

〈論 文〉

多孔性 媒質의 水理特性 推定
 Estimation of Hydraulic Properties in Porous Media

박 재 현*, 박 창 근**, 선우 중호***
 PARK Jae Hyeon, PARK Chang Kun and SONU Jung Ho

Abstract □ The analysis of Richards eq. requires data of the soil water retention function and the unsaturated hydraulic conductivity. The soil water retention function was measured through the use of the developed apparatus and the saturated hydraulic conductivity was measured by the constant head method for each soil sample corresponding to the A, B, C types of SCS. In order to obtain one water retention function and one unsaturated hydraulic conductivity which represent each soil group, van Genuchten's eq. and Mualem's pore-structure model was chosen respectively. Parameters of van Genuchten's eq. are estimated for each soil group using data obtained in the experiments, and estimated values give a basis to analyze the unsaturated flow in the non-measured region efficiently.

요 지 : Richards식을 해석하려면 토양의 수리특성인 물보유함수와 비포화투수계수에 대한 자료가 필요하다. SCS에서 구분한 토양군중 A, B, C에 해당한다고 판단되는 토양시료를 채취하여 각 토양군별로 본 연구에서 개발한 장치를 이용하여 물보유함수를 측정하였고, 또한 정수두법으로 포화투수계수를 측정하였다. 각 토양군을 대표할 수 있는 하나의 물보유함수와 비포화투수계수를 산정하기 위하여 van Genuchten의 물보유함수와 Mualem의 투수계수에측모형을 이용하였다. 각 토양군별로 실측된 자료를 이용하여 van Genuchten식의 매개변수를 추정된 값을 제시하였고, 그와 같은 자료는 미실측지역에서 비포화흐름을 해석하고자할 때 하나의 기준으로 사용될 수 있다.

1. 서 론

일반적으로 비포화 흐름을 지배하는 방정식은 Richards식으로 표시된다. 이 식은 종속변수가 함수량(θ) 또는 모세관 압력수두(ψ)인 두가지 형태로 비포화 흐름을 해석할 때 사용된다. Hills 등(1989), Celia 등(1990)에 의하면 종속변수가 ψ 인 식의 장점은 포화-비포화 흐름이 결합된 문제, 지표면 담수(ponding)문제 등을 해석할 때 상대적으로 안정된 수치해를 제공한다는 것이다. 또한 여

러 층으로 이루어진 토양기둥에 대하여 층경계에서 모세관 압력수두는 연속이지만 함수량은 불연속이므로, 다음과 같이 표시되는 종속변수가 ψ 인 식은 이 경우에 직접 사용되어 질 수 있다.

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z},$$

$$C(\psi) = \frac{d\theta(\psi)}{d\psi} \tag{1}$$

여기서 C는 함수보유능력(water capacity), K는 비포화 투수계수, t는 시간, z는鉛直下方向이

* 서울대학교 토목공학과 박사수료
 ** 서울대학교 토목공학과 조교
 *** 서울대학교 토목공학과 교수

양수(positive-downward)인 거리이다.

식(1)을 사용하여 비포화 흐름을 해석하려면 다공성 매질의 수리특성인 물보유함수(water retention function, $\theta(\Psi)$)와 비포화 투수계수에 대한 실측자료가 필요하다. Field 등(1984), Nielsen 등(1986), Russo(1988)는 $K(\Psi)$ 를 측정하는 것은 시간과 비용이 많이 요구되고 측정 절차가 까다로운 반면, $\theta(\Psi)$ 와 포화투수계수 K_s 는 상대적으로 비교적 쉽게 측정할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 $\theta(\Psi)$ 와 K_s 에 대한 측정자료를 이용하여 비포화 투수계수 K 를 예측하는 모형(투수계수 예측모형, pore-structure model)의 개발은 바람직하다고 할 수 있다. Child와 Collis-George(1950), Burdine(1953), Marshall(1958), Mualem(1976) 등은 이러한 모형을 개발한 바 있는데, 비교적 이론적 기반을 갖추고 가장 널리 쓰이고 있는 Mualem(1976) 모형은 다음과 같다.

$$K_r(\theta) = S^{1/2} \left[\int_0^\theta \frac{d(\theta)}{\Psi(\theta)} \left[\int_0^{\theta_s} \frac{d(\theta)}{\Psi(\theta)} \right]^{-1} \right]^2 \quad (2)$$

여기서 $K_r(\theta) (=K(\theta)/K_s)$ 는 상대 비포화 투수계수, $S = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 는 유효포화도, θ_s 는 포화함수량, θ_r 은 잔여함수량, $\theta = (\theta - \theta_r)$ 은 유효 함수량, $\theta_s = (\theta_s - \theta_r)$ 는 유효 포화함수량이다. 따라서 효율적인 비포화 흐름을 해석하기 위해 주어진 토양에 대한 물보유함수와 비포화 투수계수를 측정하는 대신, 물보유함수와 포화 투수계수를 측정하고 투수계수 예측모형을 이용하여 비포화 투수계수를 산정하는 것이 바람직하다고 하겠다.

본 연구의 주요 목적은 SCS에서 분류한 4가지 토양군(soil group)중 A, B, C에 해당한다고 판단되는 국내의 토양시료를 채취하여 토양의 수리특성을 측정하는데 있다(D는 거의 불투수성 토양이므로 실험대상에서 제외). 즉 본 연구에서 개발한 장치를 이용하여 각 토양군에 대한 물보유함수를 측정하고, 정수두 투수계수 실험에 의해 포화 투수계수를 측정하였다. 또한 각 토양군에 대하여 측정된 물보유함수 자료를 이용하여 van Genuchten(1980)의 물보유함수 식에 나타나는 매개변수를 추정하고, van Genuchten(1980)의 식과 투수계

수 예측모형인 식(2)를 이용하여 비포화 투수계수를 산정하고자 한다. 본 실험에서는 θ 와 Ψ 의 관계에서 발생하는 이력현상(hysteresis)은 고려되지 않았고, 젖음과정(wetting process)에서의 물보유함수만을 측정하였다.

2. 토양시료의 선정과 분류

본 연구를 위한 토양시료는 미사리 지역, 능곡 지역, 관악산 지역 등 서울 근교의 나대지를 주 대상으로 하여 채취되었다. 시료선정에 있어 유역을 대표할 수 있는 토양군을 선정하는 것이 바람직하나, 유역을 구성하는 토양군의 공간적 분포와 대표성에 관한 정보가 부족하므로 몇개의 시료를 통해 유역의 대표성을 표현하는 것은 거의 불가능하다. 하지만 본 연구에서는 토양도를 기초로 하여 어떤 토양이 상대적으로 넓게 분포하는 지역이 유역을 대표하는 지역으로 간주하고, 따라서 이들 지역을 토양시료 채취 대상으로 하여 채취된 토양이 유역의 대표성을 표현하게 하였다. 특히 위에 언급된 지역을 택한 이유는 이들 지역이 토양도를 참조하여 볼 때 유역을 구성하는 중요한 토양들을 포함하고 있으며, 또한 서울 근교에서 시료채취가 용이하다는 점이다. 또한 이들 지역은 도시화가 되지 않은 곳으로 토양도에 표시된 기호를 통해 토양성분을 쉽게 알 수 있다는 장점이 있다. 각 지역에서 채취된 토양시료에 대한 토양도상의 토양기호는 표 1과 같다.

표 1. 시료채취지역 및 토양기호

시료채취지역	미사리		관악산			능곡			
시료종류	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
토양기호	Afc	Apa	Afa	Mab	Rab	Mac	Fmb	Fmb	Apa

본 연구에서는 채취된 토양시료를 분류하기 위하여, SCS에서 나누는 A, B, C의 세가지 토양군으로 구분하였다. 먼저 채취한 시료에 대한 토양분석을 위해 체분석을 하였다. 이 결과를 바탕으로 토성분류표(미국 농무성)와 土壤圖(농촌진흥청)를 참조하여 점토, 모래, 미사의 함량비에 따른 토성을 분류하였고, 이들 자료와 채취한 토양시료의 최소침투율을 실험으로 측정하여 토양군을 결정하였

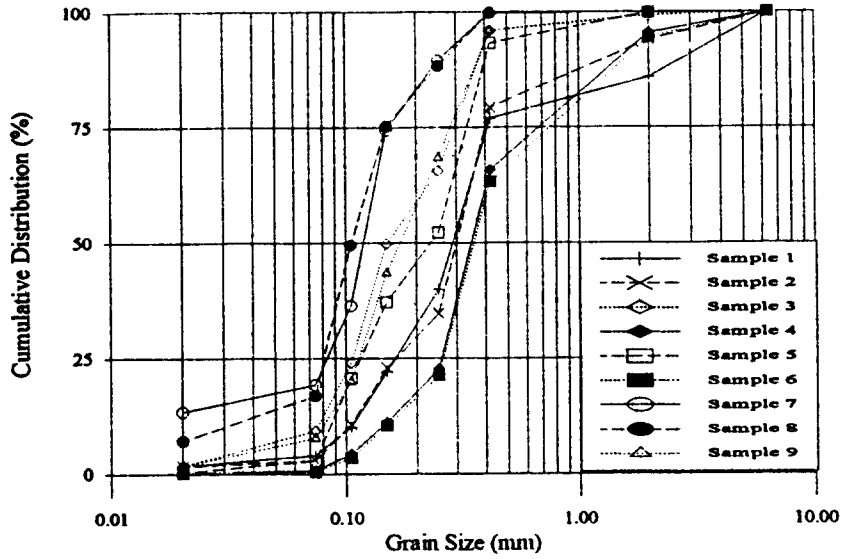


그림 1. 각 토양시료의 입경별 누가곡선

표 2. 토양군별 최소침투율

토양군	최소침투율 (cm/sec)
A	$2.1 \times 10^{-4} - 3.2 \times 10^{-4}$
B	$1.1 \times 10^{-4} - 2.1 \times 10^{-4}$
C	$3.5 \times 10^{-5} - 1.1 \times 10^{-4}$
D	$0 - 3.5 \times 10^{-5}$

표 3. SCS방법에 의한 토양분류

토양군	시료종류	포화투수계수 (cm/s)
A	1, 4, 6	$2.361 \times 10^{-4} - 8.952 \times 10^{-4}$
B	2, 7, 9	$1.125 \times 10^{-4} - 2.032 \times 10^{-4}$
C	3, 5, 8	$3.572 \times 10^{-5} - 5.637 \times 10^{-4}$

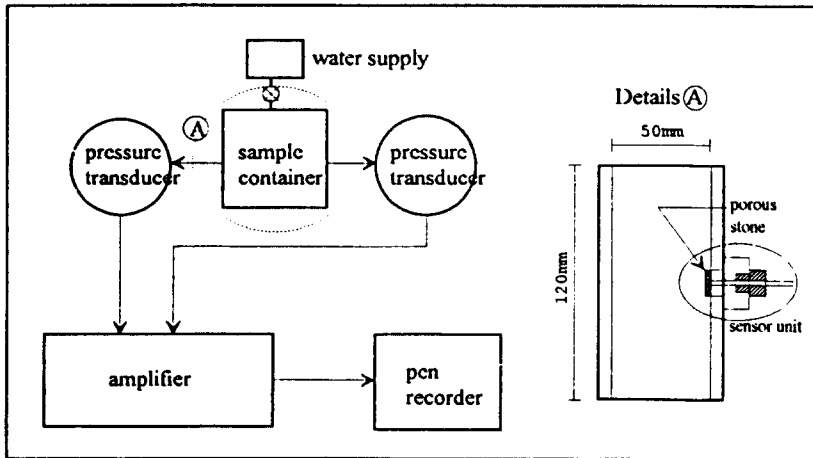


그림 2. 실험장치 모식도

다. 여기서 최소침투율은 포화투수계수에 해당한다. 그림 1은 체분석 결과를 입경별 누가곡선으로 표시한 것이다. 토양균을 구분하는데 사용한 최소침투율은 표 2에 나타나 있다. 이를 근거로 하여 결정한 SCS방법의 토양분류 결과는 표 3과 같다.

3. 실험 장치와 실험방법

함수량과 모세관 압력수두와의 관계를 나타내는 물보유함수에 대한 실측자료를 얻기 위하여 본 연구에서 물보유함수 측정 장치를 개발하였다. 개발된 실험장치 모식도는 그림 2에 나타나 있다.

실험장치는 일정한 양의 물을 공급하는 장치, 토양시료를 담아 실험을 하는 시료용기, 모세관 압력을 측정하는 센서, 센서를 통하여 전달된 압력을 전기신호로 바꾸어 주는 압력변환기, 압력변환기에서는 전달되는 전기신호를 증폭하는 앰프, 이 신호를 기록하는 펜 기록계 등으로 구성된다. 시료용기는 내경 5cm, 길이 12cm의 아크릴로 만들어진 용기로서 용기의 벽면에는 다공성암(porous stone)으로 만들어진 센서를 부착하여 각 지점에서의 압력수두를 측정할 수 있게 제작되었다. 압력변환기는 KYOWA strain gage (PD-1000GA, PD-200GA)를 사용하였고 압력을 전달하는 매질로는 물을 사용하였다. 본 연구에 사용한 압력변환기의 작동원리는 다음과 같다. 부압인 모세관 압력에 의해 매질인 물이 토양속으로 흡수되면, 이로 인한 압력이 압력변환기의 strain gage에 변위를 주어 결국 저항차를 발생시킨다. 이 저항차에 의한 전기신호는 앰프로 전달된다. 앰프는 BALDWIN MD-6E-F, 펜 기록계는 PANTOS U-329를 사용하였다.

개발된 기자재를 이용하여 실험을 수행하였는데, 각 토양균에 대한 물보유함수를 얻기 위한 실험과정은 다음과 같다.

(1) 시료용기에 토양시료를 균질하게 다져 넣는다. 설치된 시료의 밀도는 가능한 현장밀도와 동일한 값을 가지도록 다짐횟수를 조정하여 다짐을 하였다.

(2) 시료의 표면에 일정한 양의 물을 연속적으로 공급하여 토양시료가 일정한 함수량을 가지게

될 때, 위에서 소개한 기기들을 이용하여 주어진 함수량에 대한 모세관 압력을 측정한다. 기기를 통해 측정되는 모세관 압력이 천천히 변화하여 정상(steady)상태에까지 도달하는데 약 2시간이 소요되었다. 토양의 모세관 압력에 의해 압력변환기속의 물이 다공질암으로 만들어진 센서를 통해 토양속 공극으로 서서히 빠져나가기 때문에 많은 시간이 소요되며, 시간에 따라 변하지 않는 정상상태가 될 때의 압력이 측정하고자하는 함수량에 대한 모세관 압력수두가 된다.

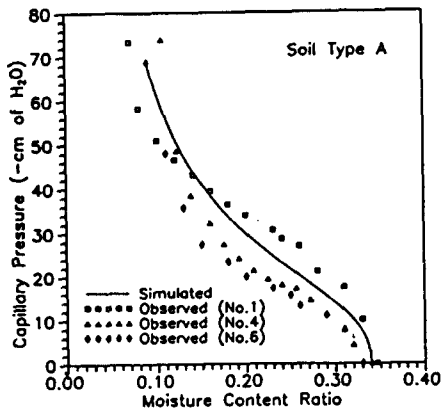
(3) 포화 함수량까지 함수량을 점차로 증가시켜 가며 과정(2)를 반복하여 최종적으로 함수량과 모세관 압력사이의 관계에 대한 실험자료를 얻는다. 실험후 측정자료를 정리할 때 장시간의 실험으로 인한 시료내의 수분 증발도 고려하여야 한다. 이를 위해 실험 始點과 終點의 토양중량과 공급한 물의 양을 비교하여 시간에 따른 토양의 함수량을 선형으로 보간하였다. 그 결과 증발의 영향은 미소(약 0.4% 증발)함을 알 수 있었다.

포화투수계수를 구하기 위하여 정수두 투수계수 실험을 하였으며, 또한 포화상태의 토양시료에 대한 포화함수량 및 자연건조된 상태의 토양시료에 대한 잔여함수량을 구하였다. 이때 토양시료를 건조시키기 위하여 건조오븐을 이용하였으며, 토양시료를 오븐에 넣어 24시간 건조시켜 순수한 토양만의 무게를 측정하였다.

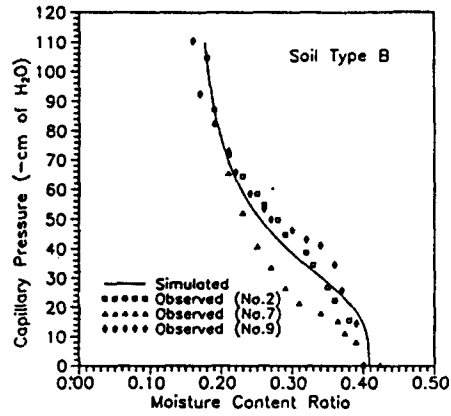
4. 실험결과의 분석

표 3에서와 같이 하나의 토양균에 대하여 채취된 3개의 토양시료를 이용하여 함수량에 따른 모세관 압력수두를 상기 절차에 따라 측정하였고, 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3의 (a), (b), (c)는 토양균 A, B, C에 해당하는 결과이다. 또한 포화투수계수와 포화함수량 및 잔여함수량과 같은 시료의 수리특성을 실험을 통하여 얻었으며, 이 결과는 표 4에 나타나 있다.

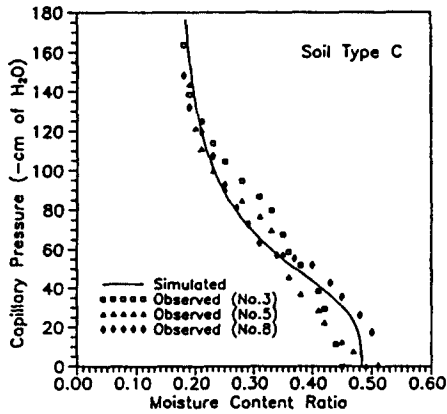
많은 학자들이 물보유함수를 표시하는 여러가지 식을 제안하였는데, Mishra 등(1989)에 의하면 대표적으로 많이 쓰이는 것은 Brooks와 Corey(1964)식과 van Genuchten(1980)식이고 그 형



(a) Soil Type A



(b) Soil Type B



(c) Soil Type C

그림 3. 함수량과 모세관 압력수두에 관한 실험치 및 대표곡선
(실선은 각 토양군을 대표하는 곡선으로 Van Genuchten식으로 모의됨.)

표 4. 토양시료의 수리특성

토양 대양	시료 종류	포화투수계수 K _s (cm/sec)	잔여함수량 θ _r	포화함수량 θ _s
A	(1)	4.166 × 10 ⁻⁴	0.070	0.346
	(4)	2.361 × 10 ⁻⁴	0.106	0.340
	(6)	8.952 × 10 ⁻⁴	0.092	0.325
B	(2)	1.649 × 10 ⁻⁴	0.178	0.400
	(7)	1.125 × 10 ⁻⁴	0.187	0.423
	(9)	2.032 × 10 ⁻⁴	0.163	0.403
C	(3)	4.623 × 10 ⁻⁵	0.178	0.449
	(5)	3.572 × 10 ⁻⁵	0.193	0.492
	(8)	5.637 × 10 ⁻⁵	0.177	0.513

태는 각각 다음과 같다.

$$S = \left[\frac{\Psi}{\Psi_{ac}} \right]^{-\lambda}, \quad |\Psi| > |\Psi_{ac}|$$

$$S = 1, \quad |\Psi| < |\Psi_{ac}|$$

: Brooks-Corey식(1964) (3)

$$S = \frac{1}{(1 + |a\Psi|^n)^m}$$

m = 1 - 1/n : van Genuchten식(1980) (4)

여기서 Ψ_{ac} 는 임계 모세관 압력수두(air entry

value)이고, λ , a 와 n 은 매개변수이다.

상기 두식은 적용하는데 있어 각각의 장단점이 있는데, 그 특성은 다음과 같다. 물리적인 관점에서 볼 때 포화함수량 상태에 있는 다공성 매질에서 물이 배수 되려면 압력이 일정한 압력(Ψ_{ac})이하로 떨어지야 하므로, Brooks와 Corey식이 이러한 물리적 현상을 잘 설명할 수 있다. 그러나 실험으로 Ψ_{ac} 의 정확한 값을 구한다는 것은 거의 불가능하므로 실측된 Ψ_{ac} 값이 어느정도 신뢰성을 가지는가는 의문이다. 또한 Brooks와 Corey식은 Ψ_{ac} 에서 식(1)의 함수보유능력 C 를 계산할 때 불연속이 발생하므로 수치해석에 사용되려면 수치해의 안정성을 확보하기 위해 Ψ_{ac} 부근에서 적절한 가정을 도입하여야만 하는데 반해, van Genuchten식에서는 모든 모세관 압력수두 구간에서 C 가 연속이므로 수치해석을 효율적으로 수행할 수 있다. 즉 C 는 식(4)을 Ψ 에 대해 미분하면 다음과 같이 모든 Ψ 에 대하여 연속적인(continuous) 형태로 표시된다.

$$C = (\theta_n - \theta_r) \cdot a(1-n) \cdot |a\Psi|^{n-1} \cdot (1 + |a\Psi|^n)^{1/n-2} \quad (5)$$

따라서 본 연구에서는 실측된 함수량과 모세관 압력수두에 대한 자료를 분석하기 위하여 van Genuchten식을 사용하고자 한다.

이미 언급한 바와 같이 토양군별로 각각 3개의 토양시료를 선택하였다. 선택된 3개의 토양시료가 각 토양군을 대표한다고 가정하여, 각 토양군을 대표할 수 있는 하나의 물보유함수를 van Genuchten식으로 표시하고자 한다. 따라서 각 토양군별로 3개의 토양시료에 대한 함수량 와 모세관 압력수두에 대한 측정자료를 이용하여 van Genuchten식의 매개변수를 추정하고자 한다. van Genuchten식의 매개변수는 통계패키지인 SAS (Statistical Analysis System)의 DUD(Doesn't Used Derivative)방법에 의하여 추정하였다. 매개변수 추정을 통하여 얻어진 각 토양군별 a , n 값과 θ_s 와 θ_r 의 산술평균한 값은 표 5에 나타나 있다. 추정된 매개변수의 값을 이용하여 각 토양군을 대표할 수 있는 물보유함수가 그림 3에 실선으로 표시되어져 있다.

표 5 토양군별 매개변수와 대표함수량

토양군	a	n	θ_s	θ_r
A	0.042339	2.768706	0.339	0.089
B	0.120633	1.773529	0.408	0.177
C	0.018995	3.281066	0.483	0.183

한편 비포화 투수계수를 실험으로 얻는 작업은 용이하지 않으므로, 투수계수 예측모형을 이용하여 비포화 투수계수를 산정하고자 한다. 따라서 식(4)를 식(2)에 대입하여 적분을 수행하면 비포화 투수계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K(S) = K_s S^{1/2} \{1 - (1 - S^{1/m})^m\}^2 \quad (6)$$

매개변수 추정을 통해 얻어진 표 5의 값을 이용하여 식(6)과 같이 표시되는 비포화 투수계수를 구할 수 있다. 즉 각 토양군을 대표할 수 있는 비포화 투수계수 대표곡선은 그림 4에 나타나 있다.

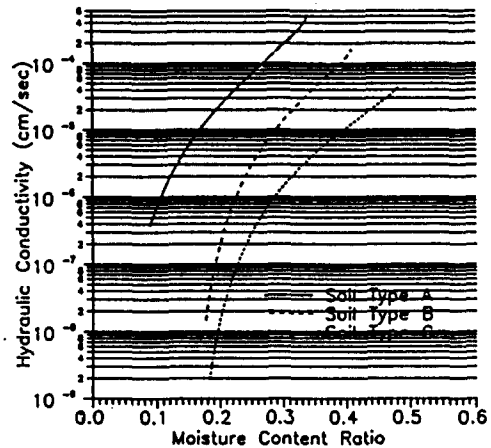


그림 4. 토양군별 비포화 투수계수

5. 결 론

비포화 흐름의 지배방정식인 Richards식을 해석하려면 토양의 수리특성인 물보유함수와 비포화투수계수에 대한 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 서울근교 미사리, 관악산, 능곡 지역의 나대

지에서 토양시료를 채취하여 SCS에서 제시한 기준에 의거 채취된 토양시료를 A, B, C로 구분하고(각 토양군마다 3개의 토양시료를 선택), 각 토양군에 대하여 본 연구에서 개발한 장치를 이용하여 물보유함수를 측정하였다. 또한 투수계수모형을 이용한 비포화투수계수 산정을 위하여 정수두 투수 실험으로 포화투수계수를 측정하였고, 또한 포화함수량 및 잔여함수량을 측정하였다. 표 4의 결과를 통해 토양시료를 구성하는 주성분이 모래에서 clay 또는 loam으로 변화될수록(즉, 토양군이 A군에서 C군으로 갈수록) 잔여함수량 및 포화함수량이 더 커지고, 공극률도 더 커짐을 알 수 있다. 각 토양군을 대표할 수 있는 하나의 물보유함수와 비포화투수계수를 산정하기 위하여 van Genuchten(1980)의 물보유함수와 Mualem(1976)의 투수계수 예측모형을 이용하였다. 각 토양군별로 측정된 자료와 통계패키지인 SAS를 이용하여 van Genuchten(1980)식의 매개변수를 추정하였다. 이와 같이 각 토양군을 대표할 수 있는 하나의 물보유함수와 비포화 투수계수를 제시함으로써 미실측 지역에서 비포화흐름을 해석해야할 경우, 특히 우리나라와 같이 이러한 자료가 거의 전무한 경우, 본 연구에서 제시된 결과를 바탕으로 하여 Richards식을 이용하여 효율적으로 비포화흐름을 해석할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 IHP의 연구비지원에 의하여 수행되었으며 지원해주신 수문학회에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964), "Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design", Trans. of ASAE, 7(1), pp.26-28
2. Burdine, N.T. (1953), "Relative Permeability Calculations from Pore-Size Distribution Data", Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall.

- Eng. 198, pp.450 -453 (cited in van Genuchten, 1980)
3. Celia, M.A., Bouloutas, C.E. and Zarba, R.L. (1990), "A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation", W.R.R., 26(7), pp. 1483-1496
4. Childs, E.C. and Collis-George, N. (1950), "The Permeability of Porous Materials", Proc. of Royal Society of London, Series A, 201, pp.392-405
5. Field, J.A., Parker, J.C. and Powell, N.L. (1984), "Comparison of Field & Laboratory-Measured and Predicted Hydraulic Properties of a Soil with Macropores", Soil Science, 138 (6), pp.385-396
6. Hills, R.G., Porro, I., Hudson, D.B. and Wierenga, P.J. (1989), "Modeling One-Dimensional Infiltration into Very Dry Soils 1. Model Development and Evaluation", W.R.R., 26(5), pp.1259-1269
7. Marshall, T.J. (1958), "A Relation between Permeability and Size Distribution of Pores", Jr. of Soil Sci., 9(1)
8. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", W.R.R., 12(3), pp.513-522
9. Nielsen, D.R., van Genuchten, M.T. and Bigger, J.W. (1986), "Water Flow and Solute Transport Process in the Unsaturated Zone", W.R.R., 22(9), pp.89S-108S
10. Russo, D. (1988), "Determining Soil Hydraulic Properties by Parameter Estimation: On the Selection of a Model for the Hydraulic Properties", W.R.R., 24(3), pp.453-459
11. van Genuchten, M.T. (1980), "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", Jr. of Soil Sci. Soc. Am., 44, pp.892-898