

인위적으로 변경된 토양에서의 수분보유특성 해석 모형의 적용

허승오 · 전상호¹ · 한경화¹ · 조희래¹ · 손연규¹ · 하상건^{1*} · 김정규² · 김남원³

농촌진흥청 연구정책국, ¹국립농업과학원, ²고려대학교, ³한국건설기술연구원

Application of Analysis Models on Soil Water Retention Characteristics in Anthropogenic Soil

Seung-Oh Hur, Sang-Ho Jeon¹, Kyung-Hwa Han¹, Hee-Rae Jo¹, Yeon-Kyu Sonn¹,
Sang-Keun Ha^{1*}, Jeong-Gyu Kim², and Nam-Won Kim³

Research Policy Bureau, RDA, Suwon 441-707, Korea

¹National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

²Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³Division of Wader Resources Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-1, Korea

This study was conducted to assess the propriety of models for soil water characteristics estimation in anthropogenic soil through the measurement of soil water content and soil water matric potential. Soil profile was characterized with four different soil layers. Soil texture was loamy sand for the first soil layer (from soil surface to 30 cm soil depth), sand for the second (30~70 cm soil depth) and the third soil layers (70~120 cm soil depth), and sandy loam for the fourth soil layer (120 cm < soil depth). Soil water retention curve (SWRC), the relation between soil water content and soil water matric potential, took a similar trend between different layers except the layer of below 120 cm soil depth. The estimation of SWRC and air entry value was better in van Genuchten model by analytical method than in Brooks-Corey model with power function. Therefore, it could be concluded that van Genuchten model is more desirable than Brook-Corey model for estimating soil water characteristics of anthropogenic soil accumulated with saprolite.

Key words: Anthropogenic soil, Soil water retention curves, Van Genuchten model

서 언

토양에서 액체상과 기체상으로 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. 그러나, 중력수가 아닌 상황에서의 물의 이동은 물의 보유특성과 밀접한 관련이 있다. 물의 보유특성은 토양수분 특성곡선을 이용해 파악하게 되는데, 토양수분 특성곡선이란 토양수분 퍼텐셜에 대한 토양수분 함량과의 관계를 나타내는 곡선이다. 이를 통해 토양수분 함량이 가지는 에너지와 관련된 물리적 의미를 파악할 수 있다. 특히, 이것을 바탕으로 토양이 가지는 토양수분 보유능이나 불포화 상태의 판단 등을 수행할 수 있어 많은 수문모형

에는 이와 관련된 관계식이 삽입되어 있다. 따라서, 이들을 유추할 수 있는 다양한 관계식이 존재하는데, Brooks and Corey (1964), Mualem (1976), van Genuchten (1980), McCuen et al. (1981), Rawls and Brakensiek (1989) 등의 모형이 대표적이다. 특히, Brooks-Corey와 van Genuchten의 모형이 많이 활용되는데, Brooks-Corey 모형은 상대적 토양수분 포화도를 공기유입가 (air entry value)와 공극크기 분포함수로 나타낸 것이며, van Genuchten 모형은 토양수분 함량과 토양수분 퍼텐셜 사이의 비선형적 관계를 해석학적 방법을 이용해 이산된 측정 자료를 연속된 곡선으로 추정하는 것이다. 이들 모형은 수자원량 산정을 위한 SCS (Soil Conservation Service, USDA) CN (Curve Number) 계산 과정에서 토양단면 내의 수분 보유 인자 (retention parameter) 산출을 위한 토양수분함량을 추정하는데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 이 두 개의 모형을 인위적으로 적토(積土)된 토양의 토양수분 보유특성 해석에 적용해보고 두 모형의 유용성을 검증했다.

접수 : 2010. 11. 17 수리 : 2010. 12. 20

*연락처 : Phone: +82312900337

E-mail: ha0sk@korea.kr

재료 및 방법

대상토양 특성 본 연구를 위한 측정대상 토양은 충청북도 음성에 위치한 국립원예특작과학원 산하의 인삼특작부 구내 포장에 위치하고 있다. 시험토양은 인삼 재배를 위해 논토양 위에 점토가 섞인 석비레를 평균적으로 약 1.2 m 정도로 쌓아 밭으로 전환한 토양이다. 원래 토양은 논토양인 예천토로 층위별 토양 입도분포와 토성은 Table 1에 나타나 있으며, GPS로 측정된 위치는 북위 36° 56'597", 동경 127° 45'066"이다. 보수력은 0~10 KPa범위에서 Sand box 방법으로 측정했고, 10~1,500 kPa범위에서는 Pressure plate 방법으로 측정했다. 이 두개의 측정방법은 모두 응달진 그늘에서 바람에 의해 건조된 시료를 용적밀도 (bulk density)를 고려해 수분함량 측정용 원통형 용기에 충진시키고, 이 용기를 물에 담아 포화시킨 후 측정하고자 하는 압력을 가해 평행이 된 후 토양에 남아 있는 수분 함량을 측정하는 방법이다.

보수력 특성 해석을 위한 해석 모형 토양의 수분 보유력은 토양수분 퍼텐셜과 토양수분 함량의 관계를 표현해 주는 토양수분 특성곡선 (soil water characteristics curve)을 이용해 해석하는 것이 일반적이며, 이런 해석은 연구자들의 연구결과에 따라 다양한 모형으로 제시되는데 (Brooks and Corey, 1964; Mualem, 1976; van

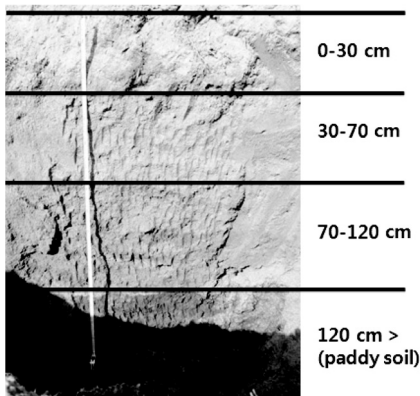


Fig. 1. Soil profile of studied site.

Genuchten, 1980; McCuen et al., 1981; Rawls and Brakensiek, 1989), 본 연구에서는 현재까지도 토양수분 특성곡선 해석에 가장 많이 활용되고 있는 van-Genuchten 모형과 Brooks-Corey 모형을 택해 분석에 활용했다.

van Genuchten (VG) 모형 토양수분 함량과 토양수분 퍼텐셜 사이에는 비선형적 관계가 존재하는데, 이를 해석학적 방법을 이용하면 이산된 측정 자료를 연속된 곡선으로 추정할 수 있다. 이러한 해석학적 추정방법 중에서 가장 광범위하게 사용되는 것은 van Genuchten (1980) 모형으로 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \Psi_m)^n} \right)^m \tag{1}$$

여기서, Θ 는 상대적 토양수분 포화도를 나타내며, θ 는 현재의 토양수분 함량, θ_s 는 포화된 토양수분함량, θ_r 은 잔여 수분함량으로서 1,500 kPa에서의 토양수분 함량을 나타낸다. Ψ_m 은 단위가 kPa이나 cm로 표현되며 토양수분 메트릭 퍼텐셜 (matric potential)을 나타내고, α 는 공기흡입가의 역함수 (cm^{-1})를 의미한다. n 은 공극크기분포에 관한 매개변수로서 곡선의 형태와 관련이 있으며, m 은 $1 - (1/n)$ 이고, n 은 1보다 큰 값을 갖는다.

Brooks-Corey (BC) 모형 토양수분 특성곡선 전 구간을 추정하는 데 있어 VG 모형보다 효용성이 떨어진다고 알려져 있는 Brooks-Corey 모형 (1964)은 상대적 토양수분 포화도를 공기유입가 (air entry value)와 공극크기 분포함수로 나타낸 것으로, 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi_m} \right)^\lambda \tag{2}$$

여기서, Ψ_b 는 공기 유입가 (AEV, air entry value)에서의 메트릭 퍼텐셜을 나타낸 것으로, 공기유입가는 물로 포화된 토양에서 흡인력을 매우 작은 값에서부터

Table 1. Soil particle size distribution and soil texture at each soil layer.

Soil Depth (cm)	Particle Size Distribution (%)			Soil Texture
	Sand	Silt	Clay	
0~30	85.5	9.9	4.6	LS
30~70	87.6	8.0	4.4	S
70~120	87.1	9.9	3.0	S
120<	70.0	21.4	8.6	SL

서서히 높여 가면 일정 임계지점에서 공기가 유입되면서 물이 빠지게 되는데, 이 임계치를 나타내는 용어이다. Ψ_m 은 VG 모형에서처럼 토양수분 매트릭 퍼텐셜을 의미한다. λ 는 공극크기와 관련한 지수를 나타낸다.

결과 및 고찰

토양수분 특성곡선 토양수분 함량과 토양수분 장력 또는 매트릭 퍼텐셜의 관계로 표현되는 토양수분 특성곡선은 다음의 Fig. 2에 나타나 있다. 일반적으로 토성별 토양수분 보유 특성은 사토 (sandy soil)보다는 양토 (loamy soil)나 식토 (clayey soil)에서 높다 (Eom et al., 1995). Table 1의 토성분석에 따르면 0~30 cm 층위는 양질사토이고, 30~70 cm와 70~120 cm는 사토이며, 120 cm 이하는 사양토로 분류되는바 Eom et al. (1995)의 논리에 따르면 30~70 cm와 70~120 cm 층위의 보수력이 가장 낮고, 그 다음은 0~30 cm 층위, 가장 높은 것은 120 cm 이하 층위에 분포하는 토양이어야 한다. 그러나, 매트릭 퍼텐셜 2~15,000 cm 사이의 수분 함량 차이는 0~30 cm 층위가 31.3%, 30~70 cm 층위가 31.2%, 70~120 cm 층위가 37%, 120 cm 이하가 39.5%로서 120 cm 이하의 층위가 보수력이 가장 좋은 토양인 부분만 Eom et al. (1995)의 논리와 부합하고 있다. 0~30 cm, 30~70 cm 층위의 보수력은 토양수분 보유 함량이 거의 유사하나 사토인 70~120 cm 층위의 토양수분 보유함량보다 낮게 나타나고 있으며, 토양수분 보유량이 일반적인 사토의 한계를 넘고 있다. 이러한 결과는 120 cm 이하는 원토양으로서 토양의 일반적 특성을 나타낸다고 볼 수 있으나, 인위적으로 적토 (積土)된 0~120 cm 사이의 층위들은 토성에 의한 특성보다는 성토되면서 나타난 적토 모재에 의한 공극특성, 구조, 용적밀도 등의 물리적 특성을 반영하기 때문인 것으로 여겨진다.

모형 적용 및 평가 VG 모형이나 BC 모형은 모형의 설명에 나와 있듯이 상대적 수분 포화도라는 scaling factor

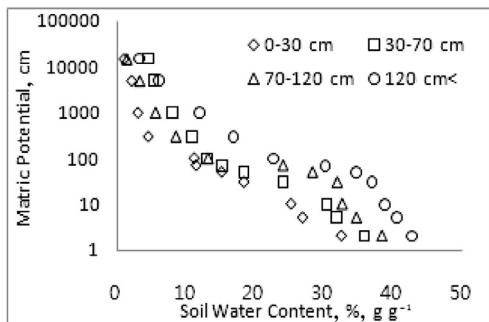


Fig. 2. Soil water characteristics curve of each layer.

를 이용해 토양수분 보유특성을 추정하는 방법이다. 이러한, scaling 기법을 활용한 토양수분 보유 해석은 다양한 물리적 자료를 이용한 방법보다는 추정모형 작성에 유리해 활용도가 높다 (Eom et al., 1995; Hur et al., 2006). Figure 3은 0~30 cm, 30~70 cm, 70~120 cm를 포함하는 인위적으로 적토된 세 개의 층위에서의 상대적 포화도에 대한 매트릭 퍼텐셜의 관계를 추정하기 위해 VG 모형과 BC 모형을 매트릭 퍼텐셜 2 cm부터 15,000 cm까지 적용한 것이다. 100 kPa이 약 1,000 cm의 물 높이에 대응하므로 2 cm의 매트릭 퍼텐셜은 0.2 kPa에 해당하며, 15,000 cm는 1,500 kPa에 해당한다. 이와 같이 거의 포화상태에 도달한 2 cm의 매트릭 퍼텐셜로부터 영구위조점인 15,000 cm까지의 분석결과를 바탕으로 토양수분 보유특성에 대해서 두 개의 추정모형을 적용한 결과 BC 모형보다는 VG모형이 측정값을 잘 추정하고 있다고 판단할 수 있는데, 이는 0~30 cm, 30~70 cm, 70~120 cm 층위에 적용한 VG 모형의 오차 제곱합 (SSE, sum of squares error)이 각각 0.014,

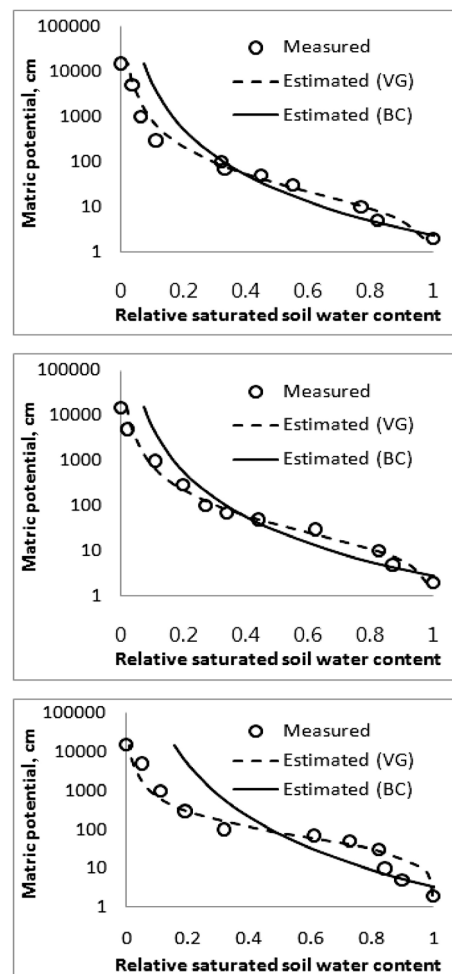


Fig. 3. Application of models for soil water retention characteristics estimation (left: 0~30 cm; middle 30~70 cm, right 70~120cm).

0.011, 0.048로서 0.056, 0.076, 0.188을 나타낸 BC 모형보다 작은 값을 나타내는 것으로 알 수 있다. 이러한 결과로 원래토양 위에 석비레 (마사토)를 적토한 토양에서 매트릭 퍼텐셜 2 cm 이상에서의 수분 보유특성을 해석하는 것은 해석학적 방법을 활용한 VG 모형이 멱함수의 형태인 BC 모형보다는 적합할 것으로 판단된다.

120 cm 이상에 존재하는 원래토양 층위에 대한 토양 수분 보유특성곡선은 Fig. 4에 나타나 있다. 여기서, 분석에 활용한 매트릭 퍼텐셜은 Fig. 3에 분석된 퍼텐셜과 동일하다. 원래 토양에서의 보수력 특성은 토양수분 보유범위가 인위적으로 적토된 토양보다 높게 나타나고 있는데, 이는 다른 세 개의 층위에 비해 약 2~3배정도 높은 점토의 함량이 그 원인인 것으로 여겨진다. 또한, VG모형과 BC모형의 SSE의 값이 가장 넓은 토양수분 함량범위를 갖고 있음에도 0.019와 0.119로서 세 번째 층위 (70~120 cm)보다 낮게 나타나고 있다. 결과적으로 이 층위 또한 BC모형보다는 VG 모형을 활용하는 것이 토양수분 보유특성 추정의 정확성을 높여줄 것임을 주고 나타나고 있다. 즉, 원래 토양에서도 상대 수분 포화도와 매트릭 퍼텐셜의 비선형적 관계는 BC모형의 멱함수 형태에 의한 추정보다는 VG모형의 해석학적 분석 방법을 활용해 추정하는 것이 토양수분보유특성을 묘사하는데 더 적합하다는 것을 보여주고 있다.

공기유입가 (AEV, air entry value) 물로 포화된 토양에서 흡인력을 매우 작은 값에서부터 서서히 높여 갈

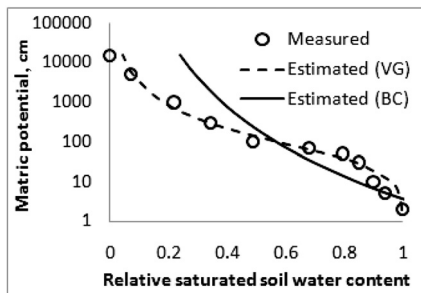


Fig. 4. Application of models for soil water retention characteristics estimation (120 cm <).

때 공기가 유입되면서 물이 빠지게 되는 일정 임계지점에서의 매트릭 퍼텐셜을 의미하는 AEV는 VG 모형의 α 값이나 BC 모형의 Ψ_b 값으로부터 도출 되는데, 모형 분석에 의해 산출된 각 매개변수 자료는 다음의 Table 2와 같다. 0~30 cm와 30~70 cm 층위 토양에서의 AEV는 VG 모형에서 9.5, 12.3 cm의 값을 보였고, BC 모형에서는 측정한계인 2 cm를 약간 상회한 값을 보였다. 70~120 cm와 120 cm 이상 층위에서의 AEV는 VG 모형이 39.7, 40.4 cm를 나타낸 반면 BC 모형은 3.3, 3.8 cm를 나타냈다. 이러한 결과를 살펴보면 토양층위가 깊어질수록 AEV가 증가하는 경향을 보여주고 있는데, BC 모형은 멱함수의 특성 때문에 측정한계 부근에서 값이 나타나고 있고, VG 모형은 측정한계와는 별도의 결과치를 보여주고 있다. 70~120 cm와 120 cm 이상 층위에서의 VG모형에 의한 결과는 적토토양이 아닌 일반토양에서의 기존의 연구결과 (van Genuchten, 1980; Wraith and Or, 1998)와 유사한 형태를 보여주고 있으며, 모형의 추정정확도를 고려해 선택한 VG 모형의 AEV 값으로 판단할 때 0~30 cm와 30~70 cm 층위에서는 불포화 상태가 나머지 두 개의 층위에서보다 약 30cm 이상 빠르게 시작됨을 알 수 있다. 결과적으로 포화상태의 종점이자 불포화 시작점인 AEV를 판단함에 있어 VG 모형을 선택하는 것이 바람직할 것으로 여겨지며, 석비레 (마사토)로 적토되어 인위적으로 변경된 토양에서의 AEV는 모재의 특성이나 적토된 기간, 적토 후의 물리적 특성변화에 따라 층위별로 다르게 나타날 것으로 판단된다. 또한, AEV는 포화와 불포화의 경계지점이어서 SWAT과 같은 수문모형에서 차용하고 있는 침투모형 (Mein and Larson)을 설명하기 위한 습윤전선 (wetting front) 매트릭 퍼텐셜과 동일한 값을 가진다고 할 수 있다. 습윤전선은 물의 침투시 토양에서의 습윤부분과 건조부분과의 경계면을 나타내는 것으로 Green-Ampt 모형이 실제 침투조건과는 달리 전달영역 (transmission zone)과 습윤영역 (wetting zone)을 생략하고 포화영역에서 불포화 영역으로 습윤전선이 확장된다는 전제를 가정하고 있으므로 AEV를 습윤전선의 매트릭퍼텐셜 값으로 산정할 수

Table 2. Air entry value and parameter data of each model at each soil layer.

Soil Depth	van Genuchten model			Brooks-Corey model		Wetting Front
	α	AEV* (α^{-1})	n	Ψ_b (=AEV)	λ	
cm	cm^{-1}	cm		cm		cm
0~30	0.1056	9.5	1.5185	2.3	0.2940	53.8
30~70	0.0811	12.3	1.5548	2.8	0.3020	79.5
70~120	0.0252	39.7	1.8019	3.3	0.2201	69.9
120<	0.0247	40.4	1.5345	3.8	0.1730	69.4

*AEV : Air Entry Value.

있다. 수문모형의 일종인 SWAT에서는 습윤전선의 매트릭퍼텐셜을 추정하기 위해 Rawls and Brakensiek (1985)의 모형을 사용하고 있다. Rawls and Brakensiek (1985)의 모형의 수식은 다음의 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\Psi_{wf} = 10 \cdot \exp[6.5309 - 7.32561 \cdot \phi_{soil} + 0.001583 \cdot m_c^2 + 3.809479 \cdot \phi_{soil}^2 + 0.000344 \cdot m_s \cdot m_c - 0.049837 \cdot m_s \cdot \phi_{soil} + 0.001608 \cdot m_s^2 \cdot \phi_{soil}^2 + 0.001602 \cdot m_c^2 \cdot \phi_{soil}^2 - 0.0000136 \cdot m_c^2 \cdot m_s - 0.003479 \cdot m_c^2 \cdot \phi_{soil} - 0.000799 \cdot m_s^2 \cdot \phi_{soil}] \quad (3)$$

여기서, Ψ_{wf} 는 습윤전선 매트릭 퍼텐셜 (mm)을 나타내며, ϕ_{soil} 은 토양의 공극률 (porosity, mm/mm)을 나타낸다. m_s 와 m_c 는 토양의 모래와 점토함량을 나타낸다. Table 2에 식 (3)에 의한 습윤전선 값도 제시하고 있다. 토양의 보수력 특성을 해석하는데 유용한 VG 모형의 AEV 값과 비교해볼 때 29cm부터 44.3cm까지 상당한 편차가 있음을 알 수 있다. 이러한 편차는 Green-Ampt 모형이 실제의 침투조건과는 달리 전달영역과 습윤영역을 생략한 가정으로부터 유래될 수 있으나 이러한 해석을 위해서는 이에 관한 추후의 연구가 필요하리라 여겨진다.

요 약

원토양인 논토양 위에 마사토를 적토 (積土)한 토양에 대한 토양수분 특성곡선을 작성해 보고, 이를 추정하는데 가장 널리 활용되고 있는 van Genuchten (VG) 모형과 Brooks-Corey (BC) 모형을 비교평가 해 그 효용성을 판단하기 위해 수행했다.

4개의 층위로 구분되는 측정 대상토양은 표토부터 30 cm 까지는 양질사토, 30~70, 70~120 cm는 사토, 120 cm 이상에서는 사양토로 분석된 토양이다. 토양수분 함량과 토양수분 매트릭 퍼텐셜과의 관계를 나타내는 토양수분 특성곡선 분석에 따르면, 원토양인 120 cm 이상 깊이 토양에서의 수분보유 특성을 제외하고 나머지 세 개 층위 토양에서의 수분 보유 특성은 0~30 cm, 30~70 cm 층위는 비슷하고 70~120 cm 층위는 약간 높은 경향이 있었다. 상대수분 포화도와 토양수분 매트릭 퍼텐셜의 관계를 표현함에 있어 멱함수 형태인 BC 모형보다는 해석학적 분석방법을 활용한 VG모형이 실측값에 근사한 추정결과를 제공했다. 포화상태의 중점이자 불포화상태의 시발점인 공기유입가 (AEV) 추정에도 측정 한계치 부근의 매트릭 퍼텐셜 값을 나타내는 BC모형보다는 9.5~40 cm (4 kPa)을 보였던 VG모형이 적합했다. 따라서, 인위적으로 원토양 위에 석비레 (마사토)로 적토된 토양에서의 토양수분 특성곡선 작성을 위한 추정모형에 VG모형을 활용하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 결과로부터 VG 모형을 수자원량 산정을 위한 SCS (Soil Conser-

vation Service, USDA) CN (Curve Number) 계산 과정에서 토양단면 내의 수분 보유 인자 (retention parameter) 산출을 위한 토양수분함량을 추정하는데 활용하거나 침투모형 (Green-Ampt Mein-Larson)을 설명하기 위한 습윤전선 매트릭 퍼텐셜을 추정하는데 사용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원 (과제번호: 2-2-3)에 의해 일부 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrol. Pap. 3. Colorado State University, Fort Collins.
- 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.
- Hur, S.O., K.H. Moon, K.H. Jung, S.G. Ha, K.C. Song, H.C. Lim, and J.G. Kim. 2006. Estimation model for simplification and validation of soil water characteristics curve on volcanic ash soil in subtropical area in Korea. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 39:329-333.
- McCuen, R.H., W.J. Rawls, and D.L. Brakensiek. 1981. Statistical analysis of the Brook- Corey and Green-Ampt parameters across soil texture. Water Resource Research. 17:1005-1013.
- Mein, M.A. and C.C. Larson. 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resource Research. 9:384-394.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. 12:593-622.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling, In E.B. Jones and T.J. Ward (ed.), Watershed Management in the 80's, ASCE, Newyork, p. 293-299.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, HJ Morel-Seytoux (ed.), Unsaturated Flow in Hydraulic Modeling Theory and Practice, NATO ASI Series c: Mathematical and Physical Science, 275:275-300.
- 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.
- Wraith, J.M. and D. Or. 1998. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software J. Nat. Resour. Life Sci. Educ. 27:13-19.