

석회암 유래 토양에서의 물의 이동특성과 토양 입자 및 유기물과의 관계에 따른 Pedo-Transfer Function의 결정

허승오* · 정강호 · 손연규 · 하상건 · 김정규¹

국립농업과학원, ¹고려대학교 환경생태공학부

Determination of Pedo-Transfer Function Using the Relation Between Soil Particle Distribution, Organic Matter and Water Movement in Soil Originated from Limestone

Seung-Oh Hur,* Kang-Ho Jung, Yeon-Kyu Sonn, Sang-Keun Ha, and Jeong-Gyu Kim¹

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

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

Soils originated from limestone, located at the southern part of Kangwon province and Jecheon, Danyang of Chungbuk province are mainly composed of fine texture, have different properties from soils originated from granite and granite gneiss, especially for water movement. This study was conducted for making PTF(Pedo-Transfer Function) for Kfs(field saturaton hydraulic conductivity) estimation, and for investigating the relation between soil particle distribution and the infiltration and percolation rate in soils originated from limestone. Soils used for the experiment were 6 soils of Gwarim, Mosan, Jangseong, Maji, Anmi and Pyongan series. Infiltration and percolation rate for the soil were measured by a disc tension infiltrometer and a Guelph permeameter, respectively. The particle size distribution and organic matter content of the soils were analyzed. Kfs was not related with sand, silt, clay, and organic mattrer (OM) content because of forest soils which contained high gravel, pebble, and cobble content, and O layer with high OM content. After Mosan soil series and O layer of Gwarim series were excluded for the data analysis, Kfs was explained as a linear function with sand and clay content and a exponential function with OM content. As a result, the PTF equation was obtained as $Kfs = -4.20558 + 0.479706 * (S) + 0.023187 * \exp(1.829 * OM)$ ($R^2 = 0.6558^*$).

Key words: Lime Stone, Pedo-Transfer Function, Field Saturation Hydraulic Conductivity

서 언

토양에서 물의 이동은 포화나 불포화 조건에서 발생하며 그 속도는 토양 구조나 토성, 공극 등의 물리적 특성에 의존한다. 포화조건은 다량의 강우가 내리거나 논과 같이 관개로 토양이 포화되거나 지하수가 존재하는 경우를 포함하며, 불포화 조건은 일반적으로 중력에 의한 중력수가 빠져나간 상태를 일컫는다. 토양에서의 물의 이동은 역동적이지만 시간이나 장소에 따른 변이가 크고 토양수분함량에도 영향을 받는다. 이것은 토양에서의 물의 이동이 토양의 전단강도, 다짐, 용적밀도 등의 다양한 물리적 특성의 영향 하에 시간에 따른 토양수분 퍼텐셜의 차이에 따르게 된다

(Darcy, 1856)는 것을 의미하므로 토양 내에서의 물리적 특성을 이용해 물이 이동을 해석(Warrick, 2002)하고 모형화(Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Greson et al., 1987; Verecken et al., 1992; Tietje & Tapkenhinrichs, 1993; Hur et al. 2006) 하는 것은 물의 유동(water flux)을 이해하기 위한 편리한 수단이 될 수 있다.

토양은 모재, 시간, 기후, 지형, 식생 등의 토양생성 인자의 영향을 받아 형성되므로 물리적 특성도 동일한 인자들의 영향을 받게 되어 있다. 우리나라 경우 제주·울릉도를 포함한 일부 남부지역을 제외하고 거시적인 기후가 같은 것으로 판단할 수 있어 토양 생성 요인중 지형과 모재에 의한 해석만으로도 토양의 물리성을 포함해 일반적 특성을 이해할 수 있다(Sonn et al. 2007). 특히, 모재의 경우에는 동일한 모재에서

접수 : 2009. 5. 16 수리 : 2009. 6. 1

*연락처 : Phone: +82312900336,

E-mail: sohur@rda.go.kr

유래된 일련의 토양이 미세지형에 따라 연속적으로 분포된 것을 토양 연결군(soil catena)이라고 부르며, 유사한 토양의 속성을 이해하기 위한 분류기준이 되고 있다. 우리나라와 같은 환경조건에서는 화성암(고원지, 화강암·화강편마암, 유문암, 반암, 회장암, 고철질암) 유래토양, 퇴적암(삼기층, 회색 및 적색혈암, 사암, 역암, 석회암) 유래토양, 변성암(규암, 옥천계, 편마암·편암) 유래토양, 충적(홍적대지, 하성평탄지, 하해호성평탄지) 유래토양으로 분류하며(Sonn et al., 2007), 그중 석회암에서 유래된 토양은 주로 pH가 높아 염기성 특성을 보이며, 점토 및 철분함량이 많고, 식질계이며 염기포화도가 높은 적색토 특성을 나타낸다. 일반적 분포특성은 석회암에서 유래된 토양 단독으로만 분포하지는 않고 다른 암석으로부터 유래된 토양과 혼재되어 있으므로 풍화되어 토양이 되었을 때는 토성이 다양하게 나타난다. 이들 토양의 분포지역은 주로 강원도 남부(영월)와 충북 제천, 단양 등지로 면적은 약 213,191 ha이며, 전체 토양에서 차지하는 비중이 약 2.4%이다(ATI, 1992). 이러한 석회암 유래토양은 지엽적인 분포특성과 식질계통 토양이라는 물리적 특성으로 인해 강우나 관개 이후 물의 이동과 재분포가 화강암이나 화강편마암 유래토양과는 다를 것이다. 따라서, 본 연구는 석회암 유래토양을 대상으로 현장에서 측정된 침투 및 투수속도가 토양 입자 및 유기물 함량과 어떤 관계를 나타내는지를 밝히고, 이를 토대로 포화수리 전도도 추정을 위한 PTF(Pedo-Transfer Function)를 작성하는 것을 목적으로 하고 있다.

재료 및 방법

대상토양 특성 석회암지대 유래토양은 16개 토양으로 분류되는데 Sonn et al. (2007)에 따르면 식양질과 식질 등의 세립질로 구성이 되어 있고, 모산, 평창, 평전, 울곡, 문경통을 제외한 대부분의 토양이 자갈이 있는 토양으로 분류된다. 본 시험을 위해 16개의 토양 중 과립통, 모산통, 장성통, 마지통, 안미통, 평안통 등 6개 토양을 대상으로 표층의 침투속도 및 토양층위별로 투수속도를 측정했다. 장성·과립·안미·마지통은 식양질 계통으로, 모산·평안통은 식질계통으로 분류되며, 장성·과립·안미통은 자갈이 있는 토양으

로서 장성통은 배수등급 매우양호로, 과립·안미통은 배수등급이 양호한 토양으로 분류되되 과립통은 산림토양, 안미통은 논토양으로 분류된다. 역시 식양질 계통인 마지통은 배수양호한 밭토양으로서 자갈함량이 매우 많은 토양이다. 식질계통인 모산통은 암쇄토인 관계로 배수가 매우양호한 토양으로 분류된다. 평안통은 식질계통으로서 배수가 양호한 밭토양이다(Table 1). 토양의 입도분포는 농업과학기술원의 '토양 및 식물체 분석법(NIAST, 2000)'에 준해서 분석을 실시했다.

침투 및 투수 측정 및 이론 토양학에서는 강우나 관개에 의한 물의 토양침투를 나타내는 용어를 구분해서 사용하는데 침투는 계가 다른 즉, 기체상인 대기로부터 고체상인 토양표면으로 물이 침투할 때 사용하는 용어이며, 투수는 동일한 고체상인 토양단면 내에서의 물의 이동을 나타낼 때 사용하는 용어이다. 따라서, 토양에서의 물의 이동을 기술하기 위해서는 침투와 투수로 구분해서 사용해야 하며, 본 시험에서는 이를 측정하기 위해 원반형 장력 침투 측정 장치(DTI, Disc Tension Infiltrometer)와 Guelphpemeameter (GPM)를 사용했다. 그리고, 침투속도와 투수속도 측정 결과는 포화수리전도도로 표시되며, 현장에서 측정된 관계로 현장 포화수리전도도(field saturation hydraulic conductivity, Kfs)로 통칭되어 진다.

이론

DTI의 이론

DTI(Fig. 1)는 현장에서의 침투속도를 측정하기 위해 수리전도도 예측 공식인 Gardner(1958)와 Wooding(1968)의 방정식을 사용했다. Gardner의 방정식은 매트릭 퍼텐셜(matric potential, cm)과 포화수리전도도 값을 이용해 불포화수리 전도도를 추정하는 모형으로서 다음의 식 (1)과 같다.

$$K(h) = K_{sat} e^{(ah)} \tag{1}$$

여기서, K(h)는 불포화수리전도도, K_{sat}는 포화수리전도도이며, 단위는 cm·hr⁻¹이다. 는 거리 값의 역수(cm⁻¹)로 표현되는 파라미터 값이고 h는 매트릭 퍼텐셜을 나타낸다.

토양으로 침투되는 물의 양과 불포화 수리전도도와

Table 1. Soil series selected with soil catena for measurement of permeability.

Soil Catena [†]	Mountain and Forest soil (3 series)	Paddy land soil (1 series)	Upland soil (2 series)
Limestone	Gwarim, Mosan, Jangseong	Anmi	Pyeongan, Maji

[†] This column shows the major mother rock of soil catena or the region located on or geological system.

DTI의 원반의 반경과 파라미터 값인 α 의 관계를 나타내는 Wooding의 방정식은 다음의 식 (2)로 표현된다.

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

여기서, Q는 토양으로 들어가는 물의 양($\text{cm}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$)을 나타내며, K(h)는 불포화수리전도도($\text{cm} \cdot \text{hr}^{-1}$)를 나타낸다. α 는 거리 값의 역수 (cm^{-1})로 표현되는 파라미터 값이고 r은 DTI 원반의 반경(cm)이다.

식(1)의 불포화수리전도도를 (2)의 불포화수리전도로 치환해 다음의 식 (3)을 얻었다. 이 식은 침투되는 물의 양을 포화수리 전도도와 매트릭 퍼텐셜의 함수로 나타내므로, 현장에서 DTI로 측정된 물의 양과 매트릭 퍼텐셜의 관계를 통해 포화수리전도도 값을 이 식을 활용해 구했으며, 이론적으로 한계 침투속도와 포화수리전도도 값이 같아지므로 계산된 포화수리전도도를 통해 한계 침투속도를 결정했다. 이렇게 결정된 침투속도는 측정 시에 물에 의한 공기의 포집 때문에 현장 포화수리전도도(K_{fs})로 불리며, 그 값은 실험실에서 측정하는 포화수리전도도보다 작은 것이 일반적이다.

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot K_{sat} e^{(ah)} \cdot \left[1 + \frac{4}{\pi \cdot r \cdot \alpha} \right] \quad (3)$$

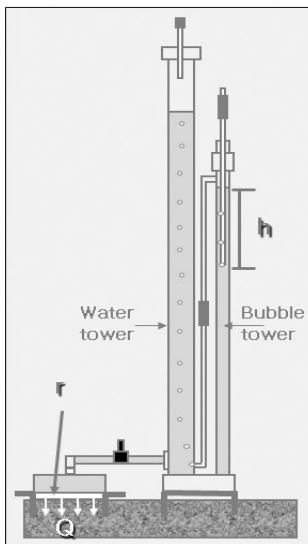


Fig 1. Disc tension infiltrometer (DTI).

GPM의 이론

여러 층위(layer)로 구성된 토양 단면 내에서 물의 이동은 GPM(Fig. 2)을 이용해 측정했다. GPM은 오거홀(auger hole)방식의 투수속도 측정 장치로 Reynold and Elrick(1986)의 모형을 이용해 침투속도처럼 현장의 포화수리전도도를 측정한다. Reynold

and Elrick(1986)의 모형은 다음의 식 (4)와 같다.

$$K_{fs} = G_{10}Q_{10} - G_5Q_5 \quad (4)$$

여기서, K_{fs} 는 현장 포화수리전도도(field saturated hydraulic conductivity, $\text{cm} \cdot \text{hr}^{-1}$)이고, G_i 는 각 수두에서의 상수, Q_i 는 각 수두에서의 투수량을 나타낸다.

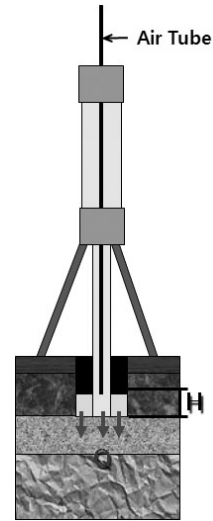


Fig 2. Guelph permeameter (GPM).

측정

표토(A층)의 침투속도 측정

DTI를 사용함에 있어 주의할 점은 매트릭 퍼텐셜을 3단계 이상(일반적으로 3, 6, 12 cm) 주어야 하는데, 이것은 DTI에서 디스크로 물이 빠져나오는 기본 높이가 2~3 cm에 있으므로 최소 매트릭 퍼텐셜은 3 cm 이상이어야 하기 때문이다. 본 연구에서는 현장의 침투조건에 따라 3 cm~15 cm 사이에서 3~4단계의 매트릭 퍼텐셜로 측정했다. 한편, 측정을 위해 표토에 고운 모래를 5-10 mm 깔아 DTI의 디스크가 측정면과 공기가 통하는 부분이 없이 접촉이 잘 되도록 디스크를 설치했으며, 디스크는 바로 측정이 가능하도록 측정 전에 물에 담가서 포화시켰으며, 측정본체(water reservoir와 bubbling tower)와 디스크가 수평을 이루도록 했다. 또한, 본체와 디스크 사이의 연결튜브에 공기가 없도록 해주었으며, 디스크는 포화 전에 디스크를 감싸 주는 측정용 압력 막(membrane)을 접하지 않고 평평하게 디스크의 밑바닥과 밀착되도록 잘 감싸주었다. 측정은 지름이 2.54 cm로 지름이 5.1 cm인 water reservoir보다 2.54 cm 작은 bubbling tower에서 수두(water head)를 유지해 주고, water reservoir에서 감소하는 수위를 읽고 기록했는데, 시간에 따른 수위 감소를 기록하고 시간변화에 따른 수위감소가 일정해

지면 측정을 멈추고, 다시 bubbling tower의 수위를 변화시키고 시간과 수위감소 측정을 반복해서 실시했다. 수위변화는 높은 퍼텐셜(12 cm)로부터 낮은 퍼텐셜(3 cm)쪽으로 퍼텐셜을 낮추어가며 측정을 진행했다.

토양 단면 내의(B층, C층) 투수속도 측정

GPM은 토양을 파괴하지 않고 토양 층위별로 측정해야 하기 때문에 먼저, 토양단면에 대한 층위구분을 실시했다. 대표토양에 대한 층위구분은 한국토양총설(ATI, 1992)에 제시되어 있어 이를 참고해 토양 단면의 층위구분을 실시했으며, 측정을 실시할 층위와 깊이를 결정했다. 이때, 투수에 대한 토양특성 분석에 유리하도록 토양단면에 대한 분류특성이나 물리적 특성에 대한 기술을 첨가했다. GPM은 측정시에 각 토양층위의 깊이에 맞게 오거를 이용해 원형 구멍을 뚫고, 투입관을 원형 구멍에 바닥이 닿도록 투입하고 가운데의 공기관(air tube)를 이용해 바닥으로부터 각각 5 cm와 10 cm의 수두를 주고 그 때의 투수량을 측정했는데, 시간변화에 따른 투수량이 일정해질 때 까지 측정 했다. 측정 가능한 토양의 층위가 10 cm 이상의 두께가 되어야 하는 것은 제한조건이다.

통계분석 PTF 작성을 위해 두 개 이상의 독립변수가 사용되고, 종속변수와 독립변수 간의 관계가 선형으로 가정되는 다중선형회귀모형을 결정하기 위한

다중회귀 분석을 실시했다. 회귀모형의 독립변수들이 종속변수의 변동을 설명해 줄 수 있는지 여부를 판단하기 위해 분산분석을 실시하고 회귀계수의 유의성을 검증하기 위한 부분 t-검정을 실시했다. 통계분석을 위한 프로그램은 엑셀을 활용했다.

결과 및 고찰

토양 입도 분포 및 침투·투수속도 토양의 입도 분포 및 유기물 함량과 현장 포화수리 전도도(Kfs)로 나타나는 침투 및 투수속도는 다음의 Table 2에 나타나 있다. 산림토양인 과림, 모산 장성통은 배수가 매우 양호한 토양으로 분류(Sonn et al., 2007)되는 관계로 다른 토양들에 비해 Kfs의 값이 아주 크게 나타나고 있다. 과림통은 유기물 층인 O층이 존재하고 다른 토양에 비해 유기물 함량과 모래함량이 많고, Kfs가 전 층위에 걸쳐 높은 값을 보이고 있다. 암반위의 토양층위가 30cm로 토양깊이가 깊지 않은 모산통은 토성이 미사질 식양토나 미사질 식토로 되어 있어 느린 침투 및 투수속도가 예상됨에도 불구하고 Kfs가 표층부에서는 $5.1 \text{ cm} \cdot \text{hr}^{-1}$, B층에서는 $62.5 \text{ cm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 의 높은 값을 보이고 있다. 이것은 이 토양이 암쇄토(lithosols)이며 자갈이나 잔돌 등의 함량이 54.1%로 매우 높은 특성에 기인한 것으로 여겨진다. 장성통은 자갈함량이 28.8%로 모산통 다음으로 많은 자갈 함량

Table 2. Physical properties and field saturation conductivity of soil originated from limestone.

Soil Series	Soil Layer	Soil Depth		Measurement Depth	Soil Texture	Sand	Silt	Clay	OM	Gravel	Kfs [†]
		cm		cm		%	%	%	g kg ⁻¹	%	cm hr ⁻¹
Gwarim	O	0	5	0	L	36.1	47.5	16.4	92		21.5
	A	5	25	20	L	36.1	47.5	16.4	37		37.7
	B	25	40	35	L	44.5	38.8	16.7	31		26.7
	C	40	100	60	SL	57.1	31.9	11.0	12		15.6
Mosan	A	0	8	0	SiCL	6.9	57.3	35.8	32	54.1	5.1
	B	8	30	15	SiC	6.4	50.4	43.2	3		62.5
Jangseong	A	0	20	0	SiL	20.9	53.9	25.2	35	28.8	21.4
	B	20	50	30	CL	25.5	47.1	27.4	23		3.1
Maji	Ap	0	10	0	SiL	25.1	55.7	19.2	34	12.3	1.7
	A	10	20	15	SiL	25.1	55.7	19.2	34		1.8
	B	20	50	25	L	38.0	42.8	19.3	19		13.3
Anmi	A	0	15	0	CL	32.3	34.0	33.7	2	21.4	0.2
	AB	15	25	23	SiL	16.4	58.7	24.9	15		0.1
	BA	25	55	50	SiCL	19.4	52.9	27.7	10		0.01
	Bw	55	100	70	SiCL	7.1	63.9	29.0	7		0.001
Pyeongan	A	0	15	0	SiCL	19.4	43.5	37.1	16		6.8
	BA	15	35	25	SiL	15.4	58.0	26.6	7		0.2
	Bt	35	50	50	CL	29.4	32.4	38.2	2		0.01

[†] Field saturated hydraulic conductivity

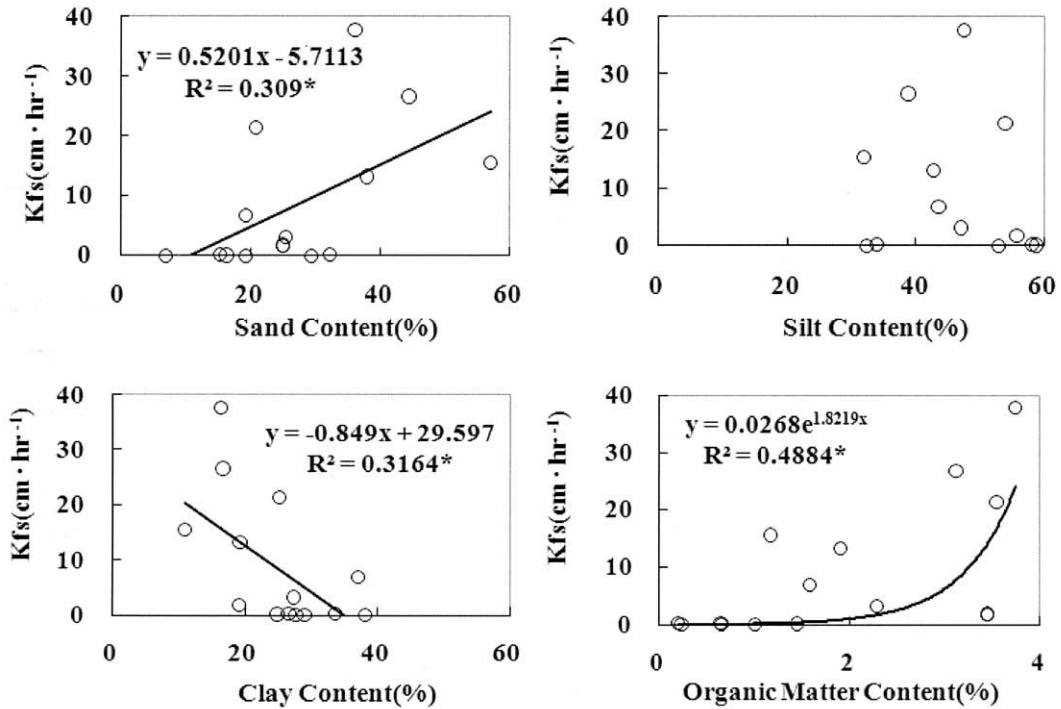


Fig. 4. Relation between field saturation hydraulic conductivity and soil physical properties except for lithols and O layer of soils.

도를 예측하는 PTF(Pedo-Transfer Function)를 작성할 수 있을 것이다. PTF는 일반적으로 측정된 기본 토양자료로부터 토양의 수리적 특성을 예측하는 관계식을 만들어 실험이나 측정을 통하지 않고도 수리특성을 쉽게 표현할 수 있는 시뮬레이션 모형을 지칭하며 매개변수로서는 토성이나 유기물 등의 기본적 토양 자료를 필요로 한다. PTF를 활용하면 시간과 비용을 절약하는 등의 긍정적 결과를 얻을 수 있다 (Cornelis et al., 200; Hur et al., 2006). 다음의 Table 3은 Kfs와 관련이 있는 토양 입자특성과 유기물 함량을 조합해 작성한 PTF 공식들에 대한 통계분석 자료이다. 상관성 분석결과에 따라 Kfs에 영향을 미치는 모래(S), 점토(C), 유기물(OM) 함량을 모두 고려했을 때(①)보다 모래와 유기물 함량만을 고려했을 때(④, ⑤)가 결정계수가 같거나 높게 나온 것은 모래함량과 점토함량간의 다중공선성(multicollinearity) 때문인데, 이 다중공선성은 독립변수들 간의 상관관계가 너무 높아 서로 다른 변수의 영향력을 제거하여 생기는 현

상을 말한다. 즉, ①에서는 다중공선성 때문에 결정계수의 정도가 낮아지게 된 것이다. 이러한 결과로 판단할 때 석회암 유래토양의 현장 포화수리 전도도를 예측하기 위한 PTF는 모래와 유기물 함량만을 고려한 ⑤번제의 PTF가 가장 적합한 것으로 여겨진다.

요 약

강원도 남부(영월)와 충북 제천, 단양 등지에 널리 분포하는 석회암에서 유래된 토양은 점토 및 철분함량이 많은 식질계 토양으로 세립(細粒)질로 구성되어 있고 자갈이나 잔돌이 있는 토양으로 분류되므로 토양의 침투 및 투수속도가 화강암이나 화강편마암 유래 토양과는 다른 양상을 보인다. 본 연구는 석회암 유래 토양의 침투속도와 토양층위별 투수속도 측정결과인 현장 포화수리전도도(Kfs, field saturation hydraulic conductivity)에 토양의 입도 분포 및 유기물 함량이 미치는 영향을 파악하고자 그들 사이의 상

Table 3. Statistical analysis on PTF for estimating field saturation hydraulic conductivity.

PTF [†]	R ²	p-value	Std. Error
① Kfs=-10.1677+0.45045*(S)+0.010545*(C)+0.458863*exp(OM)	0.6177	0.0117	8.28
② Kfs=13.19445+0.321953*(S)-0.54363*(C)	0.3939	0.0496	9.98
③ Kfs=15.86206-0.49589*(C)+0.374798*exp(OM)	0.4740	0.0212	9.30
④ Kfs=-9.77899+0.447001*(S)+0.456395*exp(OM)	0.6177	0.0031	7.93
⑤ Kfs=-4.20558+0.479706*(S)+0.023187*exp(1.8219*OM)	0.6558	0.0017	7.52

[†] Pedo-Transfer Function, S : Sand, C : Clay, OM : Organic Matter

호관계를 분석하였다.

실험을 위해 이용된 토양은 과림, 모산, 장성, 마지, 안미, 평안의 6개 토양통이었고 장력 침투계(disc tension infiltrometer)와 투수속도 측정계(Guelph permeameter)로 침투 및 투수속도를 측정하고 입도 분포와 유기물함량을 분석했다. 전체 측정대상 토양의 표토 및 층위별 Kfs와 그 토양들의 모래, 미사, 점토 및 유기물 함량과는 유의한 상관관계를 찾을 수 없었다. 그것은 측정 토양이 농경지 토양 외에도 산림 토양이 포함되어 있고, 산림토양도 유기물 층이 존재한다거나 다량의 자갈이나 잔돌 등의 함량이 존재하기 때문인 것으로 여겨진다. 이것은 포화수리 전도도가 토양의 입도분포나 유기물 함량과의 관계가 있다고 했던 다수의 연구와는 상반된 결과이므로 이를 더 검토해볼 필요성이 있다. 이를 위해, 측정된 6개의 대상 토양 중에서 암쇄토인 모산통과 유기물 함량이 9.2%로 일반토양보다 월등히 높은 과림통의 O층을 제외하고 토양 입도분포 및 유기물 함량과 침투 및 투수속도와의 관계를 살펴보았다. 분석결과 모래의 함량과 Kfs의 관계는 결정계수(R^2)가 0.309로 비교적 낮게 나타나고 있지만 정의 직선 상관관계를 나타냈으며, 미사함량과는 관계가 없었고, 점토함량과는 결정계수가 0.3164로서 부의 직선 상관관계를 나타냈다. 유기물 함량과는 다른 토양 입도분포들보다 결정계수가 높으며($R^2=0.4884^*$) 지수함수 관계를 나타내고 있다. 이러한 결과들을 종합하면 석회암 유래토양에서의 현장포화수리 전도도는 모래나 유기물 함량이 많으면 증가하고 점토 함량이 많으면 감소할 것이므로 이들을 조합한다면 현장 포화수리전도도를 예측하는 PTF(Pedo-Transfer Function)를 작성할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 모래, 점토, 유기물 함량을 고려해 PTF를 분석한 결과 점토는 다중 공선성 때문에 제외를 하고 모래와 유기물 함량만을 이용해 Kfs를 예측할 수 있는 PTF를 작성했다.

감사의 글

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

인용문헌

- ATI. 1992. Korean Soil Introduction. Agricultural Technique Institute, Suwon, Korea
- Campbell, G.S. 1974. A simple model for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117:311-314.
- 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.
- Darcy, H. 1856. *LEs fontainespubliques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- 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.
- Gregson, K., D.J. Hector, and M. McGowan. 1987. A one-parameter model for the soil-water characteristic. *J. Soil Sci.* 38:483-486.
- Hur, SO., K.H. Jung, C.W. Park, S.G. Ha and J.G. Kim. 2006. Comparison of disk tension infiltrometer and van Genuchten-Mualem model on estimation of unsaturated hydraulic conductivity. *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 16:14-19
- NIAST. 2000. Soil and plant analysis methods. Natio. Insti. of Agri. Sci. and Tech. Suwon, Korea
- Reynolds W.D., and D.E. Elrick. 1986. A method for simultaneous insitu measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review* 6:84-95.
- Sonn, Y.K., S.O. Hur, M.C. Seo, S.J. Jung, B.K. Hyun, and K.C. Song. 2007. Pattern classification of standard catchments with soil catena characteristics. Workshop for effective use of hydrologic soil group. National Institute of Agricultural Science & Technology Press, Suwon, Korea
- Tietje, O., H. Tapkenhinrichs. 1993. Evaluation of pedotransferfunctions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1088-1095.
- van Genuchten M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44:892-898
- Vereecken, H.D., J.V. Orshoven, J. Feyen, and J. Bouma. 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1371-1378.
- Warick A. W. 2002. *Soil physics companion*. p. 75-76. CRC Press LLC. Boca Raton. USA
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond, *Water, Resour. Res.*, 4:1259-1273