

# Tension Infiltrrometer를 이용한 불포화수리전도도의 추정

## Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity by Tension Infiltrrometer

허승오\*, 정강호\*\*, 하상건\*\*\*, 김정규\*\*\*\*<sup>1)</sup>

Seung Oh Hur, Kang Ho Jung, Sang Keon Ha, Jeong Kyu Kim

### 요 지

수리 전도도는 hydraulic gradient에 대한 flux의 비율 또는, flux-hydraulic gradient 직선의 기울기를 나타내며, 포화된 토양에서의 물의 이동이 포화수리 전도도이고 불포화된 토양에서의 이동이 불포화수리전도도이다. 일반적인 밭 상태에서의 토양수분 조건은 불포화수리 전도도로 표시하는 것이 적절하나 그 상태를 표현하기가 쉽지 않다. 토양의 불포화 상태를 나타내는데 가장 많이 쓰이고 있는 VGM(van Genuchten Mualem) 모형은 토양수분 포텐셜과 수분함량의 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 용적밀도나 33kPa, 1500kPa에서의 토양수분 함량 자료를 가지고 VGM의 매개변수인  $K_0$ (effective saturated hydraulic conductivity),  $\Theta_r$ (residual soil water content),  $\Theta_s$ (saturated soil water content),  $L$ ,  $n$ ,  $m(=1-1/n)$ 을 예측하는 모형으로 미국 농무성(USDA-ARS)에서 개발한 프로그램이다. Rosetta를 이용하여 10kPa에서의 불포화수리 전도도를 예측하였다. 또한 Gardner(1958)와 Wooding (1968)의 모형을 기반으로 하여 만들어진 tension infiltrrometer의 포화수리 전도도 값을 Gardner 식에 적용하여 1, 3, 5, 7kPa에서의 불포화수리 전도도 값을 17개 토양통을 대상으로 하여 구했다. 토양수분 potential이 3kPa에서는 물의 이동이 거의 없는 토양들이 있었는데 반해 남계통을 비롯한 학곡통, 회곡통, 백산통, 상주통, 석천통, 예산통 등 7개의 토양은 3kPa에서도 약간의 물의 이동이 있었다. 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. 또한, 1kPa에서 물의 이동은 삼각통에서 35.21 cm/day로 이동 속도가 가장 컸으며 그 뒤로 예산통, 화봉통, 학곡통, 백산통 등이 토양에서 빠른 속도로 이동하였다. 가천통이나 석천통 및 우곡통은 1kPa에서의 이동 속도가 아주 느린 토양으로 판단되었다. 또한, 포화되지 않은 상태인 1kPa에서 물의 이동 속도를 VGM 모형에 의해 예측된 값과 측정된 값으로 비교하였을 때 불포화 수리 전도도가 예측되지 않은 토양(석천통, 지곡통, 풍천통)이 존재하여 불포화 수리 전도도 특성평가에 대한 VGM 모형의 적용성에 문제를 보였다. 이는 결과적으로 논이라는 영농형태가 존재하는 우리나라에서 토양의 수리적 특성해석을 위한 VGM 모형의 적용성에 한계가 있을 것으로 판단되었다.

**핵심용어 :** 불포화수리전도도, van Genuchten Mualem, Rosetta, Gardner, Wooding

1) \* 정회원 · 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : sohur@rda.go.kr  
\*\* 정회원 · 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : stealea@rda.go.kr  
\*\*\* 정회원 · 농촌진흥청 농업과학기술원 토양관리과 · E-mail : ha0sk@rda.go.kr  
\*\*\*\* 비회원 · 고려대학교 생명환경과학대학 환경생태공학부 · E-mail : lemonkim@korea.ac.kr

## 1. 서론

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. 이러한 물의 이동을 표시하는 방법으로 제시되고 있는 것이 포화 수리 전도도(saturated hydraulic conductivity)이며, 이외에도 불포화 상태에서의 물의 흐름을 표시하는 불포화 수리전도도(unsaturated hydraulic conductivity)가 있다. 토양과 같은 다공성 매질은 관개나 강우 또는 증발산에 의한 물의 이동이 발생하며, 이는 침투, 투수 및 모세관 이동으로 정의 될 수 있고, 이들의 이동속도는 수리 전도도나 수두차이에 의한 구배로 표현한다. 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 수자원 수지(balance)의 오차를 현격하게 줄일 수 있을 것이며 유역 내에서 발생하는 수자원의 이동을 동역학적으로 해석할 수 있을 것이다. 물의 이동 특성을 대변할 수 있는 수리 전도도에 영향을 미치는 토양 특성은 주로 토양공극의 크기와 형태이다. 물이나 공기 등의 이동통로인 공극의 크기는 대공극, 소공극, 미세공극으로 분류되나 이들을 구성하는 기본입자의 크기, 유기물 함량이나 구조가 공극을 형성하는 기본이 되므로 수리 전도도 특성을 파악할 시에는 이러한 토양특성을 파악하는 것이 도움이 된다. 박과 유(1982)는 수리전도도 측정 방법별 비교를 통해 침투계를 이용한 측정과 inverse auger hole 방법간의 유의성이 있음을 보고한바 있으며, 노 등(1984)은 토양수분 특성 분석 장치인 pressure plate extractor 내의 토양수분 함량 변화로부터 불포화 수리전도도를 이론식에 따라 계산하고 측정했다. 정 등(1981)은 인공강우기를 이용하여 삼각 사양토, 전남 미사질 양토, 송정 식양토 등 3개의 토양에서 포화수리 전도도를 측정 보고하였다. 보통 수리 전도도의 측정은 실내와 실외에서 이루어지는데, 실외에서의 측정이 시간과 노력투입이 과다한 관계로, 노 등(1984)과 정 등(1981)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 infiltrometer는 고전적으로 실외에서 수리전도도나 침투속도를 측정하기 위해 많이 사용하였으나(정 등, 1981), 이동을 위한 공간적 제약 및 측정 준비 소요시간과 노력투입의 과다로 인해 많은 자료를 획득할 수 없어 최근에는 장력 침투계(tension infiltrometer)를 많이 활용한다(Ankeny 등, 1988; Hussien & Warrick, 1993; Logsdon & Jaynes, 1993; Schwartz & Evett, 2002). 장력 침투계는 토양의 포화수리전도도를 통해 토양으로의 침투속도를 계산하는 것으로서, 이론적으로 불포화수리 전도도를 추정할 수 있다. 불포화 수리 전도도는 포화수리 전도도와는 달리 측정 당시의 토양수분 함량이나 에너지 상태에 따라 달라지므로 정량적으로 기술하기가 쉽지가 않다. 따라서, 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 불포화 수리전도도를 추정하고, 토양입자 특성과 토양수분 보유특성곡선 자료를 VGM 모형에 적용해 구해진 불포화 수리 전도도를 비교해 VGM 모형의 유용성을 검증하고자 하였다.

## 2. 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 포화수리 전도도 값으로 얻어지며, 대표적인 장치로는 double ring 침투계와 장력침투계가 있다. 본 연구에서는 최근에 침투속도 측정을 위해 가장 많이 활용되고 있는 disc 장력침투계를 활용하였으며, 논토양인 남계토를 비롯하여 밭토양, 산림토양을 포함하는 17개의 토양통을 선정하여 측정하였다. 측정에 이용된 disc 장력침투계는 Fig. 1과 같이 디스크의 직경이 20cm이며 좌측의 water reservoir의 내경과 길이는 5.1cm, 81cm이며, 우측의 bubbling tower의 내경은 2.54cm, disc의 아랫면에 부착시키는 bubbling membrane의 압력은 수두 30cm이다.



Fig. 1. Disc tension infiltrometer

Disc 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(L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>)이고, r은 장력계의 disc 직경(L)이며, K<sub>wet</sub>은 물을 공급하는 potential에 대응하는 수리전도도(LT<sup>-1</sup>)를 나타내며 λ<sub>c</sub>는 대공극의 모세관 길이(L)를 나타낸다. 측정에 이용된 것과 같이 단일 disc를 가진 장력 침투계에서 다양한 값의 potential을 적용하면 제공된 potential에 대응하는 정상류에 대한 수리전도도를 구할 수 있는데(Lien, 1989; Ankeny et al., 1991; Hussen, 1991; Reynolds & Elrick, 1991), 그 관계는 식 (2)와 같이 matric potential(MP)을 고려하는 Gardner(1958) 모형을 이용하여 구할 수 있다.

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

여기서, K는 불포화 수리전도도(LT<sup>-1</sup>)이고, K<sub>s</sub>는 포화 수리전도도(LT<sup>-1</sup>)이며, h는 matric potential(L)을 나타내며 α는 λ<sub>c</sub><sup>-1</sup>과 동일한 값을 갖는 상수(L<sup>-1</sup>)이다. 여기서, 식 (1)의 K<sub>wet</sub>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<sub>s</sub>와 α를 가진 측정 장력 개수만큼의 방정식을 생산한다. 장력이 2개의 경우엔 식 (3)에 각각의 tension에서 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 3cm,

6cm, 12cm를 기본으로 했다.

VGM 모형은 토양의 불포화 수리전도도를 추정하는 간접적 방법으로서, 다음의 식 (4)와 같이 유효수분 범위에 대한 현재의 토양수분 상태를 MP의 비선형 함수로 나타낸 van Genuchten의 모형(1980)과 토양수분 특성곡선으로부터 유추할 수 있는 토양수분 함량의 함수인 불포화 수리 전도도의 포화수리 전도도와의 관계를 표현한 식 (5)와 같은 Mualem 모형(1976)이 수치해석에 의해 결합된 것으로서, 상대적 포화도로서 불포화 수리전도도를 표현할 수 있다(식 (6)).

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

여기서,  $\Phi$ 는 포화정도를 의미하고,  $\theta$ 는 현재의 토양수분 함량,  $\theta_r$ 은 1500kPa에서의 토양수분 함량,  $\theta_s$ 는 포화수분함량을 나타내며,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ 은 토양수분특성곡선의 모양에 직접적으로 의존하는 매개변수로서  $m$ 은  $1-1/n$ 의 다른 형태이다.

$$K(\theta) = K_S \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^L \left[ \frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{h(\theta)}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{h(\theta)}} \right]^2 \quad (5)$$

여기서,  $K(\theta)$ 는 불포화 수리전도도,  $L$ 은 매개변수,  $h(\theta)$ 은 토양수분 함량으로 표현되는 potential이다

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

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 Rosetta를 사용하였다. Rosetta 모형은 신경그물 열개(neural network)를 이용하여 토양의 물리적 자료들인 토성이나 모래, 미사, 점토 함량 또는 용적밀도나 33kPa, 1500kPa에서의 토양수분 함량 자료를 가지고 VGM의 매개변수인  $K_0$ (effective saturated hydraulic conductivity),  $\theta_r$ (residual soil water content),  $\theta_s$ (saturated soil water content),  $L$ ,  $n$ ,  $m(=1-1/n)$ 을 계산해 그 값을 제공하는 프로그램(Fig. 2)이다.

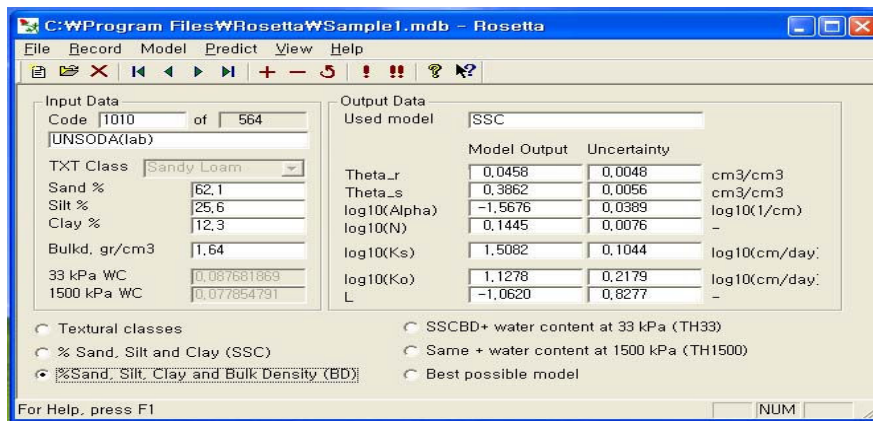


Fig. 2. Screen of Rosetta program

### 3. 결 론

#### 3.1 장력 침투계에 의한 불포화 수리전도도

토양 내에 존재하고 있는 토양수분 함량의 영향을 받는 불포화 수리전도도는 토양종류별로 토양수분 특성곡선에 의해 에너지로 변환된 토양수분 potential의 함수로 표시할 수 있으므로 포화 수리 전도도 측정을 위해 이용한 장력 침투계의 침투 유량 측정결과와 Gardner와 Wooding 모형을 조합한 식 (3)을 이용해 불포화수리 전도도를 추정하였다. 포화수리 전도도 측정을 위해 선정된 토양은 17개였는데, 가천통을 비롯한 6개의 논토양과 백산통을 비롯한 10개의 밭토양 및 산림 토양인 삼각통이 그 대상이었다. 수두가 대략 1,000cm 이면 수분 potential이 100kPa이므로 수두 높이를 10, 30, 50, 70cm로 했을 때의 장력은 1, 3, 5, 7 kPa과 동일한 값이고, 이런 potential에서의 수리전도도는 다음의 Table 1과 같다. 토양수분 potential이 3kPa에 이르면 6개 토양의 수리전도도가  $0(\text{cm}\cdot\text{day}^{-1})$ 의 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. 5kPa에서는 4개의 토양을 제외한 13개의 토양이, 7kPa에서는 학곡통을 제외한 모든 토양의 수리전도도가 0을 보였다. 학곡통의 경우는 약 8kPa에서 0을 나타내 포화수리 전도도가 다른 토양에 비해 크지 않음에도 불구하고 계속되는 물의 흐름이 존재함을 알 수 있었다. 또한, 1kPa에서 물의 이동은 삼각통에서 35.21 cm/day로 이동 속도가 가장 컸으며 그 뒤로 예산통, 화봉통, 학곡통, 백산통 등이 토양에서 빠른 속도로 이동하였다. 가천통이나 석천통 및 우곡통은 1kPa에서의 이동 속도가 아주 느린 토양으로 판단되었다.

Table 1. 장력 침투계로 추정한 1, 3, 5, 7 kPa에서의 불포화 수리전도도

토양통	토지이용	Ks	$\alpha$	1 kPa	3 kPa	5 kPa	7 kPa
		$\text{cm}\cdot\text{hr}^{-1}$	$\text{cm}^{-1}$	$\text{cm}\cdot\text{day}^{-1}$			
가천	논	1.01	0.37	0.59	0.00	0.00	0.00
고천	"	2.26	0.34	1.75	0.00	0.00	0.00
남계	"	0.64	0.13	4.02	0.28	0.02	0.00
칠곡	"	0.98	0.27	1.52	0.01	0.00	0.00
학곡	"	1.82	0.13	12.00	0.90	0.07	0.01
회곡	"	3.17	0.26	5.83	0.03	0.00	0.00
백산	밭	1.90	0.15	10.25	0.52	0.03	0.00
상주	"	2.07	0.17	9.20	0.32	0.01	0.00
석천	"	0.13	0.13	0.82	0.06	0.00	0.00
수암	"	24.53	0.64	0.98	0.00	0.00	0.00
안룡	"	5.65	0.37	3.41	0.00	0.00	0.00
예산	"	5.04	0.22	13.55	0.17	0.00	0.00
우곡	"	0.97	0.35	0.72	0.00	0.00	0.00
지곡	"	7.74	0.51	1.13	0.00	0.00	0.00
풍천	"	4.41	0.30	5.03	0.01	0.00	0.00
화봉	"	23.52	0.38	12.54	0.01	0.00	0.00
삼각	임지	47.60	0.35	35.21	0.03	0.00	0.00

### 3.2 VGM 모형에 의한 불포화 수리전도도 추정과 비교

VGM 모형은 토양의 불포화 수리전도도를 추정하는 간접적 방법으로서, 식 (6)과 같이 토양수분의 상대적 포화도로서 불포화 수리전도도를 추정할 수 있으나 여러 개의 매개변수가 필요해 토양수분 함량만으로는 계산이 어렵다. 따라서, 각각의 매개변수를 계산할 수 있는 방법이 필요하며, 미국의 USDA 에서는 이를 해결하기 위해 다양한 입력 자료들을 고려할 수 있는 신경그물얼개(neural-network)를 기반으로 한 Rosetta 모형을 작성하였다. Rosetta 모형은 VGM 모형의 매개변수를 얻기 위해 토양의 물리적 자료들인 토성이나 모래, 미사, 점토 함량 또는 용적밀도나 33kPa, 1500kPa에서의 토양수분 함량 자료를 활용하므로 측정 토양의 물리적 분석 자료만 있다면 바로 적용할 수가 있다. 본 연구에서는 토양종별로 토성을 분석하여 입력 자료로 활용하였다(Table 2).

Table 2. 측정대상 토양의 특성

토양통	OM	Sand	Silt	Clay	토성
	(% )				
가천	1.7	53.1	34.2	12.7	L
고천	1.7	51.0	35.0	14.0	L
남계	2.6	69.9	21.7	8.4	SL
칠곡	1.6	58.5	29.2	12.3	SL
학곡	1.0	70.1	23.9	6.0	SL
회곡	2.3	39.7	34.1	26.2	L
백산	2.0	53.6	32.1	14.3	SL
상주	0.8	77.8	13.0	9.2	SL
석천	2.5	17.4	64.9	17.7	SiL
수암	1.6	74.8	19.7	5.5	SL
안룡	1.5	70.0	24.5	5.5	SL
예산	0.5	49.6	35.1	15.3	L
우곡	1.8	41.4	42.3	16.3	L
지곡	1.4	77.0	16.0	7.0	SL
풍천	2.6	46.4	40.7	12.9	L
화봉	0.8	83.6	10.0	6.4	LS
삼각	3.0	71.2	18.0	10.8	SL

Rosetta에 분석도구로 활용되고 있는 신경그물 얼개는 통계적 분석방법의 일종으로 기존의 분석 자료를 학습의 도구로 활용해 반복적 학습을 시키고, 반복적 학습을 통해 각 입력변수마다의 가중치를 부여받게 된다. 새로운 입력자료에 의한 결과예측에 그 가중치를 활용하며 계층적 구조를 가져 가중치 설정을 합리적으로 유도할 수 있다. 또한, 신경그물얼개는 다양한 변수들을 분석의 입력자료로 활용할 수 있어 변수가 많을수록 해석하기에 유리하다. 그러므로, Rosetta로 VGM 모형을 위한 다양한 매개변수 분석이 가능하며, 그 결과로서는 포화 토양수분 함량인  $\theta_s$ , 1500kPa에서의 토양수분 함량을 나타내는  $\theta_r$ , 포장에서의 포화 수리전도도를 나타내는  $K_o$  및  $L$ ,  $n$ ,  $m(=1-1/n)$ 을 계산하고 예측해 제공한다. 그 결과로서 토양종류별  $\theta_r$ 은 용적수분 함량으로 안룡통의 3.4%에서부터 회곡통의 7.2%를 보여주고 있으며,  $\theta_s$ 도 용적수분함량으로 화봉통의 38.1%부터 석천통의 43.7%까지 분포한다. 유효포화수리 전도도는 석천통의  $1.6(\text{cm}\cdot\text{day}^{-1})$ 부터 수암통의  $31.3(\text{cm}\cdot\text{day}^{-1})$ 까지 다양한 범위의 값을 보여주고 있다(Table 3). 유효포화 수리전도도의 값이 가장 작은 석천통은 유효수분 범위가 가장 넓어 이것이 수리전도도가 작아지는 요인으로 작용했을 것으로 여겨진다.

Table 3. Rosetta에 의한 VGM parameter

토양통	$\Theta_r$	$\Theta_s$	$\alpha$	n	$K_o$	L	m=1-1/n
	( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$ )	( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$ )	( $\text{cm}^{-1}$ )		( $\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$ )		
가천	0.0472	0.3898	0.0171	1.4328	7.5840	-0.6324	0.3020891
고천	0.0500	0.3914	0.0155	1.4418	6.4759	-0.5696	0.3064145
남계	0.0395	0.3863	0.0359	1.4342	22.080	-1.1018	0.3027316
칠곡	0.0459	0.3875	0.0230	1.4041	11.0433	-0.9120	0.2878032
학곡	0.0352	0.3895	0.0379	1.4451	25.7691	-1.0589	0.3080097
회곡	0.0723	0.4163	0.0130	1.4279	3.8690	-0.6051	0.2996744
백산	0.0503	0.3901	0.0182	1.4213	7.7929	-0.7366	0.2964418
상주	0.0454	0.3813	0.0367	1.5631	23.3668	-1.0084	0.3602652
석천	0.0673	0.4370	0.0047	1.6626	1.5499	0.3642	0.3985493
수암	0.0362	0.3886	0.0416	1.5230	31.2752	-1.0061	0.3434013
안룡	0.0340	0.3906	0.0385	1.4474	26.8720	-1.0486	0.3091242
예산	0.0528	0.3929	0.0146	1.4461	5.7983	-0.5466	0.3084876
우곡	0.0558	0.3999	0.0089	1.5198	3.1060	-0.1032	0.3420392
지곡	0.0405	0.3850	0.0398	1.5635	28.4971	-0.9903	0.3604125
풍천	0.0484	0.3940	0.0109	1.4925	4.3631	-0.2082	0.3299611
화봉	0.0457	0.3811	0.0371	1.8634	28.0156	-0.8685	0.463339
삼각	0.0445	0.3833	0.0350	1.4338	19.6336	-1.1481	0.302571

토양수분 특성을 예측하는 Rosetta에서 계산된 값들이 우리나라 토양에 적합한지의 여부를 살펴보는 것도 VGM 모형의 적용 가능성을 판단하는 한 측면이 될 수 있다. 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. 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 토양수분 장력 10kPa과 1500kPa에서의 토양수분 함량을 예측할 수 있다. 엄 등(1995)에 의한 PTF로 예측한 토양수분 함량은 중량수분 함량이므로 이것을 용적수분 함량으로 변화해 주어야 하는 절차가 필요하지만 토양수분을 직접 측정하지 않고 토성분석 자료만으로도 수분함량을 예측할 수 있는 장점이 있다. Fig. 3은 토양수분장력 1500kPa에서 PTF를 이용해 예측한 토양 수분함량과 Rosetta에 의해 추정된 토양수분 함량 간의 비교결과를 보여주고 있다. 논토양의 경우 결정계수가 0.88로서 비교적 잘 맞고 있으며, 밭토양의 경우는 결정계수가 0.64로 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.

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

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

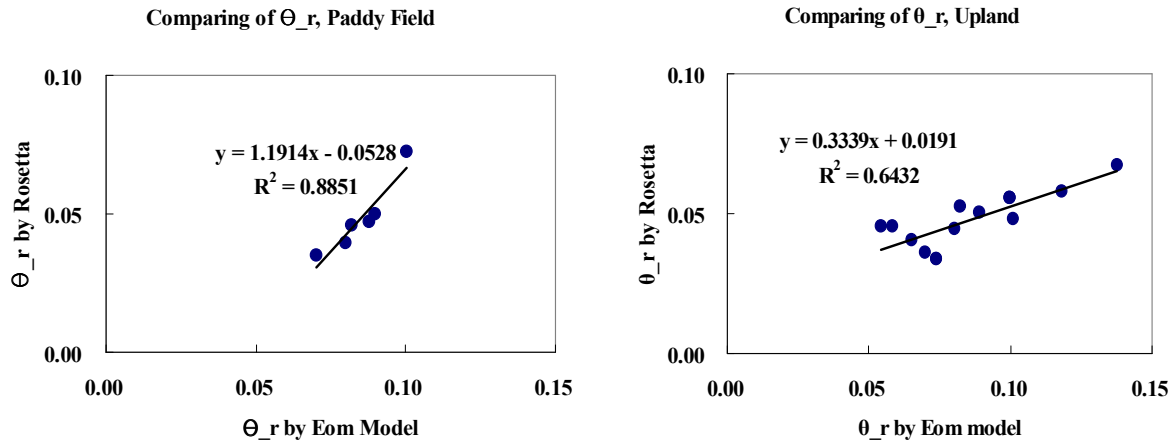


Fig. 3. VGM 모형과 PTF로 예측한 1500kPa에서의 토양수분 함량( $\theta_r$ ) 비교

Rosetta의 적용 가능성을 판별하고 매개변수 값을 구했다면, 그 값들을 VGM에 적용해 수리전도도를 구할 수 있다. 불포화 상태인 10kPa에서 수리전도도를 VGM 모형에 의해 예측된 값과 장력침투계로 측정된 값을 식 (3)에 대입해 구한 값을 비교하였을 때(Table 4), Gardner-Wooding(GW) 식으로 해석한 불포화 수리 전도도는 모두 0의 값을 보여 물의 흐름이 없다고 예측되는 반면, VGM 모형에 의해 예측된 불포화 수리전도도는 값이 계산되지 않는 토양(석천통, 지곡통, 풍천통)이 존재하여 예측 값의 정확성을 언급하기 이전에 불포화 수리 전도도 특성평가에 대한 VGM 모형의 적용성을 떨어뜨리는 결과를 보이고 있다. 따라서, VGM 모형을 우리나라 토양의 수리특성을 해석하는데 바로 적용하는 것은 한계가 있을 것으로 판단된다.

Table 4. 10kPa에서의 GW와 VGM 모형의 불포화 수리전도도 비교

토양통	GW	VGM
	cm·day <sup>-1</sup>	
가천	0.00	0.74
고천	0.00	0.77
남계	0.00	1.67
칠곡	0.00	0.57
학곡	0.00	0.57
회곡	0.00	0.50
백산	0.00	0.89
상주	0.00	0.32
석천	0.00	-
수암	0.00	1.22
안룡	0.00	0.97
예산	0.00	0.20
우곡	0.00	1.13
지곡	0.00	-
풍천	0.00	-
화봉	0.00	0.86
삼각	0.00	1.70



## 감 사 의 글

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

## 참 고 문 헌

1. 노희명, 유순호(1984). Pressure-Plate Extractor 내 토양수분 함량 변화로부터 불포화수리 전도도의 계산, 한국토양비료학회 논문집, 제17권 제1호, pp. 7-11.
2. 박무연, 유순호(1982). 토양의 포화투수계수 측정법 비교 연구, 한국토양비료학회 논문집, 제16권 제1호, pp. 14-19.
3. 엄기철, 송관철, 유관식, 손연규, 이상은(1995). Scaling Factor 를 이용한 토양수분특성곡선 추정모형, 한국토양비료학회 논문집, 제28권 제3호, pp. 227-232.
4. 유순호(2000). 토양사전, 서울대학교 출판부, 서울대학교
5. 정영상, 유관식, 임정남(1980). 우리나라 밭토양의 수분침투속도에 관하여, 한국토양비료학회 논문집, 제13권 제1호, pp. 1-6.
6. 정영상, 김이열, 임정남(1981). 답토양에 있어서 물 이동이 복합된 1차원 열 이동방정식에 관하여, 한국토양비료학회 논문집, 제14권 제4호, pp. 179-184.
7. Ankeny, M. D., T. C. kaspar, R. Horton(1988). Design for automated tension infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 52, pp. 893-896.
8. Ankeny, M. D., T. C. kaspar, R. Horton(1991). Simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 55, pp. 467-470.
9. Gardner, W. R.(1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci., Vol. 85, pp. 228-232.
10. Hussen, A. A., A. W. Warrick(1991). Measurement of unsaturated hydraulic conductivity in the field, Ph. D. Dissertation, 150 pp., Univ. of Ariz., Tucson.
11. Hussen, A. A., A. W. Warrick(1993). Alternative analyses of hydraulic data from disc tension infiltrometer, Water Resources Research, Vol. 29(12), pp. 4103-4108.
12. Lien, B.(1989). Field measurement of soil soptivity and hydraulic conductivity, M.S. Thesis, 93 pp., Univ. of Ariz., Tucson.
13. Logsdon, S. D., D. B. Jaynes(1993). Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 57, pp. 1426-1431.
14. Mualem, Y.(1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol. 12, pp. 593-622.
15. Reynolds, W. D., & D. E. Elrick(1991). Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 55, pp. 633-639.
16. Schwartz, R. C., S. R. Evett(2002). Estimating hydraulic properties of a fine-textured soil using a disc infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 66, pp. 1409-1423.
17. van Genuchten, M. Th.(1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892-898.
18. Wooding, R. A.(1968). Steady infiltration from shallow circular pond, Water Resources Research, Vol. 4, pp. 1259-1273.