

현장투수계를 이용한 유역의 평균침투계수 산정

Estimating of the Watershed Average Infiltration Coefficient Using the Guelph Permeameter

박승기*(충남대) · 김태철(충남대) · 안병기(충남대)

Park, Seung Ki · Kim, Tai Cheol · Ahn, Byoung Gi

Abstract

Three of the most important factors governing liquid transmission in unsaturated soils are field-saturated hydraulic conductivity, K_{fs} , matric flux potential, ϕ_m , and sorptivity, S . The Guelph Permeameter is an in-hole constant-head permeameter, employing the Mariotte Principle. The study was carried out to investigate the characteristics of the watershed average infiltration coefficient measured by the Guelph Permeameter at the Backokpo watershed in the Han river and at the Bangdong watershed in the Keum river.

I. 서론

물의 흙 표면에서 침투현상은 물의 순환과정(강우-유출관계)에서 매우 중요한 요소이다. 수문학 연구중에 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 흙내의 초기함수량 등에 따라 그 정도가 다르게 된다.

특히, 유역의 대부분을 이루고 있는 산지지형이 산불, 병충해, 벌채 및 개발로 인한 자연환경이 급격하게 변화하고 있어 이에 대한 정밀한 분석이 요구되고 있다.

따라서 이 연구에서는 현장투수계(Guelph Permeameter)를 이용하여 평창강 수계 백옥포유역과 금강수계 방동유역에서 대표적인 토양형을 대상으로 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름 흡입력(ϕ_m)을 측정하였고, 유역의 평균침투계수를 산정하였다.

II. Guelph Permeameter

1. Guelph Permeameter의 원리

Guelph Permeameter 는 그림. 1 과 같이 Mariotte 사이폰 원리를 적용하여, 원통 우물구멍에서 불포화 토양으로 추진되는 물의 정상류유를 측정하는 정수위 투수계이다. Guelph Permeameter의 구조는 그림. 2 과 같고, 투수계수의 측정범위는 $10^{-2} \sim 10^6 \text{cm/s}$ 이며, 원통우물구멍의 직경은 6.0cm이다.

2. 적용 이론

가. 현장포화투수계수(K_{fs})

현장포화투수계수는 단위수리 흡입력 구배에 의한 수분을 전달하는 토양의 능력의 측정, 또는 토양에 있는 공기를 존재하는 포화된 투수계수에 대하여 설명이다. Reynolds (1985) 등은 우물의 정상류 흐름 해석을 위한 Richards 방정식을 식 (1)과 같이 풀이하였다. 식(1)의 오른쪽 2개의 항은 우물에서 흘러나오는 현장포화성분이며, 세 번째 항은 흐름의 날포화 혹은 모세관

성분이다.

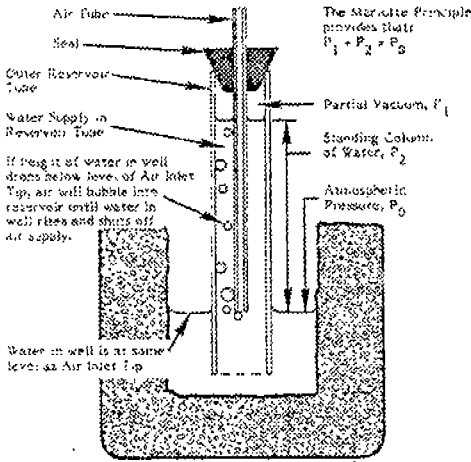


그림. 1 Mariotte 사이폰 원리

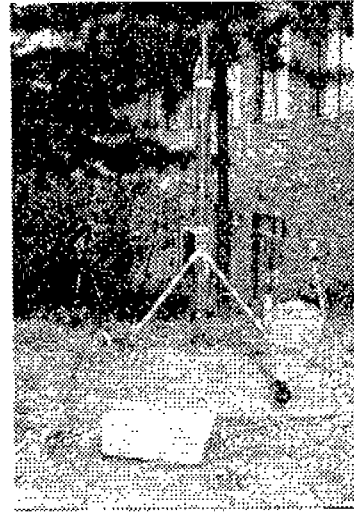


그림. 2 Guelph Permeameter의 구조

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

여기서, Q_s 는 우물의 밖으로 흐르는 정상류율(m^3/s), H 는 우물안 물의 일정한 높이(m), a 는 우물 반지름(m), K_{fs} 는 현장포화투수계수(m/s), ϕ_m 는 토양수분흐름흡입력(m^3/s), C 는 원래 H/a 에 지배받는 무차원 형상계수이다.

나. 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)

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

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

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

Elrick (1988) 등은 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)를 식(3)과 같이 Alpha 상수로 나타냈으며, α 값의 변화는 $1 m^{-1} < \alpha < 100 m^{-1}$ 이고, 토양의 구조 및 조직의 고찰에 기초로 선정할 수 있다.

$$\alpha = K_{fs} / \phi_m \quad (3)$$

다. 수착성(S : Sorptivity)

수착성은 습윤한 액체를 흡수하는 토양 능력이며, 확산능 함수가 가정된다면, 토양수분흐름 흡입력(ϕ_m)으로부터 계산할 수 있고, Philip(1969, 1973)에 의하여 식(4)와 같이 표현되었다.

$$S = \sqrt{2(\theta_{fs} - \theta_i)} \phi_m \quad (4)$$

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

3. 표준 계산법

Guelph Permeameter는 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흐름흡입력(ϕ_m)을 표준화된 계산 방법에 의해 손쉽게 계산할 수 있도록 구성되어 있다. 투수계수가 큰 경우에는 내측과 외측으로 조합된 집수통 상수를 적용하고, 투수계수가 작을 경우에는 내측 집수통 상수를 적용하여 측정한다. 이 연구에서 적용한 표준계산식은 식(5)와 식(6)과 같으며, 내측과 외측 집수통의 단면적 및 상수는 제작사에서 결정한 값이고, 우물안 물의 높이는 5cm와 10cm로 유지시키면서 측정한 값이다.

$$K_{fs} = (0.0041)(X)(R_2) - (0.0054)(X)(R_1) \quad (5)$$

$$\phi_m = (0.572)(X)(R_1) - (0.237)(X)(R_2) \quad (6)$$

여기서, X 는 선정된 집수통 단면적(내측과 외측으로 조합된 집수통을 사용할 경우는 35.45 cm², 내측 집수통을 사용할 경우는 2.14cm²), R_1 은 우물안 물의 높이 5cm일 때 정상류율(cm/s), R_2 는 우물안 물의 높이 10cm일 때 정상류율(cm/s)이다.

III. 자료 및 방법

1. 적용구역

현장투수계에 의한 유역 평균침투계수를 산정하기 위한 대상지역으로 한강수계 평창강 유역의 백옥포지점과 금강수계 방동지점을 선정하였다. 백옥포지점은 IHP 대표수문지점으로 선정되어 하천수위와 지하수위를 측정하고 있는 지점으로 1985년부터 정상적인 관측이 이루어지고 있다. 방동 유역은 대전광역시 서부지역인 유성구 성북동 숲谷川의 상류에 위치하며 1992년 3월 충남대학교 농공학과에서 개설하여 수위관측, 우량관측, 유량측정을 하고 있다. 하류에 있는 방동저수지는 1978년도 축조되어 305ha의 관개용수와 방적공장의 공업용수를 공급하고 있다.

2. 분석방법

적용유역에 대해서 기반암의 특성과 토양통의 점유면적, 분포특성 및 지형의 경사도를 고려하여 그림. 3, 4와 같이 측정지점을 선정하였고, Guelph Permeameter를 이용하여 현장포화투수계수와 토양수분흐름흡입력을 측정하였으며, 분포지역 및 토심에 따른 변화를 조사하였다.

Bouwer(1966)는 토양수분의 흡착과 탈수과정에서 투수계수와 모관수두 관계를 고려하여 평균투수계수는 포화투수계수의 1/2로 추정할 수 있음을 제안하였다.

이 연구에서 유역 평균투수계수는 식(7)과 같이 Guelph Permeameter를 이용하여 구한 대표적인 토양통의 현장포화투수계수(K_{fsi})의 값을 토양통의 점유 면적비에 따른 가중평균치로 구하였다.

$$K_{av} = \sum (K_{fsi} \times Ar_i) / 2 \quad (7)$$

여기서, K_{av} 는 유역평균투수계수, K_{fsi} 는 토양통의 현장포화투수계수, Ar_i 는 토양통의 전체 유역면적에 대한 비($\sum Ar_i = 1$)이다.



그림. 3 백옥포 유역과 방동유역의 토양통 분류도와 측정지점

IV. 결과 및 고찰

1. 토양통 조사

백옥포유역은 오대통 등 19개 토양통과 암석노출지 및 하천구역으로 구성되어 있다. 오대통과 월정통은 각각 47.11%, 29.93%로 전체 77.04%를 점유하고 있다. 방동유역은 송산통, 오산통 등 14개 토양통과 하천구역으로 구성되어 있으며, 송산통과 오산통은 각각 57.27%, 12.86%로 전체 70.13%를 점유하고 있다. 이 연구에서는 대표적인 오대통, 월정통, 오산통 및 송산통 분포지역에 대하여 조사하였으며, 토양통의 물리적 특성은 표. 1 과 같다.

표. 1 백옥포유역 및 방동유역 주요토양통의 특성

통명	토층	두께 (cm)	역함량 (%)	입경(%)					토성	수분장력(%)		
				조사	중사	세사	미사	점토		0.1기압	0.3기압	15기압
오대	A	38	10.3	19.7	7.9	15.1	40.0	17.3	양토	42.9	34.3	12.4
	B	7	34.6	22.4	11.5	21.1	33.5	11.5	사양토	32.4	24.6	6.7
월정	A	44	4.2	17.5	10.7	18.4	39.4	14.0	양토	42.7	34.3	13.8
	B	27	3.0	23.2	25.0	21.5	23.5	6.8	사양토	31.9	23.7	8.9
	C	49	11.3	35.9	26.8	24.3	12.8	0.2	사토	24.1	16.5	5.7
오산	A	12	27.2	23.2	13.7	18.9	24.7	19.5	사양토	30.7	23.3	10.8
	B	38	10.4	16.1	14.1	18.4	32.7	18.7	양토	31.6	25.5	11.4
	C	100	5.8	22.8	13.6	20.5	31.0	12.1	사양토	30.4	22.3	9.6
송산	A	18	7.7	17.2	14.3	26.2	25.0	17.3	사양토	29.9	22.0	9.5
	B	64	23.7	17.2	14.5	33.2	21.7	13.4	사양토	29.7	20.7	8.4
	C	38	28.7	19.3	19.0	38.1	15.8	7.8	사양토	25.6	11.9	8.6

2. 현장 투수계수 조사

백옥포유역과 방동유역에서 선정된 토양통을 대상으로 Guelph Permeameter를 이용하여 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흡수용압력(ϕ_m) 및 Alpha 상수를 측정하였으며, 그결과는 표. 2와 같다. 백옥포 유역은 1996년 6월 6~7일, 8월11~12일에 측정하였으며, 방동유역은 1998년 7월8일에 측정하였다.

표. 2 백옥포유역 및 방동유역의 현장투수계수 조사 결과

유역	측정 지점	부호	심도 (Cm)	Kfs (Cm/sec)	ϕ m (cm/sec)	α (Cm ⁻¹)	토양통		
백옥포	덕거리	산림지	DK1	15	2.77×10^{-3}	**	**	월정	
			30	5.13×10^{-4}	6.25×10^{-5}	0.082			
			45	3.60×10^{-4}	7.87×10^{-5}	0.046			
		벌채지	DK2	15	4.11×10^{-3}	**	**	월정	
				30	6.56×10^{-4}	2.35×10^{-5}	0.279		
				45	1.16×10^{-3}	8.64×10^{-5}	0.134		
		복사면	DK3	15	1.35×10^{-3}	1.36×10^{-4}	0.099	월정	
				30	2.13×10^{-3}	2.15×10^{-2}	0.099		
				45	8.74×10^{-4}	1.64×10^{-2}	0.316		
	창동리	산정	CD1	30	5.02×10^{-3}	4.71×10^{-2}	0.107	월정	
				45	4.96×10^{-3}	1.74×10^{-2}	0.285		
				60	6.29×10^{-3}	5.57×10^{-2}	0.113		
		산록	CD2	30	3.37×10^{-3}	3.42×10^{-2}	0.099	월정	
				45	1.36×10^{-2}	1.37×10^{-2}	0.993		
				60	9.93×10^{-3}	3.47×10^{-2}	0.286		
		산록	CD3	30	8.98×10^{-3}	9.83×10^{-3}	0.914	월정	
				45	1.52×10^{-3}	1.88×10^{-2}	0.081		
				60	3.68×10^{-3}	3.10×10^{-2}	0.119		
		홍정리	산정	HJ1	30	1.14×10^{-3}	2.63×10^{-3}	0.434	오대
					45	7.35×10^{-3}	3.58×10^{-2}	0.205	
					60	4.97×10^{-3}	5.88×10^{-3}	0.845	
산록	HJ2		30	4.26×10^{-3}	**	**	오대		
			45	4.96×10^{-4}	1.74×10^{-3}	0.285			
			60	1.17×10^{-1}	2.20×10^{-2}	0.0053			
방동	빈계산	BD1	30	9.40×10^{-3}	1.82×10^{-3}	0.0516	송산		
			40	3.11×10^{-3}	6.54×10^{-1}	0.0476			
			50	2.31×10^{-3}	1.47×10^{-3}	0.0157			
	절골	BD2	15	1.01×10^{-3}	1.81×10^{-3}	0.556	오산		
			25	1.46×10^{-3}	2.99×10^{-3}	0.0488			
			40	7.30×10^{-3}	1.80×10^{-3}	0.0041			
	새뚝	BD3	20	2.46×10^{-1}	5.42×10^{-3}	0.0453	송산		
			40	6.78×10^{-1}	2.99×10^{-3}	0.0227			

가. 현장 투수계수의 특성

분석에 적용한 토양통별 현장포화투수계수(K_{fs})는 48.96~0.083cm/h이었으며, Bouwer (1966)의 제안에 의하면 평균투수계수는 24.48~0.042cm/h이고, 동일 토양통에서도 분포지역에 따라 상당한 차이를 보이고 있다. 월정통으로 분류되는 DK1, 2, 3 지역은 근접 분포 토양통인 오대통에 유사한 특성을 보이고 있으며, CD1, 2, 3 지역은 토심이 깊고 입상이 양호한 관제로 매우 큰 현장투수계수를 나타내고 있다.

백옥포 유역의 월정통 평균투수계수는 토심별로 측정된 전체 자료를 적용하여 구하였고, 평균투수계수는 7.28cm/h이다. 오대통의 평균투수계수는 표토(A층)와 심토(B층)은 깊이를 고려하여 45cm까지 측정자료를 적용하여 구하였고, 평균투수계수는 5.96cm/h이다. 방동유역의 송산통과 오산통의 평균투수계수는 토심별로 측정된 전체 자료를 적용하여 구하였고, 평균투수계수는 각각 0.39cm/h, 1.53cm/h 이다.

나. 유역 평균 침투계수 산정

유역 평균 침투계수는 식(7)을 이용하여 구하였으며, 하천구역, 암석노출지 구역은 불투수성 구역으로 처리하였다. 조사한 토양통은 실측한 결과로 구한 평균투수계수를 적용하였으며, 조사하지 못한 토양통은 농촌진흥청(1971)에서 토성별로 구분한 투수계수의 평균값을 적용하였다. 그 결과는 표. 3과 같이 백옥포 유역은 5.67cm/h이고, 방동유역은 1.08cm/h로 백옥포 유역이 상대적으로 유역상황이 양호한 것으로 판단할 수 있다.

표. 3 유역평균침투계수 산정

구분	토양통명	분포면적(%)	평균투수계수 (cm/h)	유역평균침투계수 (cm/h)
백옥포유역	오대	47.11	5.96	
	월정	29.93	7.28	
	기타	21.00	3.24	
	불투수성 구역	1.96	0.00	
	소계	100.00		5.67
방동유역	송산	57.27	0.39	
	오산	12.86	1.53	
	기타	28.19	2.35	
	불투수성구역	1.68	0.00	
	소계	100.00		1.08

V. 결론

침투현상은 물의 순환과정에서 매우 중요한 요소이며, 이 연구에서는 현장투수계(Guelph Permeameter)를 이용하여 평창강 수계 백옥포유역과 금강수계 방동유역에서 대표적인 토양통을 대상으로 토양의 물리적 특성, 현장포화투수계수(K_{fs})와 토양수분흡입력(ϕ_m)을 측정하였고, 유역의 평균침투계수를 산정하였다. 백옥포 유역의 평균침투계수는 5.67cm/h이고, 방동 대표시험유역의 평균침투계수는 1.08cm/h로 백옥포 유역이 상대적으로 유역상황이 양호한 것으로 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 농촌진흥청, 1971, 토양통설명서(제1권), pp. 309.
2. 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., Vol. 2, pp. 729-738.
3. Philip, J. R., 1973. On solving the unsaturated flow equation : 1. The flux-concentration relation. Soil Sci. Vol. 116, pp. 328-335.
4. Reynolds, W. D., and Elrick, D. E., Clothier. B. E., 1985, The constant head well permeameter : Effect of unsaturated flow. Soil Sci. Vol. 139, pp. 172-180.
5. Soilmoisture Equipment Co. 1986. Operating instructions Guelph permeameter. Soilmoisture Equipment Co., Santa Barbara. CA. pp. 28.