

선행강우가 존재하는 다공성 매질의 비포화 흐름 해석 Analysis of Unsaturated Flow Under Antecedent Rainfall

박창근*(Park, Chang Kun), 선우중호*(Sonu, Jung Ho)

1. 非飽和 흐름의 支配方程式과 境界조건

비포화 흐름을 지배하는 식은 Darcy식과 連續方程式을 결합한 종속변수가 모세관 압력수두 (Ψ -based) 또는 함수량(θ -based)인 다음과 같이 두가지 형태의 1차원 Richards(1931)식으로 표시된다.

$$C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\Psi)}{\partial z}, \quad C(\Psi) = \frac{d\theta(\Psi)}{d\Psi} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}, \quad D(\theta) = K(\theta) \frac{d\Psi(\theta)}{d\theta} \quad (1b)$$

여기서 C 는 단위 모세관 압력수두 변화에 의한 함수량의 변화를 나타내는 함수보유능력(water capacity), Ψ 는 모세관 압력수두, θ 는 함수량, K 는 투수계수, D 는 확산계수(diffusivity), t 는 시간, z 는 鉛直下方向이 양수(positive-downward)인 거리를 나타낸다.

종속변수가 Ψ 와 θ 인 식(1a)와 (1b)를 비교하기 위해 식(1a)의 장점과 단점이 각각 식(1b)의 단점과 장점이 되므로, 식(1a)의 경우만 살펴본다. Hills 등(1989), Celia 등(1990)에 의하면 식(1a)의 단점으로는 매우 건조한 흙에 대한 침투문제에서(이 경우 θ 에 대한 Ψ 의 변화가 크다.) 수치해는 초기함수량에 민감하여 불안정한 경우가 생기고, 또한 質量平衡(mass balance)에 있어서 상대적으로 큰 오차를 발생시킨다는 점이다. 한편 포화함수량 가까이에서 함수보유능력 C 는 확산계수 D 에 비해 함수량 θ 에 대해 훨씬 덜 민감하고, 물보유함수에서 공기한계 압력수두(Ψ_{ae})가 잘 발달된 경우 식(1b)는 $\Psi > \Psi_{ae}$ 인 영역에서 함수량을 Ψ 와 관계없이 포화함수량으로 표현하고 있다. 따라서 식(1a)의 장점으로는 飽和-非飽和 흐름이 결합된 문제, 거의 飽和狀態 흐름 문제와 지표면 담수(surface ponding) 문제를 다룰 때 수치해는 상대적으로 안정적이고, 또한 여러 층으로 이루어진 흙 기둥에 대해 층경계에서 모세관 압력수두는 연속(함수량은 불연속)이므로 식(1a)를 직접 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 질량평형에 유의하면서 식(1a)을 사용하고자 한다.

상기 식에 사용될 수 있는 초기조건은

$$\theta(z, 0) = \theta_0(z) \quad (2a)$$

$$\Psi(z, 0) = \Psi_0(z) \quad (2b)$$

이고 θ_0 와 Ψ_0 는 각각 초기함수량, 초기모세관 압력수두이다. 境界조건은 상층境界조건과 하층境界조건이 있는데, 상층境界조건은 다음과 같이 여러 형태로 표시될 수 있다.

* 서울대학교 공과대학 토목공학과

$$\theta(0,t) = \theta_1(t) \quad (3a)$$

$$\Psi(0,t) = \Psi_1(t) \quad (3b)$$

$$-K(\partial\Psi/\partial z - 1)|_{z=0} = R(t) \quad (3c)$$

여기서 θ_1 과 Ψ_1 은 각각 지표면($z=0$)에서의 함수량, 모세관 압력수두이다. 식(3c)는 Darcy식을 이용하면 유도되어지고, $R(t)$ 는 지표면에서의 흐름율(flux)을 나타내는데, $R>0$ 이면 降雨強度를 의미하고 $R<0$ 이면 증발율을 의미한다. 하층경계조건은

$$\theta(L,t) = \theta_b(t) \quad (4a)$$

$$\Psi(L,t) = \Psi_b(t) \quad (4b)$$

$$\partial\Psi/\partial z|_{z=L} = 0 \quad (4c)$$

으로 표시될 수 있고, L 은 흙기둥의 깊이 또는 地下水面까지의 깊이이고 θ_b 와 Ψ_b 는 바닥($z=L$)에서의 함수량과 모세관 압력수두이다. 식(4b)에서 $\Psi_b(t)=0$ 이면 $z=L$ 에 지하수면(water table)이 존재함을 의미하고, 식(4c)는 바닥에서 重力의 영향만이 존재함을 의미한다.

선우중호 등(1991)이 제안한 單位時間當 침투량을 침투율이라는 개념을 사용하면, 침투율(infiltration rate) i 와 누가침투량(cumulative infiltration) F 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$i(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^L [\theta(z,t) - \theta(z,t-\Delta t)] dz \quad (5)$$

$$F(t) = \int_0^t i(t) dt \quad (6)$$

여기서 L 은 흙기둥의 깊이이고, 적분은 수치적으로 수행한다. 식(5)를 사용하여 침투율을 산정할 때 降雨가 어떤 형태로 발생하더라도 그 영향을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 다시 말하면 임의의 형태로 발생한 강우를 지표면 경계조건으로 처리하면 식(1a)의 수치해가 Ψ 로 표시되므로 이를 θ 로 환산한 후, 식(5)와 식(6)을 이용하여 浸透率과 浸透量을 수치적으로 구할 수 있다.

2. 多孔性 煤質의 水理特性 (Hydraulic Properties)

다공성 매질의 수리특성으로는 물보유함수와 투수계수가 있다. 물보유함수란 含水量과 모세관 압력수두와의 관계를 나타내는 函數로 일반적으로 $\theta(\Psi)$ 로 표시되고(다른 형태로는 $S(\Psi)$, $\Psi(S)$, $\Psi(\theta)$ 로 표시될 수 있음. S : 유효포화도), 투수계수는 비포화 투수계수를 의미하며 Ψ 또는 θ 의 함수로서 $K(\Psi)$ 또는 $K(\theta)$ 로 표시된다. Richards식을 사용하여 非飽和 흐름을 해석하려면 물보유함수와 투수계수에 대한 資料가 필요하다. Field 등(1984), Nielsen 등(1986), Russo(1988)는 $K(\Psi)$ 를 측정하는 것은 時間과 費用이 많이 요구되고 측정 절차가 까다로운 반면, $\theta(\Psi)$ 와 포화 투수계수 K_s 는 상대적으로 비교적 쉽게 측정할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 $\theta(\Psi)$ 와 K_s 에 대한 측정자료로부터 투수계수 K 를 예측하는 모형(투수계수 예측모형, pore-structure model)의 開發은 매력적이라 할 수 있다. Child와 Collis-George(1950), Burdine(1953), Marshall(1958), Mualem(1976) 등은 이러한 模型을 개발한 바 있는데, 비교적 이론적 기반을 갖추고 가장 널리 쓰이고 있는 Mualem(1976)모형은 다음과 같다.

$$K_r(\theta) = S^{1/2} \left[\int_0^\theta \frac{d\theta}{\Psi(\theta)} \left[\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\Psi(\theta)} \right]^{-1} \right]^2 \quad (7)$$

여기서 $K_r(\theta) (=K(\theta)/K_s)$ 는 상대 투수계수, S 는 유효포화도, θ_s 는 포화함수량이다.

많은 研究者들이 여러가지의 물보유함수와 투수계수 모형을 제안하였는데, 본 연구에서는 물보유함수와 투수계수를 모두 van Genuchten(1980)이 제안한 다음과 같은 식을 사용하고자 한다.

$$S(\Psi) = \frac{1}{(1 + |a\Psi|^n)^m} \quad (8)$$

$$K_r(S) = S^{1/2} \{1 - (1 - S^{1/m})^m\}^2 ; m=1-1/n \quad (9)$$

여기서 S는 有效飽和度, $K_r=K/K_s$ 는 상대투수계수, K_s 는 포화투수계수, a와 n은 매개변수이다. 일단 물보유함수가 주어지면 식(1a)의 함수보유능력 $C(=d\theta/d\Psi)$ 는 식(8)을 이용하여 다음과 같이 해석적으로 구할 수 있다.

$$C = (\theta_s - \theta_r) \cdot a \cdot (1-n) \cdot |a\Psi|^{n-1} \cdot (1 + |a\Psi|^n)^{1/n-2} \quad (10)$$

$K-\Psi$ 또는 $K-\theta$ 관계보다 $\theta-\Psi$ 관계를 실험으로 구하는 것이 훨씬 용이하므로, 실험으로 구한 표로 표시된 $\theta-\Psi$ 관계 자료를 이용하여 식(8)의 매개변수를 推定하고자 한다. 본 연구에서 사용된 흙들의 표로 표시된 물보유함수 자료에 대하여 SAS(Statistical Analysis System)의 DUD(Doesn't Used Derivatives) 방법을 이용하여 식(8)의 매개변수 a와 n을 추정된 결과가 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Estimated Values of Parameters in van Genuchten(1980)'s Model Using SAS

Soil ¹⁾ Type	MDC		MWC		$\Delta\theta$ ²⁾	θ_s	θ_r	K_s (cm/sec)
	a	n	a	n				
Sand	0.04278	6.26690	0.05961	4.76249	0.01	0.27	0.09	0.0169
Caribou Silt Loam	0.00866	3.28803	0.04228	1.99940	0.005	0.44	0.315	0.00017

1): Soils are after Poulouvasilis(1970), Topp(1971), respectively

2): $\Delta\theta$ ' is the difference between residual moisture content and moisture content of imaginary point.

van Genuchten(1980)의 물보유함수는 잔여함수량에서 $S=0$ 이므로 $\Psi_{min} \rightarrow \infty$ 로 된다. 그러나 일반적으로 실측자료를 살펴보면 Ψ_{min} 은 유한한 값으로 측정되어 있다. 따라서 본 연구에서는 van Genuchten(1980)의 물보유함수가 잔여함수량에서 유한한 Ψ_{min} 값을 갖게하기 위하여 잔여함수량보다 $\Delta\theta'$ 만큼 작은 가상점(imaginary point)을 설정하여 Ψ_{min} 값보다 작은 임의의 Ψ 값을 부여하여 매개변수를 推定하였다. 여기서 실측곡선을 표로 표시하기 위하여 유효함수량 구간을 같은 크기로 세분화하였는데, 그 크기를 $\Delta\theta'$ 으로 하였다.

Caribou Silt Loam(Topp,1971)에서 $\theta-\Psi$ 관계에 대한 실측치와 식(8)의 계산치가 Fig.4.1에 도시되어 있다. van Genuchten(1980)의 물보유곡선이 실측치를 잘 模擬하고 있음을 알 수 있고, 특히 Ψ 가 공기한계 압력수두(Ψ_{ae})보다 큰 구간에서 적절한 기울기를 가지면서 만족스럽게 模擬하고 있다. 또한 van Genuchten(1980) 모델을 이용하여 투수계수($K-\theta$) 이력현상을 도시한 결과가 Fig.4.2에 나타나 있다. 주마름곡선보다 주젖음곡선을 이용한 $K(\theta)$ 곡선이 투수계수 실측치를 잘 模擬하고 있다. 그러나 많은 연구자들(Topp 등(1966,1967), Topp(1969,1971), Talsma(1970), Poulouvasilis(1970), Vachaud와 Thony(1971))이 실험으로 관찰하였듯이, 투수계수 이력현상이 모세관 이력현상에 비해 상대적으로 현저하게 나타나지 않으므로 본 연구에서는 투수계수 이력현

상을 무시하고 모세관 이력현상만을 고려하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 투수계수 모형인 식 (9)의 매개변수 a와 n은 주젓음곡선에서의 a와 n값을 사용하고자 한다.

3. 支配方程式의 差分化

식(1a)에 대한 수치해석을 수행할 때 Hills 등(1989)이 제안한 predictor-corrector 방법을 이용하고자 한다. 식(1a)에서 시간에 대해 전방차분하고 predictor에서 시간간격을 $\Delta t/2$ 대신 Δt 로 하며, 공간에 대해 중앙차분하면 다음과 같이 predictor를 나타내는 차분식을 구할 수 있다. 여기서 비선형을 유발시키는 함수보유능력 C와 투수계수 K는 일단 n시간에서 기지화시킨다.

$$C_i^n \frac{1}{\Delta t} (\Psi_i^* - \Psi_i^n) = \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i+1/2}^n (\Psi_{i+1}^* - \Psi_i^* + \Psi_{i+1}^n - \Psi_i^n) - \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i-1/2}^n (\Psi_i^* - \Psi_{i-1}^* + \Psi_i^n - \Psi_{i-1}^n) - \frac{1}{\Delta z} (K_{i+1/2}^n - K_{i-1/2}^n) \quad (11a)$$

$$K_{i\pm 1/2}^n = \frac{1}{2} (K_{i\pm 1}^n + K_i^n) \quad (11b)$$

Corrector에서 C와 K는 n시간에서 주어진 Ψ^n 과 predictor에서 계산한 Ψ^* 를 이용하여 구한 C와 K를 각각 평균한 값(각각 C^{*n} , K^{*n} 으로 표시)으로 기지화시켜 corrector에서의 Ψ^{n+1} 의 값을 계산하고자 하며, 해당하는 관계식은 다음과 같다.

$$C_i^{*n} = \frac{1}{2} (C_i^n + C_i^*), \quad K_{i\pm 1/2}^{*n} = \frac{1}{4} (K_{i\pm 1}^n + K_i^n + K_{i\pm 1}^* + K_i^*) \quad (12a, b)$$

따라서 식(11a)와 비슷하게 corrector에 대한 차분식을 다음과 같이 구할 수 있다. Corrector에서도 시간간격을 Δt 로 하며, 구하고자 하는 Ψ^{n+1} 은 predictor에서 계산한 Ψ^* 를 이용하여 계산한다.

$$C_i^{*n} \frac{1}{\Delta t} (\Psi_i^{n+1} - \Psi_i^*) = \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i+1/2}^{*n} (\Psi_{i+1}^{n+1} - \Psi_i^{n+1} + \Psi_{i+1}^* - \Psi_i^*) - \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i-1/2}^{*n} (\Psi_i^{n+1} - \Psi_{i-1}^{n+1} + \Psi_i^* - \Psi_{i-1}^*) - \frac{1}{\Delta z} (K_{i+1/2}^{*n} - K_{i-1/2}^{*n}) \quad (13)$$

4. 先行降雨가 존재하는 多孔性 媒質에의 適用

본 연구에서는 後行降雨에 대한 含水量分布와 浸透率 등이 先行降雨의 영향을 어떻게 받고 있는지를 살펴보고자 한다. 사용된 흙은 Sand(Poulovassilis, 1970)이고, 사용된 降雨條件은 Fig.3에 도시되어 있는 바와 같다. 즉 $0 \leq t \leq 300 \text{sec}$ 동안에 降雨強度 $R (=2K_s, K_s=0.0169 \text{cm/sec})$ 을 가지는 先行降雨가 발생하고 $300 \leq t \leq 700 \text{sec}$ 동안에는 降雨가 중단되었다가 $700 \leq t \leq 1000 \text{sec}$ 동안에 강우강도 R을 가지는 後行降雨가 발생한다. 사용된 地表面 境界條件은 지표면이 飽和되기 전에는 흐름율(flux)境界條件을 사용하고 포화된 후에는 지표면 담수깊이(ponding depth)는 무시하고 모세관 압력수두가 0이라는 조건을 사용하였다. 강우가 중단되면 지표면에서 $R=0$ 인 흐름율경계조건을 사용하였다. 지표면 포화기준은 지표면에서 함수량이 포화된 상태가 아니고 모세관 압력이 0인 상태로 하였다. 그 이유는 $\theta-\Psi$ 관계에서 모세관 수대(capillary fringe)가 존재하기 때문이다. 또한 초기조건은 반무한 흙기둥내에 잔여함수량($\theta_r=0.09$)이 존재하는 것이다. 이상의 조건 하에서 履歷現象을 고려하지 않은 수치해와 고려한 수치해를 비교하고자 한다. 이력현상을 고려

하지 않은 경우에는 주젖음곡선 또는 주마름곡선을 사용하였고, 이력현상을 고려한 경우에는 박창근(1993)이 개발한 履歷現象 模型을 사용하였다. 따라서 상기 세 경우에 대하여 비포화 흐름에서 발생하는 제반사항을 비교 검토하고자 한다.

습수량 分布曲線이 $t=300, 700, 1000\text{sec}$ 일 때 상기 세 경우에 대한 습수량 分布曲線이 Fig.4에 비교 도시되어 있고, 이에 해당하는 모세관압력 분포곡선이 Fig.5에 도시되어 있다. Fig.4에서 알 수 있듯이 先行降雨가 끝나는 시간($t=300\text{sec}$)에서는 주젖음곡선을 이용하거나 履歷現象을 고려한 경우는 같은 함수량 분포를 보이지만, 주마름곡선을 이용한 경우는 습윤전선이 가장 빨리 진행하고 있다. 강우가 중단된 구간($300\text{sec} \leq t < 700\text{sec}$)에서는 습수량 再分布現象이 일어나는데 後行降雨가 시작하는 시간($t=700\text{sec}$)에서 살펴보면, 履歷現象을 고려한 경우 함수량 재분포현상이 아주 느리게 발생하며 습윤전선의 전진속도가 가장 느림을 알 수 있고, 주마름곡선을 이용한 境遇 함수량 재분포현상이 가장 활발하게 일어나며 습윤전선의 전진속도가 가장 빠름을 알 수 있다. 이러한 결과는 Watson과 Sardana(1987)의 계산 결과와 일치한다. 모세관 압력전선은 Fig.5에서 알 수 있듯이 Fig.4의 습윤전선의 경향과 비슷하게 나타난다.

Fig.6은 상기 세 경우에 대하여 식(5)를 이용하여 구한 浸透率을 비교 도시하고 있다. 주젖음곡선 또는 주마름곡선을 이용하거나 이력현상을 고려한 경우 지표면 포화시간이 선행강우에 대해 각각 56, 94, 56sec이고, 後行降雨에 대해 각각 42, 64, 56sec이다. 주마름곡선을 이용한 경우 지표면 飽和時間이 가장 길게 나타나고, 履歷現象을 고려한 경우 後行降雨에 대한 지표면 포화시간이 주마름곡선과 주젖음곡선을 이용한 경우의 포화시간 사이에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 지표면 포화후 浸透率은 급격한 하강을 이루는데, 선행강우보다 후행강우에서 浸透率이 더 급격하게 하강하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 先行降雨에 의해 흙기둥내에 浸透된 물이 이미 존재하고 있으므로, 따라서 후행강우에 의한 지표면 포화시간이 선행강우의 경우보다 더 빨라져 浸透率은 더 급격히 감소하기 때문이다. 왜냐하면 降雨强度가 포화투수계수보다 클 경우 최소 침투율은 포화투수계수에 해당하기 때문이다. Fig.7은 상기 세 경우에 대하여 식(6)을 이용하여 누가침투량(F)을 비교 도시하고 있고, 주요 시간에 대하여 각각의 경우의 누가침투량이 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Cumulative Infiltration

Case ¹⁾	t=300 sec		t=700 sec		t=1000 sec	
	F(cm)	rate ²⁾	F(cm)	rate	F(cm)	rate
MWC	3.8738	100%	3.8738	100%	7.3443	97%
MDC	4.2959	111%	4.2959	111%	8.0959	107%
Hysteresis	3.8738	-	3.8738	-	7.5333	-

1) : MWC, MDC & Hysteresis : numerical analysis considering Main Drying, Main Wetting Curve & Hysteresis loop, respectively

2) : $\text{rate}(\%) = \frac{\text{Cumulative Infiltration}}{\text{Cumulative Infiltration Considering Hysteresis}} \times 100$

Table 2에서 알 수 있듯이 先行降雨가 끝나는 시간($t=300\text{sec}$)에서는 주마름곡선을 이용할 경우 이력현상을 고려한 경우보다 누가침투량(F)을 약 11%정도 과대계산하고 있고, 後行降雨가 끝나는 시간($t=1000\text{sec}$)에서는 약 7%정도 과대계산하고 있다. 또한 주젖음곡선을 이용할 경우 $t=300\text{sec}$

에서는 履歷現象을 고려할 경우 모두 같은 누가침투량을 계산하고 있지만, $t=1000\text{sec}$ 에서는 약 3%정도 과소계산하고 있다. 따라서 편의상 履歷現象을 고려하지 않을 경우, 주마름곡선보다 주젓음곡선을 이용하여 浸透率 또는 누가침투량을 산정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이러한 결과는 Whisler와 Watson(1969)의 결과와 일치한다.

5. 결 론

흙의 水理特性인 물보유함수(water retention function)와 투수계수를 나타내는 模型인 van Genuchten(1980) 모형은 실측자료를 잘 모의하므로 Richards식을 수치해석할 때 용이하게 사용되어질 수 있음을 알 수 있었다. 또한 선행강우가 존재하는 조건하에서 이력현상을 고려한 수치해와 고려하지 않은 수치해와의 비교를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 주마름곡선을 이용한 경우 함수량 재분포현상이 가장 활발히 발생하고, 이력현상을 고려한 경우 함수량 재분포현상이 가장 느리게 발생함을 알 수 있다. 비포화 흐름을 해석할 때 이력현상을 고려할 수 없을 경우, 비포화 흐름을 해석할 때 주마름곡선보다 주젓음곡선을 사용하는 것이 바람직하다. 침투율은 지표면 포화후 급격한 下降을 이루는데, 선행강우보다 後行降雨에서 침투율이 더 급격하게 下降하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 선행강우에 의해 多孔性 媒質內에 침투된 물이 이미 존재하고 있으므로, 후행강우에 의한 지표면 포화시간이 선행강우의 경우보다 더 빨라지기 때문이라 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 박창근, "비포화 비균질 다공성 매질에서 이력현상 모형의 개발과 적용", 서울대학교 박사 학위논문, 1993.2
- (2) 선우중호, 박창근, 윤수호, "선행강우가 침투에 미치는 영향 - Richards공식을 이용하여 계산한 직접유출과 SCS방법과의 비교", 서울대학교 공과대학 공대연구보고, 제23권, 제2호, 1991
- (3) Burdine, N.T., "Relative Permeability Calculations from Pore-Size Distribution Data", Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng. 198, pp.450-453, 1953 (cited in van Genuchten, 1980)
- (4) Celia, M.A., Bouloutas, C.E. and Zarba, R.L., "A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation", W.R.R., 26(7), pp.1483-1496, 1990
- (5) Childs, E.C. and Collis-George, N., "The Permeability of Porous Materials", Proc. of Royal Society of London, Series A, 201, pp.392-405, 1950
- (6) Field, J.A., Parker, J.C. and Powell, N.L., "Comparison of Field- and Laboratory-Measured and Predicted Hydraulic Properties of a Soil with Macropores", Soil Science, 138(6), pp.385-396, 1984
- (7) Hills, R.G., Porro, I., Hudson, D.B. and Wierenga, P.J., "Modeling One-Dimensional Infiltration into Very Dry Soils 1. Model Development and Evaluation", W.R.R., 26(5), pp.1259-1269, 1989
- (8) Marshall, T.J., "A Relation between Permeability and Size Distribution of Pores", Jr. of Soil Sci., 9(1), 1958
- (9) Mualem, Y., "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", W.R.R., 12(3), pp.513-522, 1976
- (10) Nielsen, D.R., van Genuchten, M.T. and Biggar, J.W., "Water Flow and Solute Transport Process in the Unsaturated Zone", W.R.R., 22(9), pp.89S-108S, 1986

- (11) Poullovassilis, A., "The Effect of the Entrapped Air on the Hysteresis Curves of a Porous Body and on its Hydraulic Conductivity", *Soil Science*, 109(3), pp.154-162, 1970
- (12) Richards, L.A., "Capillary Conduction through Porous Medium", *Physics*, 1, pp.318-333, 1931
- (13) Russo, D., "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, 1988
- (14) Talsma, T., "Hysteresis in Two Sands and the Independent Domain Model", *W.R.R.*, 6(3), pp.964-970, 1970
- (15) Topp, G.C., "Soil-Water Hysteresis Measured in a Sandy Loam and Compared with the Hysteretic Domain Model", *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, 33, pp.645-651, 1969
- (16) Topp, G.C., "Soil Water Hysteresis in Silt Loam and Clay Loam Soils", *W.R.R.*, 7(4), pp.914-920, 1971
- (17) Vachaud, G. and Thony, J.-L., "Hysteresis during Infiltration and Redistribution in a Soil Column at Different Initial Water Contents", *W.R.R.*, 7(1), pp.111-127, 1971
- (18) van Genuchten, M.T., "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Jr. of Soil Sci. Soc. Am.*, 44, pp.892-898, 1980
- (19) Watson, K.K. and Sardana, V., "Numerical Study of the Effect of Hysteresis on Post-Infiltration Redistribution", in *Infiltration Development and Application*, edited by Y.-S. Fok, pp.241-250, 1987
- (20) Whisler, F.D. and Watson, K.K., "Analysis of Infiltration into Draining Porous Media", *Jr. of Irrig. Drain. Div., Proc. of ASCE*, 95(IR4), pp.481-491, 1969

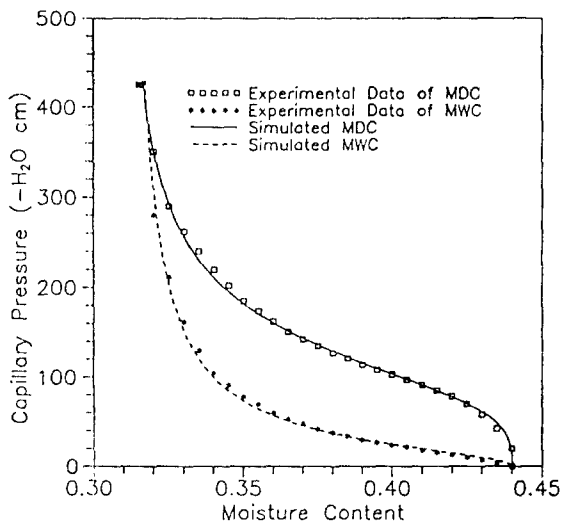


Fig.1 Comparison of van Genuchten(1980)'s Model with θ - Ψ Experimental Data
[Caribou Silt Loam : After Topp(1971)]

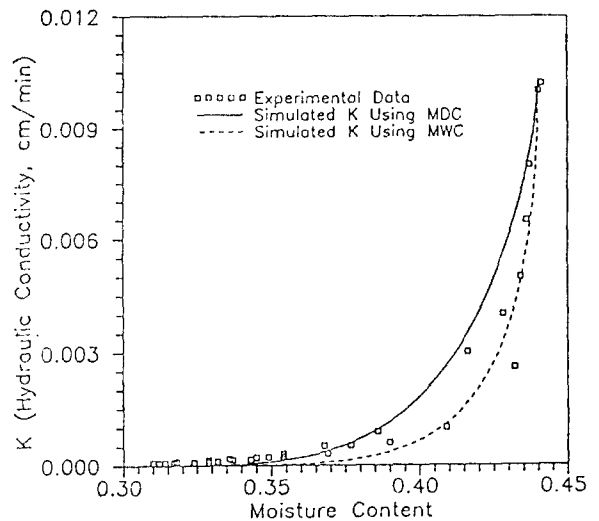


Fig.2 Comparison of van Genuchten(1980)'s Model with K - θ Experimental Data
[Caribou Silt Loam : After Topp(1971)]

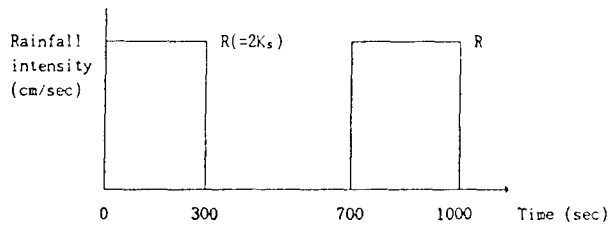


Fig.3 Rainfall Condition

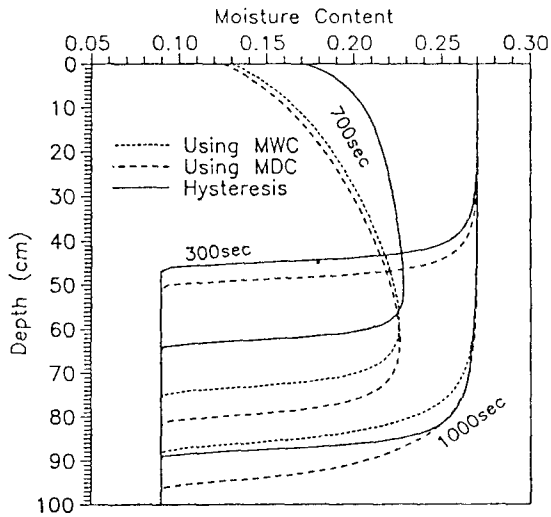


Fig.4 Comparison of Moisture Content Profiles affected by Antecedent Rainfall with and without Hysteresis

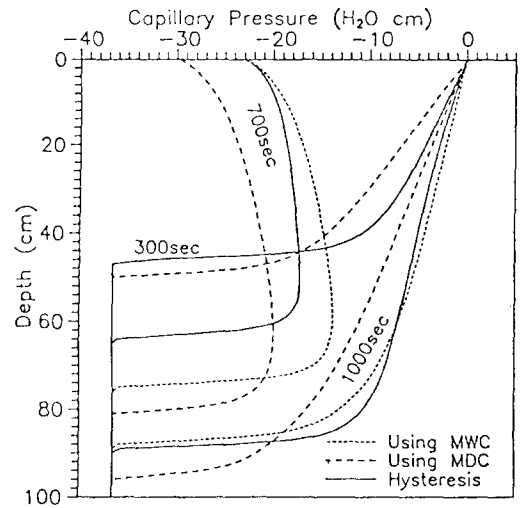


Fig.5 Comparison of Capillary Pressure Profiles affected by Antecedent Rainfall with and without Hysteresis

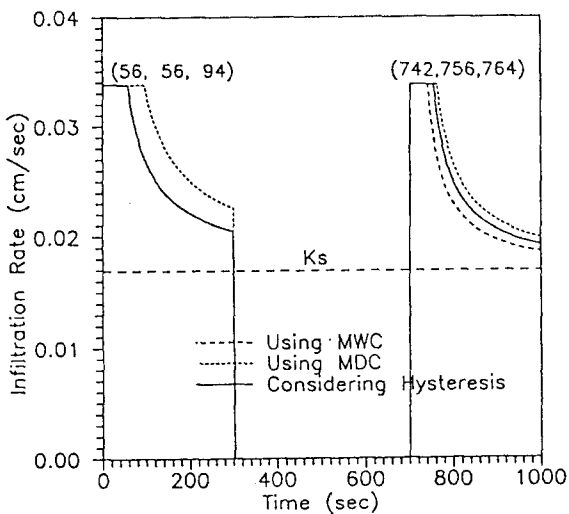


Fig.6 Comparison of Infiltration Rates

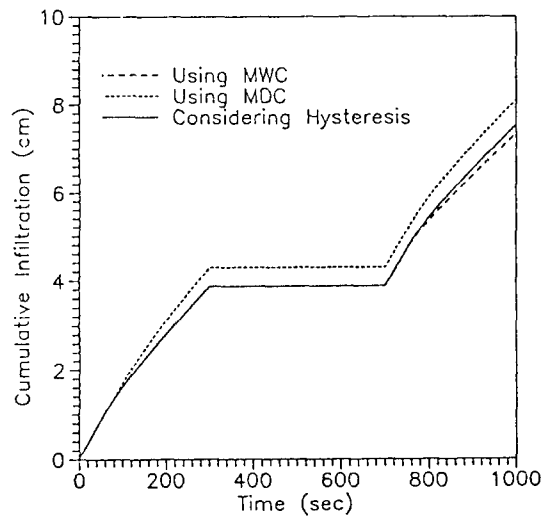


Fig.7 Comparison of Cumulative Infiltrations