

Guelph 투수계의 수문학 분야 활용

Application of the Guelph Permeameter to Hydrological Field

박 승 기*
Park, Seung-ki

1. 머리말

침투현상은 물의 순환과정(강우-유출관계)에서 매우 중요한 요소이다. 수문학 연구 중 많은 부분이 강우와 유출관계를 정립하는데 이루어지고 있으며, 이 중에서 가장 불확실성을 내포하고 있는 요소가 바로 침투현상이다. 침투량은 직접유출에 직접적으로 영향을 주며, 이는 흙의 종류, 성질, 구조 및 흙 속의 초기 함수량 등에 따라 그 정도가 다르게 된다.

특히, 침투현상은 유역의 대부분이 산지지형으로 형성되어 있는 우리나라의 현실에서 산불, 병충해, 벌채 및 개발로 인한 자연환경의 급격한 변화에 대한 수문학적 해석과 관개 및 배수설계, 수로설계, 산업폐기물 처리장이나 생활쓰레기 매립장의 침출수량 결정 등에 중요성이 증가하고 있다.

본문에서는 현장투수계인 Guelph Permeameter에 적용된 원리와 이론 및 응용에 대하여 소개하고, 수문학 분야에의 활용방안을 살펴보고자 한다.

2. Guelph Permeameter

Guelph Permeameter는 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)을 표준화된

계산방법에 의해 손쉽게 계산할 수 있으며, 응용값으로 Alpha 상수를 구하여 토양의 구조 및 조직의 구분에 기초자료로 활용할 수 있고, 수착성(S : Sorptivity)을 구하여 Philip(1969)의 침투방정식에 적용할 수 있다.

가. Guelph Permeameter의 원리

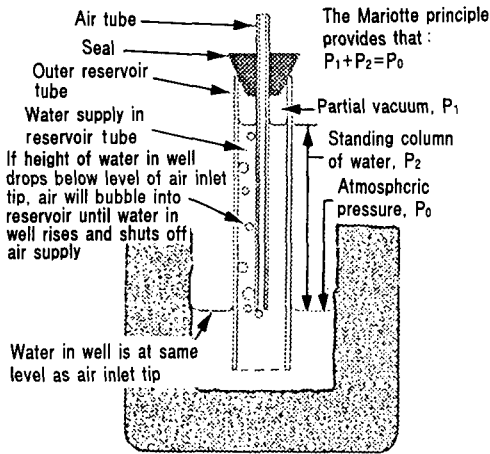
Guelph Permeameter는 <그림-1>과 같이 Mariotte 사이폰 원리를 적용하여, 원통 우물 구멍에서 불포화 토양으로 충전되는 물의 정상류율을 측정하는 정수위 투수계이다. 이 원리는 과거 농촌에서 병아리를 사육할 때 정종 큰병을 물그릇 위에 거꾸로 세워 놓은 형상으로 이해하면 될 것이다. Guelph Permeameter의 구조는 <그림-2>와 같고, 투수계수의 측정 범위는 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ cm/s이며, 원통 우물구멍의 직경은 6.0cm이다.

나. 적용 이론

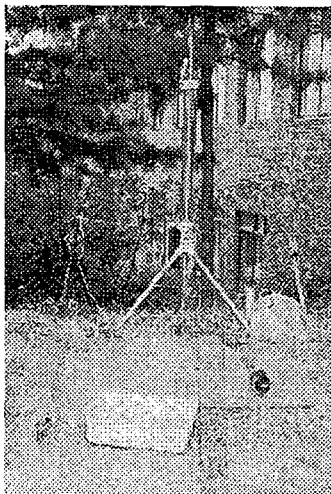
1) 현장포화투수계수(K_{fs})

현장포화투수계수는 단위수리 흡입력 구배에 의하여 수분을 전달하는 토양의 능력, 또는 공기가 혼입된 토양의 포화된 투수계수를 측정하는 것이다. Reynolds(1985) 등은 우물의 정상류 흐름 해석을 위한 Richards 방정식을 식(1)과 같이 풀이하였다. 식(1)의 오른쪽 2개

* 공주대학교 농공학부



〈그림 - 1〉 Mariotte 사이폰 원리



〈그림 - 2〉 Guelph Permeameter의 구조

의 항은 우물에서 흘러나오는 현장포화성분으로 고려할 수 있고, 세 번째 항은 흐름의 불포화 혹은 모세관성분으로 고려될 수 있다.

$$Q_s = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \pi a^2 K_s + \frac{2\pi H}{C} \phi_m \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q_s 는 우물의 밖으로 흐르는 정상류율(m/s), H 는 우물 안 물의 일정한 높이(m),

a 는 우물 반지름(m), K_{fs} 는 현장포화투수계수(m/s), ϕ_m 은 토양수분흐름흡입력(m²/s), C 는 원래 H/a 에 지배받는 무차원 형상계수이다.

2) 토양수분흐름흡입력 (ϕ_m)

토양수분흐름흡입력은 단위시간 안에 단위통제단면을 통하여 모세관력에 의하여 물을 끌어당기는 토양 능력의 측정으로 식(2)와 같이 Gardner(1958)에 의하여 정의되었다.

$$\phi_m = \int_{h_i}^0 K(h)dh, h_i \leq h \leq 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, h_i 는 토양의 초기압력수두, $K(h)$ 는 침투에 의한 투수계수-압력수두의 관계이다.

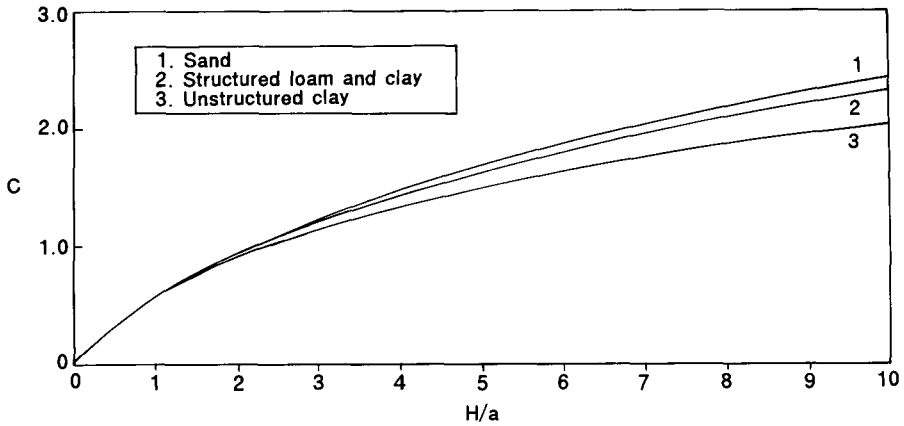
3. 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)의 계산법

가. 표준 계산법

Guelph Permeameter는 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)을 표준화된 계산방법에 의해 손쉽게 계산할 수 있도록 구성하였다. 투수계수가 큰 경우에는 내측과 외측으로 조합된 집수통 상수를 적용하고, 투수계수가 작을 경우에는 내측 집수통 상수를 적용하여 측정한다. 표준계산식은 식(3)과 식(4)와 같으며, 내측과 외측 집수통의 단면적 및 상수는 제작사에서 결정한 값이고, 우물 안 물의 높이는 5cm와 10cm로 유지시키면서 측정한다.

$$K_{fs} = (0.0041)(X)(R_2) - (0.0054)(X)(R_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_m = (0.0572)(X)(R_1) - (0.0237)(X)(R_2) \dots\dots\dots (4)$$



(그림 - 3) 우물 안 수두 H와 우물직경 a 의 비와 C-Factor

여기서, X 는 선정된 집수통 단면적(제작사에서 제시), R_1 은 우물 안 물의 높이 5cm일 때 정상류율(cm/s), R_2 는 우물 안 물의 높이 10cm일 때 정상류율(cm/s)이다.

나. 일반화한 계산법

1) C-Factor

C-Factor는 우물 안 수두 H 와 우물 직경 a 에 의하여 지배받는 수학적으로 파생된 형상인자이다. <그림 - 3>은 사토(Sand), 구조가 발달한 양토(Loam)와 식토(Clay) 그리고 구조가 발달하지 않은 식토(Clay)의 H/a 와 C-Factor의 관계를 나타낸 곡선이다. Guelph Permeameter의 실험적 적용을 위하여 계산에 적용되는 시굴구멍의 직경과 우물의 깊이는 그것들이 일일이 열거되는 표준절차에 따라 다르다.

2) 현장포화투수계수(K_f)

현장포화투수계수(K_f)는 식(5)와 같이 계산되며, G_2 , G_1 , Q_1 및 Q_2 는 각각 식(6), 식(7), 식(8) 및 식(9)와 같이 계산된다.

$$K_f = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \dots\dots\dots (5)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi[2 H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \dots\dots\dots (6)$$

$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]} \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_1 = (X)(\bar{R}_1) \text{ or } (Y)(\bar{R}_1) \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_2 = (X)(\bar{R}_2) \text{ or } (Y)(\bar{R}_2) \dots\dots\dots (9)$$

여기서, a 는 우물의 반경(cm), H_1 , H_2 는 각각 첫 번째와 두 번째로 측정한 우물 안 수두(cm), C_1 , C_2 는 H_1/a 와 H_2/a 에 상응하는 C-Factor, X 와 Y 는 각각 제작사에서 결정한 내측과 외측 집수통으로 조합된 단면적 및 내측 집수통의 단면적이다.

3) 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)

토양수분흐름흡입력(ϕ_m)은 식(10)과 같이 계산되며, J_1 , J_2 는 각각 식(11), 식(12)와 같이 계산된다.

$$\phi_m = J_1 Q_1 - J_2 Q_2 \dots\dots\dots (10)$$

$$J_1 = \frac{(2 H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi[2 H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \dots\dots\dots (11)$$

$$J_2 = J_1 \frac{[(2 H_1^2 + a^2 C_1) C_2]}{[(2 H_2^2 + a^2 C_2) C_1]} \dots\dots (12)$$

4. 응용 계산 및 수문학적 적용

가. α 상수와 적용

Alpha 상수는 토양의 공극성에 지배되는 상수이며, Elrick과 Reynolds(1992)는 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)를 이용하여 식(13)과 같이 계산하였다.

$$\alpha = K_{fs} / \phi_m \dots\dots\dots (13)$$

α 값의 변화는 $1 \text{ m}^{-1} < \alpha < 100 \text{ m}^{-1}$ 이고, 토양의 구조 및 조직연구의 기초자료로 적용할 수 있으며, Bosch(1997)는 Elrick과 Reynolds(1992)가 구분한 토양의 구조 및 조직의 연구를 바탕으로 수문학적 토양군을 <표-1>과 같이 분류하였다.

<표-1> 토양의 구조 및 조직의 연구를 적용한 수문학적 토양군(Bosch, 1997)

α (mm^{-1})	Comments	Hydrologic soil group
∞	Laplace solution (Elrick and Reynolds, 1985). Coarse material	A
0.036	Coarse sands and highly structured soils	A
0.012	Most structured soils and medium and fine sands	B
0.004	Unstructured fine-textured soils	C
0.001	Compacted clays (e.g., clayline liners)	D
0	Gardner solution (Reynolds and Elrick 1985)	D

투수계수/압력수두관계인 $K(\phi)$ 는 K (투수계수)에 있는 토양흡입력 변화를 표현하며, 토양 흡입력이 증가할 때 투수계수는 지수함수적으로

감소하고, 토양흡입력(수두를 cm로 측정할 때)을 위한 투수계수 K 는 식(14)로 예측할 수 있다.

$$K = K_{fs} [e^{(\alpha(\phi))}] \dots\dots\dots (14)$$

여기서, ϕ 는 수두를 cm로 나타낸 토양수분 흡입력, e 는 2.71828 (자연대수의 밑) 이다.

나. 수착성(S : Sorptivity)과 적용

수착성은 습윤한 액체를 흡수하는 토양 능력이며, 확산능 함수가 가정된다면 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)으로부터 계산할 수 있고, Philip(1969)은 식(15)와 같이 구하였다.

$$S = \sqrt{2 (\theta_{fs} - \theta_i) \phi_m} \dots\dots\dots (15)$$

여기서, S 는 수착성($\text{m/s}^{1/2}$), θ_{fs} 는 현장포화 용적 수분량(m^3/m^3), θ_i 는 초기 용적 수분량(m^3/m^3)이다.

Philip(1969)는 투수계수(K)와 토양수분확산 함수(D)를 토양수분 함수로 가정하여 Richards 식을 전개하였으며, Boltzmann 변환 ($\lambda = x t^{-1/2}$)을 적용하여 누가침투량을 시간에 대한 무한급수 형태로 나타낸 후, 이를 수착성(Sorptivity)과 침투계수 항으로 식(16), 식(17)과 같이 누가 침투량과 침투율을 제시하였다.

$$F(t) = S t^{1/2} + A_2 t + A_3 t^{3/2} + A_4 t^2 + \dots\dots + A_n t^{n/2} \dots\dots\dots (16)$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A_2 + \frac{3}{2} A_3 t^{1/2} + \dots\dots + \frac{n}{2} A_n t^{n/2-1} \dots\dots\dots (17)$$

식(17)은 t 가 무한히 커지면 $f(t)$ 도 무한히 커지는 모순이 있으므로 Philip은 식(16), 식(17)을 식(18), 식(19)와 같이 간단히 표시하였다.

$$F(t) = St^{\frac{1}{2}} + At \dots\dots\dots (18)$$

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{S}{2} t^{-\frac{1}{2}} + A \dots\dots\dots (19)$$

여기서, A 는 침투계수로서 t 가 큰 경우 $A = K$ (투수계수 : cm/s)이다.

다. 특이값

1) 음의 값

Guelph Permeameter로 측정된 결과로 K_s 이나 ϕ_m 값이 음의 값으로 계산될 때, 측정지점 토양의 이질성(Heterogeneity)을 나타낼 수 있다. 이것은 전형적으로 토양 층리(Stratification) 내지는 설치동물(Rodent)의 구멍이나 뿌리구멍(Root holes)으로 인한 수문학적 불연속성을 나타내며, 토양 불균질성의 종류와 정도를 계산하기 위한 정밀한 측정이 요구된다.

2) 불균질성 토양

전형적으로 토양은 3차원의 불균질성을 가지고 있다. Guelph Permeameter는 기본적으로 점 측정값을 얻는데 사용되며, 투수계 구조의 간단함과 작동의 용이함 및 깊이별 단면작성 능력 때문에 토양 수분이동 특성의 3차원적 분포 이해를 위하여 매우 유효한 방법이다.

5. 맺는 말

Guelph Permeameter는 어느 곳이나 토양 내에 오거홀을 만들어 사용할 수 있다. 이론에 부합되는 응용해석과 Guelph Permeameter의 기능에 실용적으로 보강 개량되었기 때문에,

관개체계, 배수체계, 수로, 저수지, 위생매립장, 토지처리설비, 폐기물지역, 위험물질저장지역, 부식성 탱크체계, 토양 및 수문학적 연구와 조사, 설계와 모니터 등에 폭넓게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 권무남, 1995. 현장투수시험방법, 한국관개배수, 2(1), pp.57~64.
2. Bosch, D. D., 1997. Constant head permeameter formula dependence on alpha parameter, Transactions of the ASAE(Technical Notes), 40(5), pp.1377~1379.
3. Bouwer, H., 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis, W.R.R., 2, pp.729~738.
4. Elrick, D. E. and W. D. Reynolds. 1992. Methods for analyzing constant-head well permeameter data, Soil Sci. Soc. of Am. J., 56(1), pp.320~323.
5. 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(4), pp.228-232.
6. Philip, J. R., 1969. Theory of infiltration, in advances in hydroscience, ed. by V. T. Chow, 5. Academic Press, pp.215-296.
7. Philip, J. R., 1973. On solving the unsaturated flow equation : 1. The flux-concentration relation, Soil Sci., 116, pp.328~335.
8. Reynolds, W. D., Elrick, D. E., and Clothier. B. E., 1985. The constant head well permeameter : Effect of unsaturated flow, Soil Sci., 139, pp.172~180.
9. Soilmoisture Equipment Co, 1986. Operating instructions Guelph permeameter, Soilmoisture Equipment Co., Santa Barbara. CA., pp.1~28.