

선행강우가 존재하는 다공성 매질에서 이력현상을 고려한 비포화 흐름 해석

Analysis of Unsaturated Flow Considering Hysteresis in Porous Media under Antecedent Rainfall

박창근* · 선우중호**

Park, Chang Kun · Sonu, Jung Ho

Abstract

Through the numerical analysis of the capillary pressure-based Richards equation with and without the effect of the capillary hysteresis under the boundary condition having an antecedent rainfall, the moving tendency of the wetting front, the redistribution of the moisture content, infiltration rate, cumulative infiltration etc. were computed. The effect of the capillary hysteresis cannot be neglected in analyzing an unsaturated flow, and the more accurate results may be obtained by the consideration of the hysteresis effect. If the effect of the hysteresis cannot be considered, the analysis by the use of the main wetting curve may give more reliable result than that of the main drying curve.

요 지

비포화 흐름에서 모세관 이력현상의 영향을 살펴보기 위하여 선행강우가 존재하는 지표면 경계조건하에서 이력현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 종속변수가 모세관 압력수두인 Richards식을 수치해석하여 습윤전선의 전진 경향, 함수량 재분포현상, 침투율, 누기침투량 등을 비교 검토하였다. 비포화 흐름을 해석할 때 모세관 이력현상의 영향은 무시되어질 수 없고, 보다 정확한 비포화 흐름의 해석은 이력현상을 고려함으로써 얻어질 수 있다 만약 비포화 흐름을 해석할 때 이력현상을 고려할 수 없다면, 주마름곡선보다 주젖음곡선을 사용하는 것이 바람직하다.

1. 서 론

비포화 흐름에서 임의의 함수량 θ 에 대하여 마름과정(drying process)과 젖음과정(wetting process)에서 모세관압력 Ψ (또는 투수계수 K)의 값이

다르게 나타나는 현상이 발생하는데, 이것을 모세관(또는 투수계수) 이력현상이라 한다.⁽¹⁾ 자연상태에서 비포화 흐름은 다공성 매질에서 발생하는 이력현상에 종속되어 있지만, 일반적으로 이력현상의 영향을 무시하고 비포화 흐름을 해석하고 있다. Kool과 Parker⁽⁶⁾가 지적하였듯이, 비포화 흐름을 해석할 때 이력현상을 무시하는 것은 그 영향이

* 서울대학교 토목공학과 조교

** 서울대학교 토목공학과 교수

무시되어진다는 사실에 근거를 둔 것이 아니고, 이력현상을 포함한 문제를 간단히 하거나 또는 이를 고려하기 위한 실측자료가 충분히 많지 않다는 편이성에 근거를 두고 있다. 따라서 비포화 흐름을 정식화하여 보다 정확히 해석하려면 다공성 매질에서 발생하는 이력현상을 고려하여야 함은 자명하다. 많은 연구자들^(7,9,10,14)이 실험으로 관찰하였듯이 투수계수 이력현상이 모세관 이력현상에 비해 상대적으로 현저하게 나타나지 않으므로, 본 연구에서는 투수계수 이력현상을 무시하고 모세관 이력현상만을 고려하고자 한다.

본 연구에서는 이력현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 각각 비포화 흐름의 지배방정식을 수치해석하여 습윤전선의 전진 경향, 함수량 재분포현상, 침투율, 누기침투량 등을 비교 검토하고자 한다. 사용된 모세관 이력현상 모형으로는 박창근과 선우중호⁽²⁾가 개발한 모형을 사용하고, 이력현상의 영향을 살펴보기 위하여 사용된 지표면의 경계조건으로는 선행강우와 후행강우가 존재하는 경우를 선택하고자 한다. 이러한 수치해석을 통하여 비포화 흐름을 해석할 때, 모세관 이력현상의 영향이 무시되어지지 않음을 보이고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 비포화 흐름의 支配方程式과 경계조건

비포화 흐름을 지배하는 식은 Darcy식과 連續方程式을 결합한 종속변수가 모세관 압력수두 또는 함수량인 다음과 같은 두가지 형태의 1차원 Richards⁽⁸⁾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 C는 단위 모세관 압력수두 변화에 의한 함수량의 변화를 나타내는 함수보유능력(water content capacity), Ψ 는 모세관 압력수두, θ 는 함수량, K는 투수계수, D는 확산계수(diffusivity), t는 시간, z는 鉛直下方向을 양으로 하는(positive-downward) 거리를 나타낸다.

종속변수가 Ψ 와 θ 인 식 (1a)와 (1b)를 비교함에 있어 식 (1a)의 장점과 단점이 각각 식 (1b)의 단점과 장점이 되므로, 식 (1a)의 경우만 살펴본다. Hills 등,⁽⁵⁾ Celia 등⁽⁴⁾이 지적한 식 (1a)의 단점으로는 매우 건조한 흙에 대한 침투문제에서(이 경우 θ 에 대한 Ψ 의 변화가 크다) 초기함수량에 민감하여 불안정한 수치해가 발생하는 것과, 質量平衡(mass balance)에 있어서 상대적으로 큰 오차를 발생시킨다는 점을 들 수 있다. 한편 포화함수량 가까이에서 함수보유능력 C는 확산계수 D에 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 수치해가 상대적으로 안정적이고, 또한 여러 層으로 이루어진 흙 기층에 대해 총경계에서 모세관 압력수두는 연속(함수량은 불연속)이므로 식 (1a)를 직접 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1a)를 이용하여 비포화 흐름을 해석하고자 한다.

상기 지배방정식에 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. 경계조건은 상층경계조건과 하층경계조건이 있는데, 상층경계조건은 다음과 같이 여러 형태로 표시될 수 있다.

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

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

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

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 나타낸다. $R > 0$ 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, L은 흠기등의 깊이 또는 地下水面까지의 깊이이고 θ_0 와 Ψ_0 는 각각 바닥($z=L$)에서의 함수량과 모세관 압력수두이다. 식 (4b)에서 $\Psi_0(t)=0$ 이면 $z=L$ 에 지하수면(water table)이 존재함을 의미하고, 식 (4c)는 바닥에서 重力의 영향만이 존재함을 의미한다.

선우중호 등⁽³⁾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.

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

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

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.

3. 支配方程式의 差分化

식 (1a)에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 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 C 와 투수계수 K 는 일단 n 시간에서 기지화시킨다.

$$C_i^n \frac{1}{\Delta t} (\Psi_i^n - \Psi_i^n) = \frac{1}{2(\Delta t)^2} K_{i+1/2}^n (\Psi_{i+1}^n - \Psi_i^n + \Psi_{i-1}^n - \Psi_i^n) - \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i-1/2}^n (\Psi_i^n - \Psi_{i-1}^n + \Psi_i^n - \Psi_{i-1}^n) - \frac{1}{2} (K_{i+1/2}^n - K_{i-1/2}^n) \quad (7a)$$

$$K_{i+1/2}^n = \frac{1}{2} (K_{i+1}^n + K_i^n) \quad (7b)$$

Corrector에서 C 와 K 는 n 시간에서 주어진 Ψ^n 과

predictor에서 계산한 Ψ^* 를 이용하여 구한 C 와 K 를 각각 평균한 값(각각 C^{*n} , K^{*n} 으로 표시)으로 기지화시켜 corrector에서 $(n+1)$ 시간에서의 Ψ^{n+1} 값을 계산하고자 하며, 해당하는 관계식은 다음과 같다.

$$C_i^{*n} = \frac{1}{2} (C_i^n + C_i^*), \quad (8a)$$

$$K_{i+1/2}^{*n} = \frac{1}{4} (K_{i+1}^n + K_i^n + K_{i+1}^* + K_i^*) \quad (8b)$$

따라서 식 (7a)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.

$$C_i^{*n} \frac{1}{\Delta t} (\Psi_i^{n+1} - \Psi_i^*) = \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i+1/2}^{*n} (\Psi_{i+1}^{n+1} - \Psi_i^{n+1} + \Psi_{i+1}^* - \Psi_i^*) - \frac{1}{2(\Delta z)^2} K_{i+1/2}^{*n} (\Psi_i^{n+1} - \Psi_{i-1}^{n+1} + \Psi_i^* - \Psi_{i-1}^*) - \frac{1}{2\Delta z} (K_{i+1/2}^{*n} - K_{i-1/2}^{*n}) \quad (9)$$

상기 차분식을 이용하여 수치해석할 때 수치해의 안정성을 검토한 바 있는 Hills 등(1989)에 의하면, 주어진 공간 격자간격 Δz 에 대하여 시간 격자간격 Δt 는 매우 건조한 흠에서의 침투문제에서는 초기 Ψ 의 값에 의한 지배를 받는다. 또한 Δz 와 Δt 에 대한 여러가지 조합을 구성하여 질량평형과 계산시간을 비교한 결과, Δt 에 대한 일반적인 안정조건 관계식은 얻을 수 없지만 주어진 Δz 에 대해 Δt 가 작을수록 질량평형의 오차는 줄고 계산시간은 길어진다. 따라서 수치해석을 수행할 때 수치해가 안정성을 확보할 수 있는 한계내에서 가능한 Δt 를 작게 주고 수치해석을 수행하고자 한다. 본 연구에서는 $\Delta z = 1$ cm, $\Delta t = 1$ sec를 사용하였다.

4. 多孔性 媒質의 水理特性

다공성 매질의 수리특성으로는 물보유함수와 투수계수가 있다. 물보유함수란 含水量과 모세관 압력수두와의 관계를 나타내는 함수로 일반적으로 θ (Ψ)로 표시되고, 다른 형태로는 $S(\Psi)$, $\Psi(S)$, $\Psi(\theta)$ 로도 표시될 수 있다. 여기서 S 는 유효포화도이다.

Table 1. Hydraulic Properties of Sand

MDC*		MWC*		θ_s	θ_r	K_s (cm/s)
a	n	a	n			
0.04278	6.26690	0.05961	4.76249	0.27	0.09	0.0169

*: Main Drying Curve (MDC) & Main Wetting Curve (MWC).

Parameter a & n were estimated by using SAS (Statistical Analysis System) Package.

투수계수는 비포화 투수계수를 의미하며 Ψ 또는 θ 의 함수로서 $K(\Psi)$ 또는 $K(\theta)$ 로 표시된다. 식 (1)과 같은 Richards식을 사용하여 非飽和 흐름을 해석하려면 물보유함수와 투수계수에 대한 자료가 필요하다.

많은 연구자들이 여러가지의 물보유함수와 투수계수 모형을 제안하였는데, 본 연구에서는 물보유함수와 투수계수로 van Genuchten⁽¹⁵⁾이 제안한 다음과 같은 식을 사용하고자 한다.

$$S(\Psi) = \frac{1}{(1 + |a\Psi|^n)^m} \quad (10)$$

$$K_r(S) = S^{1/2} \{1 - (1 - S^{1/m})^m\}^2; m = 1 - 1/n \quad (11)$$

여기서 $K_r = K/K_s$ 는 상대투수계수, K_s 는 포화투수계수, a와 n은 매개변수이다. 일단 물보유함수가 주어지면 식 (1a)의 함수보유능력 $C(=d\theta/d\Psi)$ 는 식 (10)을 이용하여 다음과 같이 해석적으로 구할 수 있다.

$$C = (\theta_s - \theta_r) \cdot a \cdot (1 - n) \cdot |a\Psi|^{n-1} \cdot (1 + |a\Psi|^n)^{1/n-2} \quad (12)$$

여기서 θ_s 는 포화함수량, θ_r 은 잔여함수량이다.

본 연구에 사용된 다공성 매질에 대한 수리특성으로는 Poulouvassilis⁽⁷⁾가 모래에 대하여 실측한 물보유함수 자료를 사용하였다. 모래에 대한 식 (10)의 매개변수의 값과 기타 수리특성은 Table 1에 나타나 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 비포화 흐름을 수치 해석할 때, 본 연구에서는 모세관 이력현상만을 고려하므로 마름과정과 젖음과정에서 식 (10)의 매개변수 n과 a의 값은 다르게 된다. 한편 투수계수 이력현상은 무시하므로 투수계수 모형인 식 (11)의 매개변수 a와 n은 주젖음곡선(MWC)에서의 a와 n 값을 사용하고자 한다.

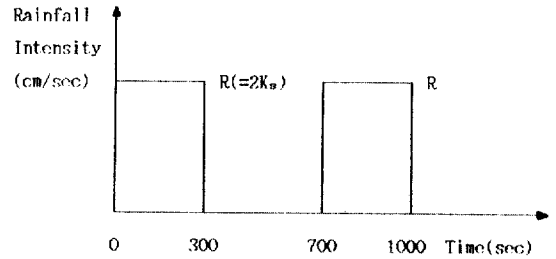


Fig. 1. Rainfall Condition

5. 先行降雨가 존재하는 多孔性 媒質에의 적용

본 연구에서는 선행강우에 이어 발생하는 후행강우에 대한 含水量分布와 浸透率 등이 先行降雨의 영향을 어떻게 받고 있는지를 살펴보고자 한다. 사용된 흙은 모래⁽⁷⁾이고, 사용된 降雨條件은 Fig. 1에 도시되어 있는 바와 같다.

즉 $0 \leq t \leq 300$ sec 동안에 降雨強度 $R(=2K_s, K_s = 0.0169$ cm/sec)을 가지는 先行降雨가 발생하고 $300 \leq t \leq 700$ sec 동안에는 강우가 중단되었다가 $700 \leq t \leq 1000$ sec 동안에 강우강도 R을 가지는 後行降雨가 발생한다. 사용된 지표면 경계조건은 지표면이 飽和되기 전에는 흐름율(flux) 경계조건을 사용하고 포화된 후에는 지표면 담수깊이(ponding depth)는 무시하고 모세관 압력수두가 0(zero)이라는 조건을 사용하였다. 그리고 강우가 중단되면 지표면에서 $R = 0$ 인 흐름율 경계조건을 사용하였다. 여기서 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 만부한 흙기둥내에 잔여함수량($\theta_r = 0.09$)이 존재하는 것이다. 이상의 조건하에서 履歷現象을 고려하지 않은 수치해와 고려

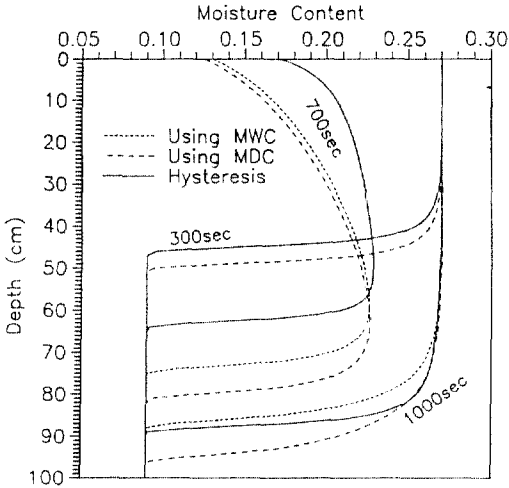


Fig. 2. Comparison of Moisture Content Profiles affected by Antecedent Rainfall with and without Hysteresis

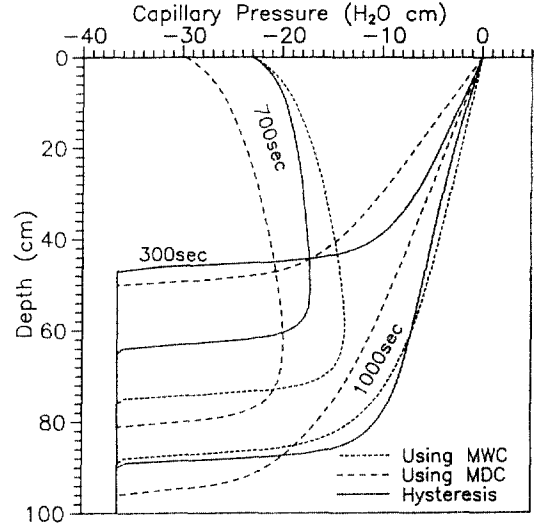


Fig. 3. Comparison of Capillary Pressure Profiles affected by Antecedent Rainfall with and without Hysteresis

한 수치해를 비교 검토하고자 한다. 이력현상을 고려하지 않은 경우에는 주젖음곡선 또는 주마름곡선을 사용하였고, 이력현상을 고려한 경우에는 박창근과 선우중호⁽²⁾가 개발한 履歷現象 模型을 사용하였다.

含水量 分布曲線이 $t=300, 700, 1000$ sec일 때 상기 세 경우에 대한含水量 分布曲線이 Fig. 2에 비교 도시되어 있고, 이에 해당하는 모세관압력 분포곡선이 Fig. 3에 도시되어 있다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 先行降雨가 끝나는 시간 ($t=300$ sec)에서는 주젖음곡선을 이용하거나 履歷現象을 고려한 경우는 같은 함수량 분포를 보이지만, 주마름곡선을 이용한 경우는 습윤전선(wetting front)이 가장 빨리 진행하고 있다. 강우가 중단된 구간($300 \leq t \leq 700$ sec)에서는含水量 再分布現象이 일어나는데 後行降雨가 시작하는 시간($t=700$ sec)에서 살펴보면, 履歷現象을 고려한 경우 함수량 재분포현상이 아주 느리게 발생하며 습윤전선의 전진속도가 가장 느림을 알 수 있고, 주마름곡선을 이용한 경우 함수량 재분포현상이 가장 활발하게 일어나며 습윤전선의 전진속도가 가장 빠름을 알 수 있다. 이러한 경향은 Watson과 Sardana⁽¹⁶⁾의 계산결과와 일치한다. 모세관 압력전선은 Fig. 3에서 알 수 있듯이 Fig. 2의 습윤전선의 경향과 비슷하게 나

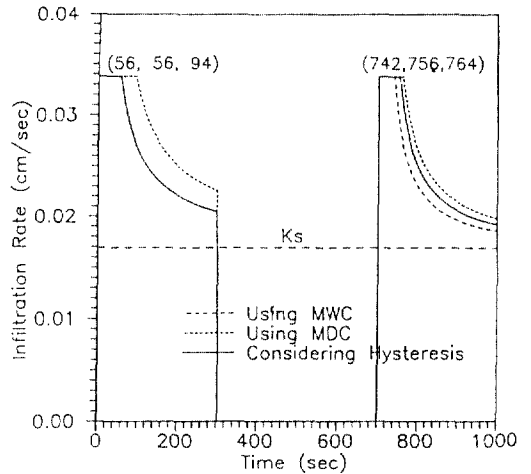


Fig. 4. Comparison of Infiltration Rates

타난다.

Fig. 4는 상기 세 경우에 대하여 식 (5)를 이용하여 구한 浸透率을 비교 도시하고 있다.

주젖음곡선(MWC) 또는 주마름곡선(MDC)을 이용하거나 이력현상을 고려한 경우 지표면 포화시간이 선행강우에 대해 각각 56, 94, 56 sec이고, 後行降雨에 대해 각각 742, 764, 756 sec이다. 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 침투된 물이 이미 존재하고 있으므로, 따라서 후행강우에 의한 지표면 포화시간이 선행강우의 경우보다 더 빨라져 浸透率은 더 급격히 감소한다는 사실에 기인한다. 왜냐하면 降雨強度가 포화투수계수보다 클 경우 최소침투율은 포화투수계수에 해당하기 때문이다. Fig. 5는 상기 세 경우에 대하여 식 (6)을 이용하여 누가침투량(F)을 비교 도시하고 있고, 주요 시간에 대한 각각의 경우의 누가침투량이 Table 2에, 나타나 있다.

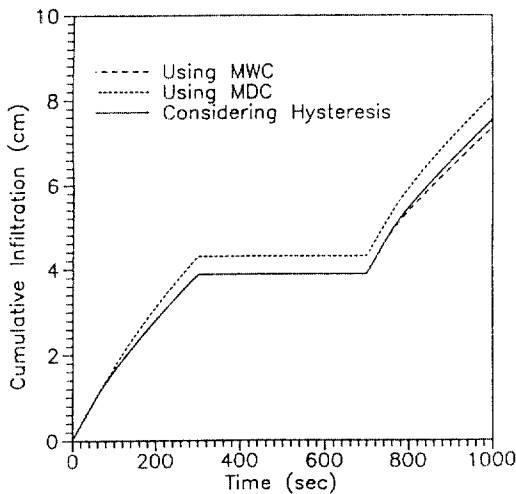


Fig. 5. Comparison of Cumulative Infiltrations

Table 2에서 알 수 있듯이 先行降雨가 끝나는 시간(t=300 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 sec)에서는 약 7% 정도 과대계산하고 있다. 한편 주젖음곡선을 이용할 경우 t=300 sec에서는 履歷現象을 고려할 경우 모두 같은 누가침투량을 계산하고 있지만, t=1000 sec에서는 약 3% 정도 과소계산하고 있다.

이상과 같이 비포화 흐름에서 이력현상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 수치해석을 통하여 함수량 분포곡선, 모세관압력 분포곡선, 습윤전선의 전진 경향, 함수량 재분포현상, 침투율, 누가침투량 등의 비교를 수행하였다. 그 결과 비포화 흐름을 해석할 때, 모세관 이력현상이 결코 무시되어지지 않음을 알 수 있었다. 만약 履歷現象을 고려하지 못할 경우, 이력현상을 고려할 경우와 주젖음곡선을 이용할 경우와의 누가침투량의 차이가 상대적으로 크므로 주마름곡선보다 주젖음곡선을 이용하여 浸透率 또는 누가침투량을 산정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

6. 결 론

선행강우가 존재하는 지표면 조건하에서 이력현상을 고려한 수치해와 고려하지 않은 수치해와의 비교를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 주마름곡선을 이용한 경우 함수량 재분포현상이 가장 활발히 발생하며 습윤전선의 전진속도가 가장 빠르고, 이력현상을 고려한 경우 함수량 재분포현상이 가장 느리게 발생함을 알 수 있었다. 또한 주

Table 2. Cumulative Infiltrations

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: the results of the numerical analysis considering Main Drying, Main Wetting Curve & Hysteresis Loop, respectively

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

마름곡선을 이용한 경우 지표면 포화시간이 가장 길게 나타나고, 이력현상을 고려한 경우 후행강우에 대한 지표면 포화시간이 주마름곡선과 주젖음곡선을 이용한 경우의 포화시간 사이에서 발생하고 있음을 알 수 있었다. 또한 주마름곡선을 이용할 경우 이력현상을 고려한 경우보다 누가침투량이 과대계산되어지고, 주젖음곡선을 이용할 경우 과소계산되어짐을 알 수 있었다. 결론적으로 비포화 흐름을 해석할 때 모세관 이력현상의 영향은 무시되어질 수 없고, 보다 정확한 비포화 흐름의 해석은 이력현상을 고려함으로써 얻어질 수 있다. 만약 비포화 흐름을 해석할 때 이력현상을 고려할 수 없다면, 주마름곡선보다 주젖음곡선을 사용하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 박창근, 선우중호, "비포화 흐름에서 모세관 이력현상 모형의 고찰: State of The Art", **한국수문학회지**, 제 25권, 제 3호, 1992, pp. 65-77.
2. 박창근, 선우중호, "비포화 흐름에서 이력현상 모형의 고찰: 모형의 개발", **대한토목학회지**, 제 13권, 제 4호, 1993. 9, pp. 131-140.
3. 선우중호, 박창근, 윤수호, "선행강우가 침투에 미치는 영향-Richards공식을 이용하여 계산한 직접 유출과 SCS방법과의 비교", **서울대학교 공과대학 공대연구보고**, 제 23권, 제 2호, 1991.
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.*, Vol. 26, No. 7, 1990, pp. 1483-1496.
5. 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.*, Vol. 25, No. 6, 1989, pp. 1259-1269.
6. Kool, J.B. and Parker, J.C., "Development and Evaluation of Closed-Form Expressions for Hys-

- teretic Soil Hydraulic Properties", *W.R.R.*, Vol. 23, No. 1, 1987, pp. 105-114.
7. Poulouvassilis, A., "The Effect of the Entrapped Air on the Hysteresis Curves of a Porous Body and on its Hydraulic Conductivity", *Soil Science*, Vol. 109, No. 3, 1970, pp. 154-162.
8. Richards, L.A., "Capillary Conduction through Porous Medium", *Physics*, Vol. 1, 1931, pp. 318-333.
9. Talsma, T., "Hysteresis in Two Sands and the Independent Domain Model", *W.R.R.*, Vol. 6, No. 3, 1970, pp. 964-970.
10. Topp, G.C., "Soil-Water Hysteresis Measured in a Sandy Loam and Compared with the Hysteretic Domain Model", *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 33, 1969, pp. 645-651.
11. Topp, G.C., "Soil Water Hysteresis in Silt Loam and Clay Loam Soils", *W.R.R.*, Vol. 7, No. 4, 1971, pp. 914-920.
12. Topp, G.C., Klute, A. and Peters, D.B., "Comparison of Water Content-Pressure Head Data Obtained by Equilibrium, Steady-State and Unsteady-State Method", *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 31, 1967, pp. 312-314.
13. Topp, G.C. and Miller, E.E., "Hysteretic Moisture Characteristics and Hydraulic Conductivities for Glass-Bead Media", *Proc. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 30, 1966, pp. 156-162.
14. Vachaud, G. and Thony, J.-L., "Hysteresis during Infiltration and Redistribution in a Soil Column at Different Initial Water Contents", *W.R.R.*, Vol. 7, No. 1, 1971, pp. 111-127.
15. van Genuchten, M.T., "A Closed -Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Jr. of Soil Sci. Soc. Am.*, Vol. 44, 1980, pp. 892-898.
16. Watson, K.K. and Sardana, V., "Numerical Study of the Effect of Hysteresis on Post-Infiltration Redistributon", in *Infiltration Development and Application*, edited by Y.-S. Fok, 1987, pp. 241-250.
(接受: 1994. 3. 21)