, 이 값들이 현재 수리특성 해석에 가장 많이 이용되고 있는 VGM 모형에 의한 값과 우리나라 토양에서 어떤 관련이 있을지에 대해서는 관련 연구가 없다. 따라서 이에 관한 분석이 필요하며 Table 5는 그런 필요성에 따라 Gardner 모형과 VGM 모형에 의해 구해진 1, 3, 10 kPa에서의 불포화수리전도도 값을 비교한 것이다. 장력 침투계로 구한 포화수리전도도를 (2)의 Gardner 식에 대입해 얻어진 결과는 3 kPa에서 토양수분 이동

Table 5. Comparison of unsaturated hydraulic conductivity by Gardner & VGM model.

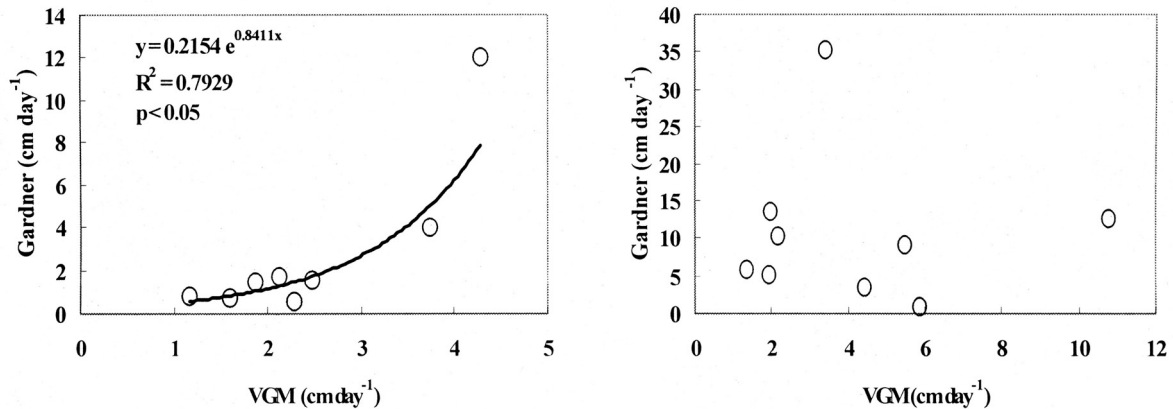
Soil Series	Land Use	Gravel (%)	1 kPa		3 kPa		10 kPa	
			(cm · sec ⁻¹)		(cm · sec ⁻¹)		(cm · sec ⁻¹)	
			Gardner	VGM	Gardner	VGM	Gardner	VGM
Gacheon	Paddy Land	0.5	0.7×10^{-5}	2.7×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.3×10^{-6}
Gocheon	"	0.7	2.0×10^{-5}	2.5×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	0.9×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.4×10^{-6}
Namgye	"	0	4.7×10^{-5}	4.3×10^{-5}	3.2×10^{-6}	1.0×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	0.9×10^{-6}
Chilgog	"	0	1.8×10^{-5}	2.9×10^{-5}	0.1×10^{-6}	0.8×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-6}
Haggog	"	0	13.9×10^{-5}	5.0×10^{-5}	10.5×10^{-6}	1.1×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-6}
Hoigog	"	3.9	6.8×10^{-5}	1.6×10^{-5}	0.4×10^{-6}	0.7×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.2×10^{-6}
Baegsan	Upland	6.4	11.9×10^{-5}	2.5×10^{-5}	6.0×10^{-6}	0.9×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.2×10^{-6}
Sangju	"	5.0	10.7×10^{-5}	6.4×10^{-5}	3.7×10^{-6}	1.4×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.2×10^{-6}
Seogcheon	"	0	1.0×10^{-5}	1.4×10^{-5}	0.7×10^{-6}	0.9×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	3.5×10^{-6}
Suam	"	22.5	1.1×10^{-5}	6.8×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.4×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-6}
Anryong	"	8.2	3.9×10^{-5}	5.1×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.1×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-6}
Yesan	"	7.5	15.7×10^{-5}	2.3×10^{-5}	2.0×10^{-6}	0.9×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.4×10^{-6}
Ugog	"	0	0.8×10^{-5}	1.9×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	2.1×10^{-6}
Jigog	"	0	1.3×10^{-5}	2.2×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.5×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	0.9×10^{-6}
Pungcheon	"	22.5	5.8×10^{-5}	2.3×10^{-5}	0.1×10^{-6}	1.1×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.9×10^{-6}
Hwabong	"	22.8	14.5×10^{-5}	2.1×10^{-5}	0.1×10^{-6}	2.6×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	1.3×10^{-6}
Samgag	Forest	11.4	40.8×10^{-5}	4.0×10^{-5}	0.4×10^{-6}	1.0×10^{-5}	$<1.0 \times 10^{-7}$	0.9×10^{-6}

이 몇 개의 토양을 제외하고는 거의 없는 반면 VGM 모형의 경우는 10kPa에서도 어느 정도의 토양수분의 이동을 보임으로서 현장 측정 결과를 활용한 Gardner 모형과 큰 차이점을 보여주고 있다. 이런 차이는 구조, 토양깊이, 자갈함량 등이 영향을 미치는 것으로 여겨지는데 Fig. 4는 그러한 영향을 보여주고 있다. Fig. 4의 (a)는 Table 5에 나와 있는 불포화수리전도도 값 중에서 토양표면에 자갈을 포함하고 있지 않은 토양에서의 1k Pa에서의 Gardner와 VGM 모형에 의한 불포화수리전도도를 비교한 것이고, (b)는 자갈을 포함하고 있는 토양에서의 불포화 수리전도도를 비교한 것이다. (a)에서 알 수 있듯이 자갈이 없는 토양에서는 VGM 모형에 의해 예측한 값은 수분장력계로 측정해서 Gardner로 해석한 값과 일정한 경향(exponential 함수)을 보여주는 반면 자갈이 있는 토양에서는 경향을 찾을 수가 없었다. 이것은 앞에서 언급했듯이 VGM 모형의 예측 값에 자갈함량이 영향을 미치고 있음을 의미하며, 이런 결과는 VGM을 만든 실험적 결과들이 우리나라 토양과는 다른 특성을 가진 토양들을 대상으로 했기 때문으로 여겨진다. 즉, 우리나라와 같이 경사지가 많고 토심이 깊지 않으면서 자갈함량이 많은 토양에서는 수리적 특성을 예측하는 VGM 모형을 적용하는데 있어 한계가 있을 것으로 판단된다.

요 약

수리 전도도는 수리구배에 대한 플럭스의 비율을 나타내며, 포화된 토양에서의 물의 이동이 포화수리 전도도이고 불포화된 토양에서의 이동이 불포화수리 전도도이다. 일반적인 발 상태에서의 토양수분 조건은 불포화수리전도도로 표시하는 것이 적절하나 그

상태를 표현하기가 쉽지 않다. 토양의 불포화 상태를 나타내는데 가장 많이 쓰이고 있는 VGM(van Genuchten Mualem) 모형은 토양수분 포텐셜과 수분 함량의 함수로 구성된 모형이며 몇 가지 매개변수가 필요하다. VGM 모형의 매개변수를 얻기 위해 본 연구에서는 VGM 모형의 매개변수를 계산해주는 프로그램인 Rosetta를 사용하였다. Rosetta 모형은 신경그물 열개(neural network)를 이용하여 토양의 물리적 자료들인 토성이나 모래, 미사, 점토 함량 또는 용적 밀도나 33 kPa, 1500 kPa에서의 토양수분 함량 자료를 가지고 VGM의 매개변수인 K_0 (effective saturated hydraulic conductivity), θ_r (residual soil water content), θ_s (saturated soil water content), L , n , $m(=1-1/n)$ 을 예측하는 모형으로 미국 농무성(USDA-ARS)에서 개발한 프로그램이다. Rosetta를 이용하여 10kPa에서의 불포화수리전도도를 예측하였다. 또한 Gardner와 Wooding의 모형을 기반으로 하여 만들어진 장력침투계의 포화수리전도도 값을 Gardner 식에 적용하여 1, 3, 5, 7 kPa에서의 불포화수리전도도 값을 17개 토양통을 대상으로 하여 구했다. 토양수분 potential이 3 kPa에서는 물의 이동이 거의 없는 토양들이 있었는데 반해 남계통을 비롯한 학곡통, 회곡통, 백산통, 상주통, 석천통, 예산통 등 7개의 토양은 3 kPa에서도 약간의 물의 이동이 있었다. 또한, 1 kPa에서 물의 이동은 삼각통에서 $40.8 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 로 이동 속도가 가장 컸으며 그 뒤로 예산통, 화봉통, 학곡통, 백산통 등이 토양에서 빠른 속도로 이동하였다. 가천통이나 석천통 및 우곡통은 1 kPa에서의 이동 속도가 아주 느린 토양으로 판단되었다. PTF와 VG모형에 의해 얻어진 10 kPa에서의 수분함량 예측 값을 VGM 모형에 적용해 불포화수리전도도를 구했을 때, VG모형에 의한 예측 값은 존재하는 반면 PTF에 의



(a) No gravel on surface

(b) Gravel on surface

Fig. 4. Comparison of unsaturated hydraulic conductivity by Gardner & VGM at 1 kPa.

한 값은 결국 값이 존재해 그 적용에 한계가 있었다. 그리고 1 kPa에서 불포화 수리전도도를 VGM 모형으로 예측한 값과 측정된 값을 Gardner 모형으로 해석한 값을 비교했을 때 자갈이 없는 토양에서는 일정한 경향(exponential 함수)이 존재한 반면, 자갈이 있는 토양에서는 경향을 발견할 수가 없었다. 이상의 결과로 불포화 수리전도도 특성평가에 대한 VGM 모형의 적용성을 살펴보았을 때는 우리나라와 같이 경사지가 많고 토심이 깊지 않으면서 자갈함량이 많은 토양에서는 한계가 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1988. Design for automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:893-896.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1991. Simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:467-470.
- Cornelis, W.M., J. Ronsyn, M.V. Meirvenne, and R. Hartmann. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:638-648.
- Eom, K.C., G.C. Song, G.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28:227-232.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85:228-232.
- Givi, J., S.O. Prasher, and R.M. Patel. 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agricultural Water Management.* 70:83-96.
- Hussen, A.A., and A.W. Warrick. 1991. Measurement of unsaturated hydraulic conductivity in the field. Ph.D. Dissertation, p.150, Univ. of Arizona, Tucson.
- Hussen, A.A., and A.W. Warrick. 1993. Alternative analyses of hydraulic data from disc tension infiltrometer. *Water Resources Research.* 29:4103-4108.
- Jung, Y.S., G.S. Ryu, and J.N. Im. 1980. Infiltration rate of some upland soil in Korea. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 13:1-6.
- Jung, Y.S., L.Y. Kim, and J.N. Im. 1981. One dimensional heat flow equation incorporated with the vertical water flow on paddy soils - I. An analytical solution and its application to two different paddy soils with different percolation rates. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 14:179-184.
- Lien, B. 1989. Field measurement of soil soptivity and hydraulic conductivity, M.S. Thesis, p.93, Univ. of Arizona, Tucson.
- Logsdon, S.D., and D.B. Jaynes. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1426-1431.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research.* 12:593-622.
- Park, M.E., and S.H. Yoo. 1982. A comparison of soil hydraulic conductivities determined by three different methods in a sandy loam soil. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 16:14-19
- Reynolds, W.D., and D.E. Elrick. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:633-639.
- Ro, H.M., and S.H. Yoo. 1984. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity from soil moisture changes in Pressure-Plate extractor. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 17:7-11.
- Rumelhart, D.E., McClelland J.L., and the PDP Research Group. 1986. *Parallel Distributed Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition.* Vol.1. MIT Press, Cambridge, USA
- Schaap, M.G., and W. Bouten. 1996. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. *Water Resour. Res.* 32:3033-3040.
- Schaap, M.G., Leij F.J., and van Genuchten M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:847-855.
- Schwartz, R.C., and S.R. Evett. 2002. Estimating hydraulic properties of a fine-textured soil using a disc infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:409-1423.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Warick A.W. 2002. *Soil physics companion.* p.37, 75-76. CRC Press LLC. Boca Raton. USA
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from shallow circular pond, *Water Resources Research.* 4:1259-1273.
- Yoo, S.H. 2002. *Soil encyclopedia.* Seoul National University Press. Seoul, Korea