

Hydraulic Characteristics of Mountainous Forest Soils in Korea and Applicability of Pedotransfer Functions

Kangho Jung, Yeonkyu Sonn*, Seungoh Hur¹, Sangkeun Ha, and Munho Jung²

Division of Soil and Fertilizer, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

¹*Division of Agro-Materials Safety Evaluation, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea*

²*Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation, Wonju 26464, Korea*

(Received: October 5 2015, Revised: October 13 2015, Accepted: October 13 2015)

Pedotransfer functions (PTFs) were developed for each soil horizon to estimate hydraulic characteristics of mountainous forest soils in South Korea. Twenty one dominant soil series from 8 soil catenae such as granite-originated catena and volcanic ash-originated catena were selected for the study; gravel contents of selected soils were 10% or lower. Saturated conductivity (K_s) was measured for each horizon in situ. Particle size distribution and organic matter content of each horizon were also determined. Based on correlation analysis with total data set, sand separate showed positive relationship with K_s ($r=0.24^*$) while clay separate had negative relationship with K_s ($r=-0.29^{**}$). The correlation coefficients of sand, clay, and organic matter content with K_s increased to 0.41^{**} , -0.67^{***} , and 0.58^{***} , respectively, using data from granite- or gneiss-originated catena with exception of volcanic ash-originated catena and sedimentary rock-originated catena. Determination coefficients of PTFs were 0.31 for A horizon, 0.25 for B, and 0.35 for C with all data set while those were 0.74 for A, 0.48 for B, and 0.54 for C. Organic matter was a dominant factor affecting K_s in A horizon but clay content was selected as the only factor influencing K_s in C horizon. It implies that PTFs should be developed with understanding characteristics of parent materials and horizons. Developed PTFs for granite- or gneiss-originated catena were following:

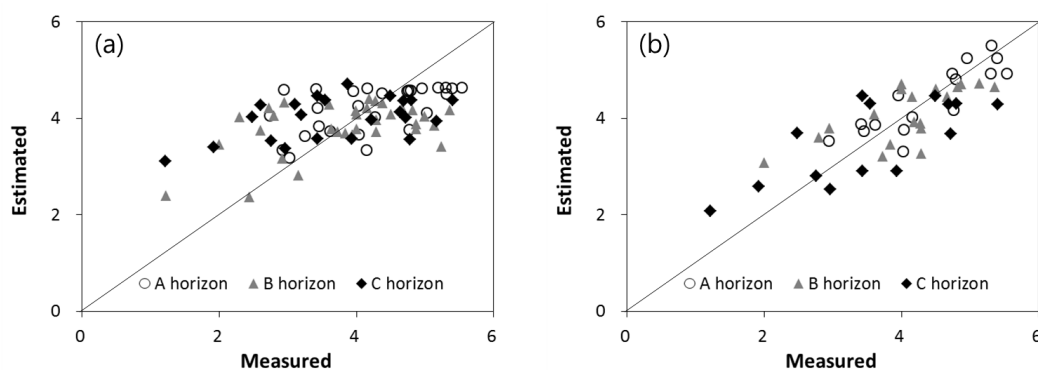
$$\text{A horizon: } \text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.031C + 0.398\text{OM} + 3.49$$

$$\text{B horizon: } \text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.028C + 0.141\text{OM} + 4.05$$

$$\text{C horizon: } \text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.072C + 4.66$$

where C is clay separate (%) and OM is organic matter content (g kg^{-1}). The unit of K_s is cm sec^{-1} .

Key words: Pedotransfer function, Hydraulic conductivity, Forest soil, Catena, Horizon



Measured and estimated $\text{Log}(K_s \times 10^7)$ of mountainous forest soils in South Korea for (a) total soils and (b) soils from catenae originated from granite and gneiss rocks.

*Corresponding author : Phone: +82632382425, Fax: +82632383822, E-mail: sonnky@korea.kr

§Acknowledgement : This research was supported by Rural Development Administration (PJ010058)

Introduction

토양은 대기, 지질, 수문, 생태를 잇는 접면으로 수문학적 순환 과정에서 대기와 육상 수계를 잇는 중요한 매개체이다. 물의 이동에 영향을 주는 토양의 특성을 토양의 수리적 특성이라고 하며, 포화 수리전도도 (saturated hydraulic conductivity, K_s), 불포화 수리전도도 (unsaturated hydraulic conductivity), 한계 침투속도 (limited infiltration rate), 투수속도 (percolation rate), 투수성 (permeability) 등이 주요한 특성이다 (Hillel, 1998). 지표에서 물이 흠 속으로 침투할 때 건조한 조건에서는 흡습성 (sorptivity)의 영향으로 침투속도가 빠르지만 표토가 포화에 근접함에 따라 감소하면서 평형에 도달하는데 이 값을 한계 침투속도라고 하며, 이론적으로 표토의 K_s 에 수렴한다 (McKenzie et al., 2002). 한계 침투속도는 물의 이동에서 강우 또는 관개시 지표 유거량과 토양 침투량을 결정하는 중요한 특성으로 수문학적 토양군을 구분하는데 있어 중요한 지표이다 (McCuen, 1982; Mishima and Singh, 2003). 투수속도는 토양 내에서 물로 거의 포화된 조건에서 중력에 의해 물이 수직 방향으로 이동하는 속도를 의미하며 각 층위의 K_s 에 근접한다. 투수성은 한계 침투속도나 투수속도에 비해 일반적인 개념으로 진토층 전체에 걸쳐 물이 수직으로 이동하는 특성을 나타내며 우리나라에서는 매우 느림에서 매우 느림의 6단계로, USDA에서는 매우 느림에서 불투수의 7단계로 구분한다 (ASI, 1992; NSSC, 2012). 토양의 수리특성이 단위 시간당 길이 단위로 표현하기 때문에 속도로 표현하기는 하나 엄격히 정의하면 단위 시간당 단위 면적을 통과하는 물의 부피를 뜻하므로 한계 침투율, 투수율 등으로 표현하기도 한다.

우리나라는 전체 토지의 17%는 농경지로, 65%는 초지를 포함한 산림으로, 나머지 18%를 대지 및 기타로 사용하고 있어 수자원, 탄소 격리 등 자연 자원 관리에 있어 산림 토양의 역할이 크다 (KOSIS, 2014). 우리나라 내륙의 산림 토양은 주로 제자리에서 모암이 풍화되어 모재를 형성한 잔적 토이며, 화강암 또는 편마암에서 유래한 잔적토가 전체 산림 토양 면적의 약 3/4에 해당한다 (ASI, 1992). 이 외에도 우리나라 산림토양은 화산회, 석회암, 혈암 등 다양한 모재에서 유래하였다 (ASI, 1992). 우리나라의 토양은 2010년까지 390개통으로 분류되었으며, 2011년 독도통이 추가되었고, 최근 제주도 토양의 재분류와 리모델링 사업 등에 의한 대면적 인위토양의 형성으로 14개통이 추가되어 2014년 현재 405개통으로 분류되고 있다 (NAAS, 2014). 이 중 101개통이 산림이 주로 분포하는 토양이다. 토양통별 대표단면의 층위별 33 kPa와 1,500 kPa 토양수분장력에서의 수분보유량은 정량적으로 분석하여 보고되어 있다 (NIAS, 2000b). 그러나 층위별 K_s 가 제시되지 않고 있으며, 투수성도 정성적으로 제시되어 있어 토양종류별 정량적인 수리 특성이 누

락되어 있다. 우리나라 토양의 수리특성에 대한 토양종류별 정량적인 분석은 논토양에 대해서 Oh and Ryu (1973)가 32개 통에 대해 조사한 바 있으며 주요 밭 및 산림토양 5개통을 대상으로 다양한 강우 조건과 경사도 및 피복조건에서 침투율 및 유거율을 평가한 바 있으나 (Ryu and Jung, 1976). 우리나라 토양 전반의 수리 특성을 정량적으로 해석하기에는 한계가 있다.

토양의 수리특성 분석은 시간과 노력이 많이 투입되는 과정이므로 측정자료의 구축이 어려울 경우 토양의 입자분포, 유기물 함량 등 토양의 일반적인 물리특성으로 수리특성을 모사한다 (Cambell, 1985; Cosby et al., 1984; Saxton et al., 1986; Vereecken et al., 1990). 이러한 형태의 식을 토양특성전환공식 (pedo-transfer function, PTF)이라고 한다. 이 식들은 모두 하나 또는 그 이상의 입자에 대한 지수식으로 K_s 를 모사하고 있다. 이는 모래가 많을 때 대공극의 증가로 인한 수리전도도의 지수적인 증가나 미사 또는 점토가 많을 때 대공극의 감소로 인한 수리전도도의 지수적인 감소를 반영한다.

본 연구에서는 우리나라 산림토양의 수리특성의 해석을 위해 입자특성과 수리특성간의 관계를 평가하고자 하였다. 나아가 기존 추정식의 지수적 접근을 이용하여 우리나라 산림토양에 대한 층위별 PTF를 개발하였으며, 기존 PTF와 개발된 PTF의 적용성을 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

모재별 대표 산림 토양통의 선정 대표 산림 토양통은 토양 연결군 (soil catena)과 면적비율에 근거하여 선정하였다. 토양 연결군이란 기후, 모재 등 생성원인이 비슷하

Table 1. Selected soil series in mountainous forests from 9 dominant soil catenae in South Korea.

Soil Catena	Series	Proportion ¹ %
Schist and Gneiss	Songsan, Osan, Cheongsan, Oesan	37.9
Granite	Samgag, Yesan, Songjeong	22.7
Porphyry	Mudeung	11.6
Gray Shale	Daegu, Guisan	9.8
Rhyolite	Masan, Haengsan	7.3
Limestone	Gwarim, Mosan, Jangseong	3.0
Alpine Land	Odae, Woljeong	2.9
Volcanic	Jungmun, Tosan, Songdang	1.4
Ogcheon Gneiss System	Daesan	1.3

¹Area of mountainous forest soils in the catena to area of total mountainous forest soil in South Korea

면서 지형적으로 인접해 있어 좁은 지역에서 동반해서 나타나는 일련의 토양 군집이다 (Sonn et al., 2015). 본 연구에서는 우리나라 면적의 대부분을 차지하는 11개 토양연접군 중 8개 토양연접군에서 21개 토양통을 선정하였다 (Table 1). 토양통별로 밀집지역을 선정하여 3지점에서 측정 및 시료 채취를 하였으며, 면적분포가 넓은 삼각통은 4지점, 송산통은 3지점을 선정하여 연구를 수행하였다. 자갈 함량이 다양한 토양통에 대해서는 자갈 없음 등급에 해당하는 토양구를 선정하였다.

현장 수리특성 및 입도특성 분석 표토의 한계침투속도는 현장 측정용 장력 침투속도계 (Tension infiltrometer, Eijkelkamp, Fig. 1. (a))를 사용하였다 (Reynolds, W.D., 1993; Wooding, R.A., 1968). 이 장비는 불포화에서 포화조건으로 토양수분 장력을 낮추어 가면서 각 토양수분 장력에서의 침투속도를 측정하여 궁극적으로 토양의 한계침투속도를 추정하는 장치이다. 매뉴얼 상에는 3, 6, 15 cm 장력에서 측정하게 되어 있으나 우리나라 토양에서 15 cm에서 측정이 어려우므로 최대 장력을 10 cm 내외에서 설정하였다. 또한 계산식이 지수식으로 설정되어 있기 때문에 세 장력에서 측정하는 것은 자료해석에 있어 오류의 가능성이 많아 네 장력에서 측정하였다 (Gardner, 1958; Wooding, 1968). 강우에 의한 토양으로의 물의 침투는 지표에서 발생하기 때문에 위의 방식으로 측정한 한계 침투속도는 이론적으로 표토의 K_s 에 수렴한다 (McKenzie et al., 2002). 층위의 상

부경계가 토심 10 cm 아래에 위치하는 토층의 투수속도는 현장측정용 투수속도계 (Guelph permeameter, Soilmoisture, Fig. 1. (b))를 이용하였다 (Reynolds and Elrick, 1990). 이 방법은 토양에 균일한 직경의 구멍을 뚫고 물로 포화시킨 후 일정한 높이까지 담수시켜 투수되는 시간당 물량을 측정함으로써 투수속도를 산출하는 것이다. 일반적으로 5 cm 담수와 10 cm 담수된 상태의 값을 이용한다. 따라서 방법을 이용하기 위해서는 토양층위의 깊이가 10 cm를 초과하여야 하므로 구멍을 뚫을 때의 정확성, 물이 내려가는 속도 등을 고려하여 토층의 두께가 15 cm 이상인 토층에 대해서만 투수속도를 측정하였다 (Reynolds and Elrick, 1990).

토양 층위별로 시료를 채취하여 응달에서 풍건한 후 자갈함량, 무기입자 크기별 분포, 유기물함량을 분석하였다. 무기입자의 크기별 분포는 비중계법으로 분석하였으며, 유기물 함량은 Wakley-Black법으로 분석하였다 (NIAST, 2000a).

PTF 적용성 검토 우리나라 산림토양의 층위별 수리특성을 PTF를 이용하여 모사할 수 있는지를 평가하기 위해 토양층위별 K_s (표토: 한계침투속도, 심토: 투수속도)와 입도 특성별 상관관계를 분석하였다. K_s 와 입도분포가 지수적 관계를 나타낸다고 알려져 있기 때문에 K_s 를 로그로 변환하여 상관관계를 분석하였다 (Cosby, 1985). 기존에 활용하고 있는 PTF의 적용성을 검토하기 위하여 범용적으로 사용되는 Saxton 식의 추정값과 실측값을 비교하였다 (Saxton and Rawls, 2006).

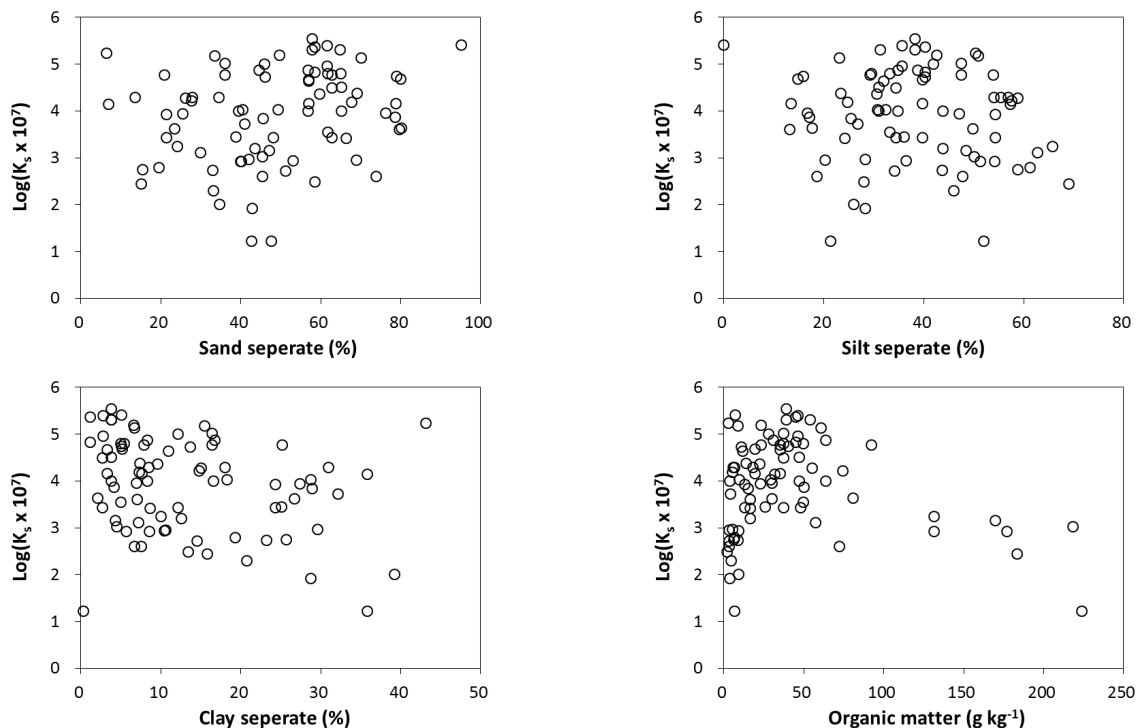


Fig. 1. Relationships between saturated hydraulic conductivity (cm sec^{-1}) and particle types for total mountainous forest soils.

Table 2. Pearson correlation coefficient between saturated hydraulic conductivity and particles at each horizon. Numbers in parentheses are probability.

Particle	Total soil series				Major soil series ¹			
	Total	A	B	C	Total	A	B	C
Sand	0.24 (0.028)	0.33 (0.093)	0.18 (0.314)	0.31 (0.190)	0.41 (0.003)	0.36 (0.170)	0.29 (0.225)	0.51 (0.059)
Silt	-0.12 (0.267)	-0.23 (0.253)	-0.18 (0.302)	-0.03 (0.913)	-0.03 (0.836)	0.04 (0.888)	0.15 (0.536)	-0.18 (0.538)
Clay	-0.29 (0.009)	-0.34 (0.079)	-0.08 (0.660)	-0.59 (0.006)	-0.67 (<0.001)	-0.63 (0.008)	-0.63 (0.004)	-0.74 (0.003)
Organic matter	-0.21 (0.056)	-0.33 (0.090)	-0.41 (0.017)	0.25 (0.292)	0.58 (<0.001)	0.8 (<0.001)	0.62 (0.005)	0.4 (0.161)

¹Major soil series are soils mainly originated from granite and gneiss rocks: soils in schist and granite catena, granite catena, porphyry catena, rhyolite catena, and alpine land catena.

$$K_s = 2.78 \times 10^{-6} \times \exp(12.0 - 0.0755S + (-3.90 + 0.0367S - 0.110C + 8.75 \times 10^{-4}C^2)/\theta_s) \quad (\text{Eq. 1})$$

여기에서 S는 모래, C는 점토, θ_s 는 포화수분함량이다. 또한 우리나라 산림토양의 층위별 PTF를 단계적 다중 회귀분석 (stepwise multiple regression)을 이용하여 결정하였다.

$$\text{Log}(K_s \times 10^7) = ax_1 + bx_2 + \dots + c \quad (\text{Eq. 2})$$

여기에서 K_s 의 단위는 cm sec^{-1} 이며, x 는 각 입도특성을 나타낸다. K_s 등급이 매우 느림 ($\leq 10^{-6} \text{ cm sec}^{-1}$), 느림 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$), 약간 느림 ($10^{-4} \sim 10^{-5}$), 약간 빠름 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$), 빠름 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$), 매우 빠름 ($> 10^{-2}$)으로 구분되기 때문에 10^7 을 곱한 후 로그로 전환할 경우 정수부로 K_s 등급을 판단할 수 있다 (NSSC, 2012). Saxton 식과 개발 PTF의 적용성은 식의 결정계수 (R^2)와 평균 제곱근오차 (root mean square error, RMSE)를 측정하여 비교하였다.

통계분석 상관분석, 단계적 다중 회귀분석 등 통계분석을 위해 SAS 9.2 (SAS Institute, US)를 이용하였다. 상관분석시 유의성은 $\alpha < 0.05$ 수준에서 검정하였고, 단계적 회귀분석에서 변수 채택시 유의성은 $\alpha < 0.15$ 수준에서 결정하였다.

Results

입도특성과 수리특성의 상관성 산림토양 시료 전체를 대상으로 상관분석을 한 결과 모래함량은 각 층위의 K_s 와 유의한 정의 상관성을 나타내었으며 ($r=0.24^*$), 점토함량은

고도로 유의한 부의 상관성을 나타내었다 ($r=-0.29^{**}$) (Table 2). 반면 미사와 유기물 함량의 상관성은 나타나지 않았다. 우리나라의 산림토양의 주된 면적을 차지하는 화강암 및 편마암 지대 토양 연결군 (화강암 및 화강편마암, 편마암, 고원지, 옥천계 편마암 연결군)의 토양을 대상으로 상관분석을 한 결과 입자특성과 K_s 의 상관성은 전체 산림토양을 대상으로 하였을 때와 비교하여 확연히 증가하였다. 모래함량은 K_s 와 고도의 정의 상관성을 나타내었으며 ($r=0.41^{**}$), 점토함량은 매우 고도의 부의 상관성을 나타내었고 ($r=-0.67^{***}$), 유기물 함량은 매우 고도의 정의 상관성을 나타내었다 ($r=0.58^{***}$) (Fig. 1). 토양 층위별로 입자특성과 K_s 의 관계를 분석한 결과 A층에서는 유의한 상관관계를 발견되지 않았으며, B층에서는 유기물 함량이 K_s 와 부의 상관성을 나타내었고 ($r=-0.41^{**}$), C층에서는 점토함량이 고도의 부의 상관성을 나타내었다 ($r=-0.59^{***}$). 분석에 사용된 토양의 입자특성별 범위는 모래, 미사, 점토, 유기물 함량의 순으로 A층은 6.9~79.1%, 13.5~65.8%, 2.8~35.8%, 8.9~218.5 g kg^{-1} , B층은 6.4~80.2%, 13.2~69.1%, 0.3~43.2%, 3.0~219 g kg^{-1} , C층은 15.5~95.1%, 0.0~62.8%, 2.7~35.8%, 2.0~74 g kg^{-1} , 이었다. 토양층위별 입자특성과 K_s 의 관계를 화강암 및 편마암 지대 토양 연결군들로 한정하여 분석한 결과 상관성은 확연히 증가하였다. A층의 경우 점토함량이 고도의 부의 상관성을 나타내었고 ($r=-0.63^{**}$) 유기물함량이 매우 고도의 정의 상관성을 나타내었다 ($r=0.80^{***}$) (Fig. 2). B층은 A층과 유사한 경향을 나타내었다. C층의 경우 점토함량이 고도의 부의 상관성 ($r=-0.74^{**}$)을 나타내었다. 화강암 및 편마암 토양의 입자특성별 범위는 모래, 미사, 점토, 유기물 함량의 순으로 A층은 23.5~79.1%, 13.5~49.8%, 2.8~28.7%, 9.0~54 g kg^{-1} , B층은 13.6~79.7%, 13.2~61.2%, 1.2~39.3%, 3.0~64 g kg^{-1} , C층은 15.5~95.1%, 0.0~58.8%, 2.7~35.8%, 2.0~

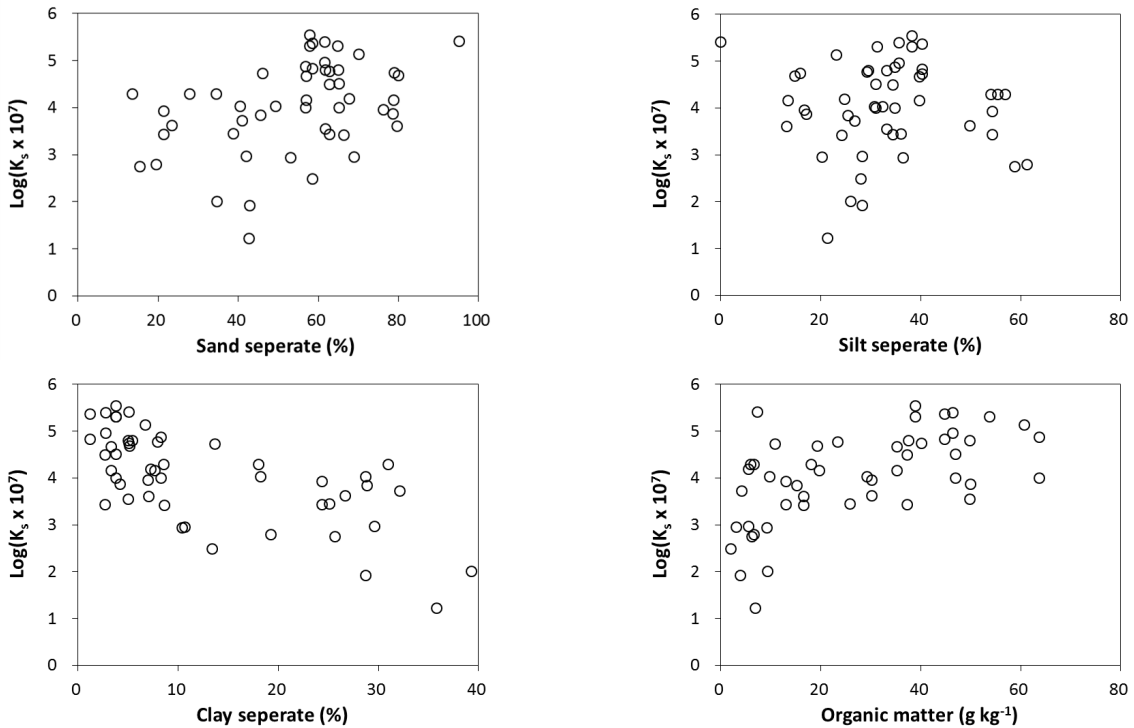


Fig. 2. Relationships between saturated hydraulic conductivity and particle types for major mountainous forest soils mainly originated from granite and gneiss rocks: soils in schist and gneiss catena, granite catena, porphyry catena, rhyolite catena, and alpine land catena.

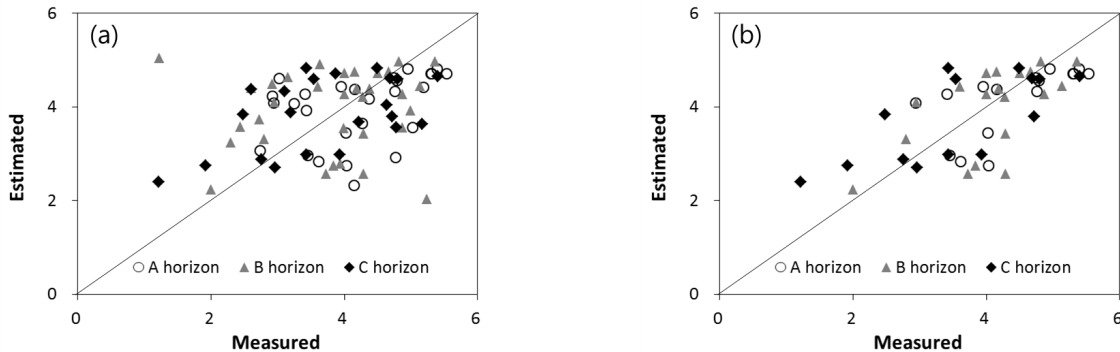


Fig. 3. Comparison between measured and estimated $\text{Log}(K_s \times 10^7)$ of mountainous forest soils in South Korea for (a) total soils and (b) soils from catenae originated from granite and gneiss rocks. K_s is saturated hydraulic conductivity with a unit of cm sec^{-1} and the pedotransfer function of Saxton et al. (1985) was used to estimate K_s .

50 g kg⁻¹,이었다.

산림토양 수리특성에 대한 PTF의 적용성 우리나라 산림토양의 K_s 는 층위별로 A층은 $1.60 \times 10^{-3} \text{ cm sec}^{-1}$ ($5.48 \times 10^{-5} - 3.42 \times 10^{-2}$), B층은 $6.80 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ ($1.68 \times 10^{-6} - 2.29 \times 10^{-2}$), C층은 $4.32 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$ ($1.63 \times 10^{-6} - 2.53 \times 10^{-2}$)으로 나타났다 (Fig. 3). Saxton 식을 이용한 $\text{Log}(K_s \times 10^7)$ 로 표현된 K_s 추정값은 실측값과 상당한 차이를 나타내었으나 화강암 및 편마암 모재에 한정하여 비교하였을 때는 산포도가 눈에 띄게 감소하였다. 전체토양을 대상으로 분석하였을 때 결정계수는 0.09로

낮았으며 RMSE는 1.08로 나타났다 (Table 3). 화강암 및 편마암 모재 토양에 한정하여 분석하였을 때 결정계수는 0.44로 확연히 증가하였다. 전체 토양을 대상으로 평가하였을 때와 화강암 및 편마암 모재 토양을 대상으로 평가하였을 때 모두 C층에서 가장 높은 결정계수를 나타내었다.

다단계 다중회귀를 이용하여 PTF를 개발한 결과 대부분의 경우 점토함량이 가장 영향을 주는 독립변수로 선택되었으며, 다음으로 유기물함량이 선택되었다 (Table 4). C층에서는 점토함량이 유일하게 유의성 있는 독립변수로 선택되었다. 전체 토양을 대상으로 할 때 점토함량과 유기물함량의 계수가 모두 음의 값을 나타내었으나 화강암 및 편마암

Table 3. Determination coefficients (R^2) and root mean square error (RMSE) for estimated hydraulic conductivity by Saxton model (Saxton et al., 1985) and by developed models using all data or data of each horizon.

Model	Statistics	Total soil series				Major soil series ¹			
		All	A	B	C	All	A	B	C
Saxton	R^2	0.09	0.14	0.01	0.30	0.44	0.42	0.40	0.51
	RMSE	1.08	0.91	1.27	1.00	0.77	0.67	0.74	0.86
Jung	R^2	0.20	0.31	0.25	0.35	0.49	0.74	0.48	0.54
	RMSE	0.91	0.75	0.91	0.94	0.71	0.45	0.63	0.82

¹Major soil series are soils mainly originated from granite and gneiss rocks: soils in schist and granite catena, granite catena, porphyry catena, rhyolite catena, and alpine land catena.

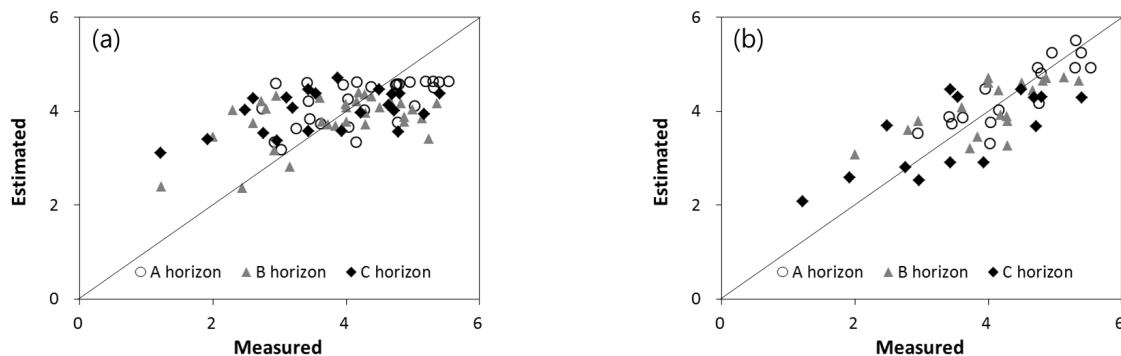
Table 4. Regression equations with variables selected by stepwise processes for saturated hydraulic conductivity of each horizon. Entry significance was $\alpha < 0.15$.

Catena	Horizon	Regression equation ²
All	All	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.041C - 0.077\text{OM} + 4.77$
	A	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.042C - 0.079\text{OM} + 5.10$
	B	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.028C - 0.101\text{OM} + 4.66$
	C	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.041C + 4.58$
Major ¹	All	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.045C + 0.140\text{OM} + 4.23$
	A ³	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.031C + 0.398\text{OM} + 3.49$
	B	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.028C + 0.141\text{OM} + 4.05$
	C	$\text{Log}(K_s \times 10^7) = -0.072C + 4.66$

¹Major catenae include catenae mainly originated from granite and gneiss rocks: soils in schist and granite catena, granite catena, porphyry catena, rhyolite catena, and alpine land catena.

² K_s is the saturated hydraulic conductivity (cm sec^{-1}), C is clay separate (%), and OM is organic matter content (g kg^{-1}).

³Clay was the first selected variable except for A horizon in major catenae in which OM was selected first.

**Fig. 4. Comparison between measured and estimated $\text{Log}(K_s \times 10^7)$ of mountainous forest soils in South Korea for (a) total soils and (b) soils from catenae originated from granite and gneiss rocks. K_s is saturated hydraulic conductivity with a unit of cm sec^{-1} and pedotransfer functions for each horizon were used to estimate K_s .**

모재 토양을 대상으로 할 때 유기물 함량의 계수는 양의 값을 나타내었다. 결정계수를 근거로 할 때 Saxton 식에 비해 개발된 PTF가 K_s 를 3~26% 더 잘 설명할 수 있었으며, RMSE도 0.06~0.36 낮았다. 전체 토양을 대상으로 개발된 PTF는 수식적 한계로 $\text{Log}(K_s \times 10^7)$ 가 4.6 이상으로 K_s 가 큰 토양에 대한 모사가 제한되었다 (Fig. 4). 개발된 PTF의 결정계수는 전체 토양을 대상으로 할 경우 0.20~0.35에 불과하였으나 화강암 및 편마암 모재 토양으로 한정할 경우

0.49~0.74로 증가하였다.

Discussion

입자특성과 K_s 의 관계 모래 함량과 유기물 함량이 증가하면 수리전도도가 증가하고 점토 함량이 많으면 수리전도도가 감소한다 (Hillel, 1988). 본 연구에서 전체 토양을 대상으로 하였을 때 K_s 는 모래 함량과 정의 상관성을 나타

내었고, 점토 함량과 부의 상관성을 나타내었으나 유기물 함량은 K_s 와 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았다 (Table 2). 오히려 회귀분석을 통해 개발된 PTF에서는 유기물 함량의 계수가 음의 값으로 평가되어 동일 점토함량에서 유기물 함량이 증가할수록 K_s 가 작아지는 결과가 도출되었다 (Table 4). 이는 유기물 함량이 K_s 의 감소에 기여했기에 나타난 결과이기 보다는 유기물 함량의 범위가 다른 연접군의 토양을 묶어서 분석했기에 나타난 결과로 해석하는 것이 합당하다. 우리나라 내륙 산림 토양의 유기물 함량은 대부분 $10\sim 50\text{ g kg}^{-1}$ 의 범위에 분포하나 화산회 산림 토양의 유기물 함량은 주로 50 g kg^{-1} 을 상회한다 (NAAS, 2014). 전체 토양을 대상으로 한 상관분석과 회귀분석의 결과는 유기물 함량의 K_s 에 대한 영향보다는 육지 토양과 화산회 토양과 특성 차이가 주로 반영되었을 수 있다. 유기물 함량이 많은 토양에서는 무기 입자의 절대적 용적이 감소하므로 토양의 수리특성에 대한 모래, 점토의 영향보다는 유기입자 또는 유기-점토 복합체의 특성이 중요하다 (Hur et al., 2006; Shin and Kim, 1975).

화강암 및 편마암 유래 토양연접군의 토양을 대상으로 상관분석을 하였을 때 전체 토양을 대상으로 하였을 때와 비교하여 보다 K_s 와 입자 함량과의 상관성이 증가하였으며 특히, 유기물 함량과 점토의 영향이 명확히 나타났다 (Table 2). 이에 대한 두 가지 추론이 가능하다. 첫 번째는 앞에서 기술하였듯이 모래의 특성이 확연히 다르며 유기물 함량이 높은 화산회 토양을 배제하고 모래의 광물적 특성이 비교적 유사한 토양만을 대상으로 분석하였기 때문에 유기물 함량 증가에 따른 K_s 의 증가가 선명히 표출된 것이다 (Hudson, 1994; Lado et al., 2004). 두 번째는 석회암, 혈암 등 퇴적암 모래의 토양은 화강암이나 편마암 모래 토양에 비해 풍화가 빨라 세립질 토양이 많은 반면 석회암 유래 토양의 경우 칼슘의 용출이 많아 공극관의 형성 역시 빠르다 (Hamblin and Christiansen, 2001). 이는 같은 세립질 토양이라도 석회암 모래의 토양은 화강암이나 편마암 모래 토양에 비해 수리전도도가 클 수 있음을 암시한다. 따라서 퇴적암 유래 토양을 분석에서 배제함으로써 점토 함량 증가에 따른 수리전도도 감소가 명확히 나타날 수 있다. 요약하면 토양의 수리 특성은 입자의 크기 분포 및 유기물 함량에 영향을 받으나 모래의 특성에 따른 영향이 크므로 PTF는 개발과 적용은 모래의 특성을 고려하여 수행되어야 한다.

우리나라 산림토양에 대한 PTF의 적용성 Saxton 식은 미국 자연자원보전국에서 축적한 자료에 기반하여 개발된 PTF이며 수리 특성 자료가 없을 때 세계적으로 가장 범용적으로 사용하는 PTF의 하나이다 (Saxton et al., 2006). 우리나라의 산림토양은 대부분 잔적토이며 농경지 토양과 달리 인간 활동에 따른 교란이 적다 (ASI, 1992). 그럼에도

불구하고 전체 토양을 대상으로 하였을 때 결정계수는 0.09로 매우 낮았으며 이는 K_s 를 결정하는데 있어 입자특성 외에 다른 인자의 특성이 주요하게 작용함을 의미한다. 화강암 및 편마암 유래 토양을 대상으로 한정하였을 때 0.44의 결정계수를 나타내었다 (Table 3). 이는 Saxton 식은 개발시 유기물 함량이 8%가 넘는 토양이 배제되었기 때문에 유기물 함량이 높은 토양에 대해 적용이 제한될 뿐만 아니라 (Saxton, et al., 2006) 화산회 유래 토양이나 석회암 유래 토양 등 특성이 고유한 토양에 대해서는 해석력이 떨어질 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 현상은 본 연구에서 측정한 자료를 기반으로 한 PTF에서도 동일하게 나타났다. 화강암 및 편마암 유래 토양을 대상으로 층위별로 개발된 PTF들은 층위별로 입자 특성이 미치는 영향이 서로 다르다는 것을 제시한다. A층에 대한 PTF에서 유기물 함량이 1번 독립변수로 채택된 것은 A층의 K_s 에 유기물 함량이 가장 큰 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 유기물은 토양 내에서 입단의 형성을 돕고 안전성을 높여 대공극의 발달을 촉진하는데 이는 주로 A층에서 일어난다 (Hillel, 1998; Hudson 1994). 산림토양은 고지대에 위치한 경우가 많아 농경지 토양에 비해 유기물의 투입이 많으면서 분해가 적어 유기물 함량이 높고 토양의 물리적 특성에 대한 유기물의 영향이 크다 (ASI, 1992; NAAS, 2014). B층의 K_s 에 영향을 준 변수는 점토 함량과 유기물 함량이었으며 C층의 K_s 에 영향을 준 변수로는 점토 함량만이 채택되었다. 이는 표토에서 모래층으로 내려갈수록 유기물 함량이 K_s 에 미치는 영향이 작아지며 점토 함량의 영향은 커짐을 의미한다. 결론적으로 PTF는 토양 모래의 특성을 고려하여 적용하여야 하며, 토양 층위에 따라 수리특성에 영향을 주는 인자가 달라지기 때문에 보다 정확한 K_s 의 추정을 위해서는 층위별로 PTF를 개발하고 적용하는 것이 필요하다.

Conclusion

우리나라 산림토양의 K_s 는 입자특성과 명확한 상관관계를 나타내었다. 로그로 변환된 K_s 는 모래, 유기물 함량과 양의 상관관계, 점토함량과 음의 상관 관계가 있었다. K_s 와 입자특성의 관계는 층위별, 모래별로 나누어 분석하였을 때 보다 유의성있는 상관성을 나타내었다. 따라서 PTF는 모든 토양에 공통적으로 적용하기 보다 모래의 특성에 따라 제한적으로 활용하는 것이 모형의 정확성을 높일 수 있었다. 전체 토양 연접군을 대상으로 기존 PTF식 및 층위별 PTF의 적용성을 평가하였을 때 보다 입자의 특성이 비교적 유사한 화강암 및 편마암 유래 토양에 대한 PTF 적용성을 훨씬 높였으며 이는 화산회 유래 토양이나 석회암 유래 토양이 우리나라의 주된 토양인 화강암 및 편마암 유래 토양과 유기물 함량이나 풍화특성에서 상이하기 때문이었다. 요약하면

PTF는 토양 모재 특성을 고려하여 적용하여야 하며, 토양 층위에 따라 수리특성에 영향을 주는 인자가 달라지기 때문에 보다 정확한 K_s 의 추정을 위해서는 층위별로 PTF를 개발하고 적용하는 것이 필요하다.

References

- Agricultural Science Institute (ASI). 1992. Introduction of Korean Soil. ASI. Suwon, Republic of Korea.
- Campbell, G.S. 1985. Soil Physics with Basic. Elsevier. NY, USA.
- Cosby, B.J., G.M. Hornberger, R.B., Clapp, and T.R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* 20:682-690.
- 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.
- Hamblin, W.K., and E.H. Christiansen. 2003. *Earth's Dynamic Systems*. 10th ed. Prentice Hall. NJ, USA.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press, CA, USA.
- Hudson, B. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Conserv.* 49:189-193.
- Hur, S., K. Moon, K. Jung, S. Ha, K. Song, H. Lim, 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: 329-333.
- Jung, Y. and K. Ryu. 1976. Hydraulic characteristics of upland soils in Korea, p.97-119. In: ASI Annual Research Report 1975. ASI. Suwon, Republic of Korea.
- KOSIS. 2014. Korean statistical information service. http://kosis.kr/statisticsList/statisticsList_01List.jsp?vwcd=MT_ZTITLE&parentId=H.
- Lado, M., A. Paz, M. Benhur. 2004. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:234-242.
- McCuen, R.H. 1982. *A Guide to Hydrologic Analysis using SCS Methods*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. NJ, USA.
- McKenzie, N., H. Cresswell, T. Green. 2002. Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity using tension infiltrometer, p.119- 130. In: N. McKenzie, K. Coughlan, N. Cresswell (1st ed). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation*. CSIRO Publishing. VIC, Australia.
- Mishra, S.K. and V.P. Singh. 2003. *Soil conservation service curve number methodology*. Kluwer Academic Publishers. MA, USA.
- National Academy of Agricultural Science (NAAS), 2014. *Taxonomical Classification of Korean Soils*. NAAS. Suwon, Republic of Korea.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000a. *Analysis method of soil and plant*. NIAST, Suwon, Republic of Korea.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST). 2000b. *Taxonomical Classification of Korean Soils*. NIAST. Suwon, Republic of Korea.
- National Soil Survey Center(NSSC). 2002. *Field book for describing and sampling soil*. Ver. 3.0. USDA-NRCS. USA.
- Oh, J. and K. Ryu. 1973. Survey on water consumption of paddy rice in major soil series in Korea, p.218-244. In: ASI Annual Research Report 1972. ASI. Suwon, Republic of Korea.
- Reynolds, W.D. 1993. Saturated hydraulic conductivity:field measurement. P. 599-613. In: M.R. Carter (9th ed). *Soil sampling and Methods of analysis*. Lewis Publication. FL, USA.
- Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1990. Pondered infiltration from a single ring : I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:233-1241.
- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soilwater characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1031-1036.
- Saxton, K.E. and W.J. Rawls. 2006. *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569-1578.
- Shin, Y. and H. Kim. 1975. Characteristics of volcanic ash soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 3:113-119.
- Sonn, Y., H. Cho., B. Hyun, H. Chun, and K. Shin. 2015. Analysis of catena on representative soils derived from granite and granite gneiss. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48: 255-261.
- Vereecken, H., J. Maes, J. Feyen. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Sci.* 149:1-12.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.* 4:1259-1273.