

초기 함수량을 고려한 침투 모형의 유도

Derivation of an Infiltration Model at the Non-Zero Initial Moisture Condition

박 햇 님* / 조 원 철**

Park, Haennim / Cho, Woncheol

Abstract

Infiltration is one of the important processes of the hydrologic cycle determining the distribution of water and has been studied extensively. Various theories and models proposed for this process are usually applicable only when the rainfall intensity is higher than the infiltration capacity. The study by Diskin and Nazimov (1995, 1996) suggested a conceptual infiltration model that comprises two elements. The model can make a reasonable approach to the infiltration process, instead of representing the infiltration as a function of time. The study presented herein improved the existing conceptual infiltration model by an additional consideration of the initial moisture contents. The analysis results for the variation of the infiltration capacity curves for various initial moisture contents demonstrate that the model is more reasonable for the approach to the infiltration process. In addition, the results for the relationship of stormwater events-ponding time are compared with the literature values of that for a number of soil types. The agreement is rather good, leading to the conclusion that the improved model is valid for describing the infiltration process.

keywords : conceptual infiltration model, ponding time, initial moisture contents, infiltration capacity

요 지

침투는 수문 순환에서 물의 분배를 결정하는 중요한 과정 중의 하나이며, 이에 대해 다양한 이론들과 방법들이 제시되었으나 이들은 주로 침투능보다 큰 강우에 대해서만 적용이 가능하였다. Diskin과 Nazimov (1995, 1996)의 연구에서는 두 개의 요소로 구성된 개념적 침투 모형을 제시하여 단순히 시간의 함수로서 침투를 나타내는 것보다 합리적으로 침투 과정에 접근하였다. 본 연구에서는 이러한 침투 과정에서 초기 함수량을 추가적으로 고려하여 기존의 개념적 침투 모형을 개선하였다. 다양한 초기 함수량 조건에 대해 침투능 곡선의 변화를 분석한 결과 본 모형에 의해 보다 합리적으로 침투 과정에 접근할 수 있음을 판단할 수 있었다. 또한 다양한 토양형에 대해 호우 사상-수막 시간의 관계를 고찰한 결과 침투 과정에 대한 본 모형의 적용성이 상당히 높게 나타남을 알 수 있었다.

핵심용어 : 개념적 침투 모형, 수막 시간, 초기 함수량, 침투능

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 공과대학 사회환경·건축공학부 교수

1. 서 론

침투는 수문해석에 있어서 강우의 형태로 유역에 공급되는 물의 분배를 결정하는 매우 중요한 과정이다. 그러나 침투능보다 작은 강우에 대한 침투능의 변화나 이에 따른 수막시간 (ponding time)에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 이에 관련된 연구로는 Diskin과 Nazimov(1995)에서 기존 연구 (Bauer, 1974; Verma, 1982; Singh, 1989; Aron 등, 1992)에 근거하여 유입 조절 요소 및 저수지 요소로 구성된 개념적 침투 모형을 제시하였으며, 국내의 경우, 이은태 (1989)의 연구에서 침투 과정의 시공간적 변화를 고려한 침투 모형을 개발하여, 유역 유출 모형의 정확도를 개선한 바 있으며, 정상옥 (1991)은 침투에 관한 기존 모형의 고찰을 통해 침투 연구의 발달과 필요성에 대해 언급하였고, 정성원과 김승 (1991)의 연구에서 시간에 따라 강우강도가 변하는 부정강우사상 (unsteady rainfall)에 대한 침투량과 초과 강우량을 산정하는 강우 침투 모형을 개발한 바 있다. 또한 김성준 (1991) 및 정하우와 김성준 (1993a)의 연구에서는 토양의 물리적 특성변화를 고려하여 세 개의 층으로 구성된 Green-Ampt 침투 모형을 개발하고, 현장 실험을 통해 이를 평가한 바 있으며, 정하우와 김성준 (1993b)의 연구에서는 Green-Ampt 침투식 및 매개변수의 발전과정과 적용 사례의 고찰을 통해 Green-Ampt 침투식의 현 위상을 정립하였다. 그리고 김일섭 등 (2000)의 연구에서는 장력 침투계를 적용한 실내 실험을 통하여 다양한 침투 모형을 평가하고, 토양의 수리적 특성을 결정한 바 있다.

Diskin과 Nazimov (1995)의 연구에서는 요소 및 상태변수간의 관계를 통해 상부 토양층의 함수량에 따른 침투 및 침투 과정을 가정함으로써, 단순히 시간의 함수로서 침투를 고려하는 것에 비해 보다 합리적으로 침투 과정에 접근하였다. 이 연구에서는 상부 토양층의 초기 함수량이 존재하지 않는다고 가정하여 침투 모형을 유도하였으며, 일정 강우강도에 대한 수막 시간의 관계식을 유도하였다 (Diskin과 Nazimov, 1996). 그러나 실제 자연 상태에서 토양 함수량이 완전히 고갈되는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 상부 토양층에 자연 상태의 초기 함수량이 존재한다고 가정하여 Diskin과 Nazimov (1995, 1996)에서 제시한 침투 모형을 개선하였다. 또한 본 연구에서는 초기 함수량 조건에 따른 침투능 곡선을 분석하고, Smith (1972)에서 제시한 토양별 호우 사상-수막 시간의 관

계를 통해 모형의 적용성을 검토하였다.

2. 모형의 구성

2.1 모형의 기본 구성

Diskin과 Nazimov (1995)에서 제시한 개념적 침투 모형은 두 개의 요소로 구성되어 있다. 첫 번째는 조절된 유입구를 가진 저수지 요소이며, 이는 상부 토양층을 의미한다. 여기서 상부 토양층이란 비포화대 또는 통기대와 같은 물리적 공간이라고 정의할 수 있다. 두 번째는 조절 요소이며 저수지 요소로의 입력을 조절하는 토양의 표면을 의미한다. 상기한 두 요소는 피드백 (feedback) 경로에 의해 연결돼 있으며, 각각 한 개의 입력 값과 한 개의 상태 변수를 가진다. 또한 각 상태변수에 의해 요소로부터의 출력 값을 결정할 수 있는데, 저수지 요소는 한 개의 출력 값을, 조절 요소는 두 개의 출력 값을 가지며 이 중 하나의 출력 값은 저수지 요소로의 입력 값이 된다. 모형의 개념적인 구조는 그림 1에 나타내었다.

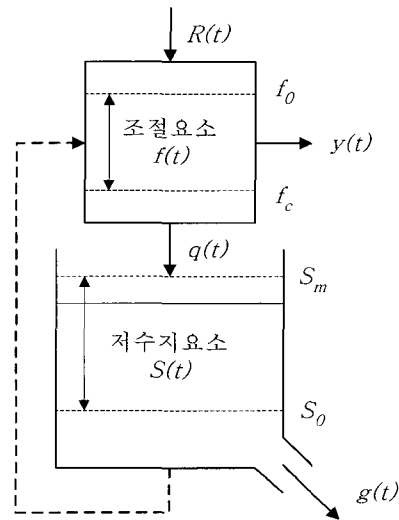


그림 1. 침투 모형의 개념적인 구조

입의 시각 t 에서 저수지 요소의 상태변수는 $S(t)$ 로 나타낸다. 이 요소의 거동을 선형이라고 가정하면, 이 요소로부터의 출력 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t) = AS(t) \quad (1)$$

여기서 A 는 저수지 요소의 출력 값과 상태변수간의 관계를 결정하는 매개변수이다. 이 요소의 출력 값은

단위 시간당, 단위 면적당의 체적 혹은 단위 시간당의 깊이로 나타내어진다. 조절 요소의 상태변수는 $f(t)$ 로 나타내며, 피드백 경로를 통해 전달된 저수지 요소의 상태변수 $(S(t))$ 에 의해 결정된다고 가정한다. 또한 각 요소의 상태변수 사이에는 다음과 같은 선형관계가 성립한다고 가정한다.

$$f(t) = B - CS(t) \quad (2)$$

여기서 B 와 C 는 피드백 경로를 통해 두 상태변수간의 관계를 결정하는 매개변수이다.

조절 요소의 출력 값 $(q(t), y(t))$ 은 요소로의 입력 값 $(R(t))$ 및 상태변수 $(f(t))$ 에 의해 결정되며 다음과 같이 정의된다.

$$\text{If } R(t) \leq f(t) \text{ then} \\ q(t) = R(t) \text{ and } y(t) = 0 \quad (3)$$

$$\text{If } R(t) > f(t) \text{ then} \\ q(t) = f(t) \text{ and } y(t) = R(t) - f(t) \quad (4)$$

여기서 $q(t), y(t), R(t)$ 및 $f(t)$ 는 모두 단위 시간당, 단위 면적당의 체적 혹은 단위 시간당의 깊이로 나타내어진다. 침투 과정에서 조절요소는 저수지 요소로의 입력을 조절하며, 강우입력 $(R(t))$ 으로부터 실제 침투량 $(q(t))$ 및 초과 강우 $(y(t))$ 를 결정한다.

저수지 요소의 상태변수는 입력 값 및 출력 값의 크기에 따른 변화율을 가지며 다음과 같은 질량 보존의 관계를 가진다.

$$q(t) - g(t) = dS / dt \quad (5)$$

각 요소의 거동에 있어서는 선형관계를 가정하였으나 각 요소 및 변수들간의 관계를 통해 볼 때, 전체적인 모형의 거동은 선형이 아니라고 할 수 있다.

저수지 요소는 모형에 의해 정의되는 상부 토양층의 함수량에 관계한다. 요소 상부의 침투 $(q(t))$ 에 의해 요소 내 함수량이 증가하고, 하부의 침투 $(g(t))$ 에 의해 함수량이 감소한다. Diskin과 Nazimov (1995)의 연구에서는 상부 토양층의 정의에 있어 토양층의 깊이 및 유효 공극률의 개념을 사용하지 않고, 이 변수들의 곱에 해당하는 단위 면적당 최대 함수량 (S_m) 을 매개변수로 채택하였다. 상부 토양층의 함수량은 저수지 요소내의 깊이 단위로 표현하며, 다음과 같은 범위를 가진다.

$$0 \leq S(t) < S_m \quad (6)$$

식 (6)의 범위에서 저수지 요소내의 함수량이 증가하면 요소로의 침투능이 감소하고 요소로부터의 침투율이 증가하게 된다. 함수량은 $q(t) > g(t)$ 인 경우에 증가하게 된다. 함수량의 최대 값은 요소로의 입출력 값이 동일할 경우에 발생한다.

$$S(t) = S_m \\ \text{when } q(t) = g(t) = f_c \text{ and } dS / dt = 0 \quad (7)$$

여기서 f_c 는 모형의 매개변수로서 침투능의 최소 값 혹은 침투율의 최대 값을 의미한다.

Diskin과 Nazimov (1995)는 모의 단계 초기의 상부 토양층 함수량이 완전히 고갈되어 있다는 가정에 의해 침투 모형을 유도하였으나, 역설적으로 이러한 가정이 문제가 될 수 있으며 초기 함수량 고려가 필요함을 제시한 바 있다 (Diskin과 Nazimov, 1996). 또한, 실제로 자연상태에서 상부 토양층의 함수량이 완전히 고갈되는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 Diskin과 Nazimov (1995)가 제시한 침투 과정에 초기 함수량 S_0 ($0 \leq S_0 \leq S_m$)를 추가적으로 고려하였으며, 이때 얻어지는 초기 침투능을 f_0 라고 하였다.

상기한 바와 같이 본 모형의 적용을 위해서는 S_0, S_m, f_0 및 f_c 의 네 가지 매개변수가 필요하다. 침투의 최대 값 g_c ($= f_c$)은 저수지 요소의 상태변수가 최대 값 (S_m) 을 가지는 경우에 발생한다. 따라서, 식 (1)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = f_c / S_m \quad (8)$$

또한 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = B - CS_m \quad (9)$$

초기 침투능 (f_0)은 $S(t) = S_0$ 인 경우에 얻어지므로 식 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0 = B - CS_0 \quad (10)$$

따라서, 식 (9) 및 식 (10)으로부터 B 와 C 를 구할 수 있으며, 식 (1)과 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t) = f_c S(t) / S_m \quad (11)$$

$$f(t) = f_0 + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} (S_0 - S(t)) \quad (12)$$

일정한 계산 시간 간격 $\Delta t (= t_{i+1} - t_i)$ 를 고려하면, 식 (5)는 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e - S_b = (q_b + q_e)\Delta t/2 - (g_b + g_e)\Delta t/2 \quad (13)$$

여기서 계산구간 Δt 에 대해 침자 b 는 계산구간 초기의 값을 의미하며 e 는 계산구간 말단에서의 값을 의미한다.

이상과 같은 과정에 대해 Diskin과 Nazimov (1995)는 다음과 같이 $f(t)$ 를 제시한 바 있다.

$$f(t) = f_0 - \frac{(f_0 - f_c)}{S_m} S(t) \quad (14)$$

초기 함수량 (S_0)이 존재하지 않는다고 가정할 경우 ($S_0 = 0$), 식 (12)는 식 (14)와 동일하게 됨을 알 수 있다.

2.2 침투 과정으로의 적용

식 (3) 및 식 (4)에서 제시된 바에 의하면, 저수지 요소의 상태변수 (f)와 강우강도 (R)에 대해 다음과 같은 세 가지의 경우를 고려할 수 있다.

Case (a): $R > f_b$ and $R > f_e \Rightarrow q_b = f_b$ and $q_e = f_e$

이 경우, 식 (13)은 다음 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e - S_b = (f_b + f_e)\Delta t/2 - (g_b + g_e)\Delta t/2 \quad (15)$$

이 식에 식 (12)를 대입하여, 각 계산구간 (Δt) 말단에서의 함수량 (S_e)을 다음 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$S_e = \frac{\left\{1 - \frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{f_c}{S_m} + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right)\right\} S_b + \left(f_0 + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right) \Delta t}{1 + \frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{f_c}{S_m} + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right)} \quad (16)$$

Case (b): $R < f_b$ and $R < f_e \Rightarrow (q_b + q_e)/2 = R$

이 경우, 식 (13)은 다음 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e - S_b = R\Delta t - (g_b + g_e)\Delta t/2 \quad (17)$$

여기서 식 (11)에 의해 다음 식 (18)과 같이 s_e 를 구할 수 있다.

$$S_e = \frac{S_b \left(1 - \frac{f_c \Delta t}{2S_m}\right) + R\Delta t}{1 + \frac{f_c \Delta t}{2S_m}} \quad (18)$$

Case (c): $R < f_b$ and $R > f_e$

이 경우, 계산구간내의 임의 시간 (Δt_1)에서 침투능은 강우강도와 같아질 것이다. 즉, 식 (12)에서 $f(t) = R$ 라고 함에 의해 이 시간에서의 저수지 요소 함수량 (S_r)을 다음 식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$S_r = S_0 + \frac{f_0 - R}{\left(\frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0}\right)} \quad (19)$$

Δt_1 는 식 (17)에서 S_e 및 Δt 에 각각 S_r 및 Δt_1 을 대입하여 구할 수 있다.

$$\Delta t_1 = \frac{S_r - S_b}{R - \frac{(S_b + S_r)f_c}{2S_m}} \quad (20)$$

또한, 식 (16)에서 시간간격을 $\Delta t_2 (= \Delta t - \Delta t_1)$ 로 잡고 S_b 에 S_r 을 대입하면, 다음 식 (21)과 같이 계산구간 (Δt) 말단에서의 상부 토양층 함수량을 구할 수 있다.

$$S_e = \frac{\left\{1 - \frac{1}{2} \Delta t_2 \left(\frac{f_c}{S_m} + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right)\right\} S_r + \left(f_0 + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right) S_0 \Delta t_2}{1 + \frac{1}{2} \Delta t_2 \left(\frac{f_c}{S_m} + \frac{f_0 - f_c}{S_m - S_0} \right)} \quad (21)$$

2.3 수막 시간의 산정

침투 과정에 있어 ‘수막 (ponding)’은 침투능보다 작은 실제 침투율에서 침투능으로의 변환을 의미하며, 이러한 변환으로부터 유효강우가 형성된다. 이러한 과정은 일정 강우강도 (R_c)가 다음 식 (22)와 같은 범위에서 주어질 때 발생한다.

$$f_c < R_c < f_0 \quad (22)$$

식 (22)에 대해 수막 저류량 (S_p , ponding storage)은 강우강도의 함수이며 수막이 발생할 때의

침투율 (f_p)은 강우강도 (R_c)와 같다는 가정으로부터 유도될 수 있다. 따라서 식 (12)로부터 수막 저류량을 다음 식 (23)과 같이 구할 수 있다.

$$S_p = S_0 - \frac{(R_c - f_0)(S_m - S_0)}{f_0 - f_c} \quad (23)$$

식 (23)에 의하면 수막 저류량은 수막 시간에 관계 없이 유도될 수 있음을 알 수 있다.

수막 시간 (t_p , ponding time)은 식 (23)의 수막 저류량에 해당하는 시간을 의미한다. 수막 시간에서 $q(t) = R_c$ 이므로 이를 식 (5)에 대입하면 다음 식 (24)를 얻을 수 있다.

$$R_c - f_c S / S_m = dS / dt \quad (24)$$

윗 식을 S 에 대해 풀 후, $t=0$ 일 때 $S = S_0$ 라는 초

표 1. 상부 토양층의 초기 함수량에 따른 침투능 곡선의 산정결과

t	R		$S_0 = 0 \text{ mm}$			$S_0 = 10 \text{ mm}$			$S_0 = 20 \text{ mm}$		
			S	f	R_e	S	f	R_e	S	f	R_e
0.0	0.0	①	0.000	20.500	-	10.000	14.289	-	20.000	8.078	-
		②	0.000	20.500	-	10.000	20.500	-	20.000	20.500	-
0.5	1.4	①	0.670	20.084	-	9.810	14.407	-	18.950	8.730	-
		②	0.670	20.084	-	9.810	20.694	-	18.950	23.481	-
1.0	4.2	①	2.622	18.872	-	10.976	13.683	-	19.331	8.494	-
		②	2.622	18.872	-	10.976	19.505	-	19.331	22.401	-
1.5	8.9	①	6.655	16.367	-	14.291	11.624	-	21.422	7.195	0.528
		②	6.655	16.367	-	14.291	16.126	-	21.927	15.028	-
2.0	12.0	①	11.825	13.156	-	18.064	9.281	0.774	22.816	6.329	2.619
		②	11.825	13.156	-	18.791	11.540	0.012	24.849	6.732	0.836
2.5	9.5	①	15.354	10.964	-	20.578	7.719	0.500	23.745	5.752	1.730
		②	15.354	10.964	-	21.650	8.626	0.066	25.495	4.898	1.842
3.0	8.3	①	18.006	9.317	-	22.253	6.679	0.551	24.364	5.368	1.370
		②	18.006	9.317	-	23.449	6.792	0.310	25.585	4.642	1.765
3.5	2.3	①	17.558	9.595	-	21.441	7.183	-	23.369	5.985	-
		②	17.558	9.595	-	22.534	7.725	-	24.486	7.763	-
4.0	1.1	①	16.575	10.206	-	20.123	8.002	-	21.886	6.907	-
		②	16.575	10.206	-	21.123	9.164	-	22.907	12.246	-
4.5	4.8	①	17.446	9.664	-	20.690	7.650	-	22.301	6.649	-
		②	17.446	9.664	-	21.603	8.674	-	23.234	11.317	-
5.0	10.9	①	20.167	7.975	1.040	22.328	6.632	1.880	23.402	5.965	2.297
		②	20.167	7.975	1.040	23.447	6.795	1.583	25.241	5.618	1.224
5.5	14.1	①	21.979	6.849	3.344	23.420	5.954	3.903	24.135	5.510	4.181
		②	21.979	6.849	3.344	24.440	5.783	3.906	25.550	4.742	4.460
6.0	10.2	①	23.187	6.099	1.863	24.147	5.503	2.236	24.624	5.206	2.421
		②	23.187	6.099	1.863	24.975	5.237	2.345	25.593	4.620	2.760
6.5	8.0	①	23.992	5.599	1.076	24.632	5.201	1.324	24.950	5.004	1.447
		②	23.992	5.599	1.076	25.263	4.943	1.455	25.599	4.603	1.694
7.0	2.9	①	23.317	6.018	-	23.902	5.655	-	24.192	5.475	-
		②	23.317	6.018	-	24.479	5.743	-	24.786	6.912	-

- t 는 시간 (hr), R 은 강우강도 (mm/hr), S_0 는 상부 토양층의 초기 함수량 (mm), S 는 상부 토양층의 함수량 (mm), f 는 침투능 (mm/hr), 그리고 R_e 는 유효 강우량 (mm)
- ①은 Diskin과 Nazimov (1995)의 연구에서 제시한 침투 모형에 의한 결과, ②는 본 연구에서 초기 함수량을 고려한 침투 모형에 의한 결과

기 조건을 사용하면 다음 식 (25)를 얻을 수 있다.

$$t = \left(-\frac{S_m}{f_c} \right) \ln \left(\frac{f_c S - R_c S_m}{f_c S_0 - R_c S_m} \right) \quad (25)$$

수막 시간에서의 저류량은 S_p 로 주어지므로 식 (23)과 식 (25)를 이용해서 다음과 같이 수막 시간을 유도할 수 있다.

$$t_p = \left(-\frac{S_m}{f_c} \right) \ln \left\{ 1 - \frac{f_c(R_c - f_0)(S_m - S_0)}{(f_0 - f_c)(S_0 f_c - R_c S_m)} \right\} \quad (26)$$

식 (26)에서 상부 토양층의 초기 함수량 (S_0)이 존재하지 않는 경우를 고려하면, Diskin과 Nazimov (1996)에서 제시한 다음 식 (27)을 얻을 수 있다.

$$t_p = \left(-\frac{S_m}{f_c} \right) \ln \left\{ 1 - \frac{f_c}{R_c} \frac{f_c - R_c}{f_c - f_c} \right\} \quad (27)$$

3. 초기 함수량 조건에 따른 침투능 곡선의 분석

본 연구에서는 다양한 초기 함수량 조건 및 강우강도에 대해 모형으로부터 산정된 침투능 곡선의 변화를 고찰하고, 이를 통해 모형의 적절성을 분석하고자 하였다. 또한 이러한 특성을 Diskin과 Nazimov (1995)에

서 제시한 침투 모형의 결과와도 비교·분석하였다. 이를 위해 강우강도 및 기타 매개변수는 Diskin과 Nazimov (1995)에서 사용한 값을 인용하였다 ($f_0 = 20.5$ mm/hr, $f_c = 4.6$ mm/hr, $S_m = 25.6$ mm). 상부 토양층의 초기 함수량 (S_0) 조건은 0 mm, 10 mm와 20 mm의 세 가지로 가정하였다. 주어진 강우강도 및 초기 함수량 조건에 대해 산정된 상부 토양층의 함수량, 침투능, 유효 강우량은 표 1에 나타내었다. 각 경우에 대해 우량 주상도상에 침투능 곡선으로 나타낸 결과는 그림 2와 같다.

표 1 및 그림 2에서 상부 토양층의 초기 함수량 (S_0)이 0 mm인 경우 본 연구와 Diskin과 Nazimov (1995)에 의한 침투능 산정결과가 동일하게 나타남을 알 수 있다. 이는 2.1절의 마지막 부분에서 나타낸 바와 같이 초기 함수량이 존재하지 않을 경우 식 (12)와 식 (14)가 동일하게 된다는 사실에 의해 설명될 수 있다.

그림 2를 보면 침투능보다 작은 강우강도가 주어질 경우 침투능이 일부 회복되는 것을 알 수 있는데, 모형의 구조면에서 살펴보면 이러한 현상은 상부 토양층의 함수량 (저수지 요소의 상태변수)이 감소할 때 발생한다. 저수지 요소의 상태변수 (f)와 강우강도 (R)의 관계를 통해 살펴보면 이는 2.2절의 Case (b)에 해당하는 것이며, 이 경우 식 (18)에 의해 다음과 같은 범위를

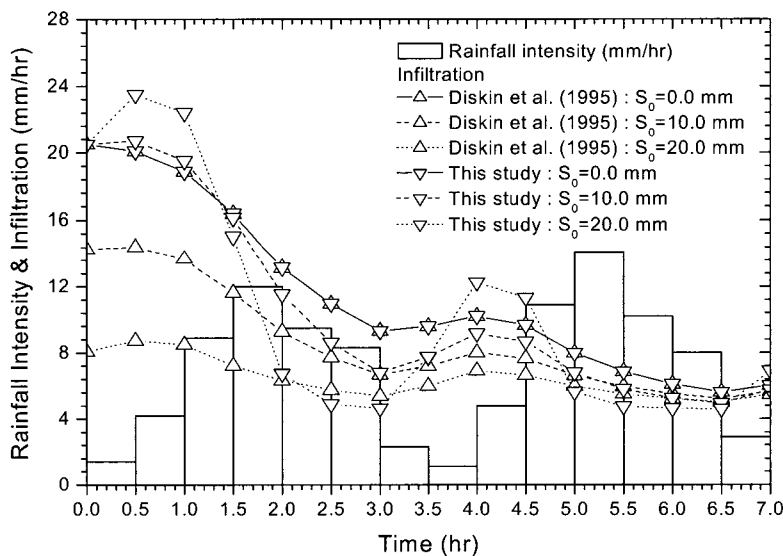


그림 2. 상부 토양층의 초기 함수량에 따른 침투능 곡선

표 2. 상부 토양층의 초기 함수량에 따른 총 유효수량의 산정결과 (mm)

침투 과정	$S_0 = 0$ mm	$S_0 = 10$ mm	$S_0 = 20$ mm
Diskin과 Nazimov (1995)	7.323	11.168	16.593
본 연구에서 제시한 모형	7.323	9.677	14.581

표 3. 각 토양별 증기 침투능, 강우강도-수막시간 관계 및 매개변수 최적화 결과

토양명	f_c	R	t_p	매개변수 최적화 결과			
				f_0	S_0	S_m	결정계수
Poudre sand	83.820	127.20	0.5833	523.135	369.867	399.524	0.9933
		203.40	0.1508				
		253.80	0.0867				
		304.80	0.0587				
		381.00	0.0355				
		457.20	0.0242				
		558.60	0.0155				
		∞	0.0000				
Nickel gravelly sandy loam	16.020	50.82	0.2178	178.539	102.001	111.751	0.9970
		76.20	0.0955				
		88.86	0.0693				
		101.58	0.0523				
		114.30	0.0407				
		127.02	0.0323				
		∞	0.0000				
Nibley silty clay loam	10.020	38.10	0.5568	141.349	243.480	263.103	0.9924
		52.08	0.2903				
		76.20	0.1305				
		88.80	0.0955				
		101.40	0.0722				
		114.60	0.0565				
		127.20	0.0463				
		∞	0.0000				
Colby silt loam (constant ϕ) (I)	5.100	38.10	0.2237	158.770	120.345	129.134	0.9675
		50.82	0.1263				
		63.48	0.0805				
		76.20	0.0553				
		101.58	0.0298				
		190.50	0.0098				
		∞	0.0000				
Colby silt loam (II)	5,100	50.82	0.1465	163.901	95.247	104.415	0.9857
		76.20	0.0632				
		88.86	0.0468				
		101.58	0.0360				
		114.30	0.0288				
		127.02	0.0237				
		∞	0.0000				

1. f_0 는 초기 침투능 (mm/hr), f_c 는 증기 침투능 (mm/hr), S_0 는 상부 토양층의 초기 함수량 (mm), S_m 는 상부 토양층의 최대 함수량 (mm), R 은 강우강도 (mm/hr)이며 t_p 는 R 이 주어질 때의 수막시간 (hr)
2. 토양명, 초기 침투능, 강우강도 및 수막시간의 자료는 Smith (1972)에서 발췌

갖는 식 (28)을 얻을 수 있다.

$$S_e - S_b = \frac{S_b \left(1 - \frac{f_c \Delta t}{2S_m}\right) + R \Delta t}{1 + \frac{f_c \Delta t}{2S_m}} - S_b < 0 \quad (28)$$

윗 식을 정리하면 다음 식 (29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c \frac{S_b}{S_m} > R \quad (29)$$

표 4. 모형의 적용성 검토

토양명	강우형태 (cm/min)	지속시간 (min)	수막시간 (min)		수막시간에서의 침투율 (cm/min)		수막시간까지의 총 침투량 (cm)	
			㉠	㉡	㉠	㉡	㉠	㉡
Poudre sand	㉠ 0.5080	20	3.52	3.92	0.5080	0.5080	1.790	1.990
	㉡ 0.7620	1		0.71		0.7620		0.540
	0.5080	10	3.04	3.28	0.5080	0.5080	1.790	1.800
	㉢ 0.7620	20	1.45	0.71	0.7620	0.7620	1.100	0.540
	0.5080	2						
	0.7620	20	2.20	2.00	0.7620	0.6860	1.160	1.016
Nickel gravelly sandy loam	㉠ 0.1270	30	5.73	6.03	0.1270	0.1270	0.728	0.766
	㉡ 0.1690	2						
	0.1270	20	5.05	5.22	0.1270	0.1270	0.726	0.747
	0.0423	4						
	㉢ 0.0846	4						
	0.1270	20	9.75	10.99	0.1270	0.1270	0.729	0.887
	㉣ 0.1690	30	3.13	3.23	0.1690	0.1690	0.530	0.546
	0.0846	3						
	0.1690	20	4.63	4.97	0.1690	0.1690	0.530	0.587
	0.2117	30	1.79	1.66	0.2117	0.2117	0.420	0.351
㉥ 0.1270	2							
0.2117	20							
Nibley silty clay loam	㉠ 0.0867	30	17.42	18.85	0.0867	0.0867	1.515	1.634
	㉡ 0.1481	3						
	0.0867	20	15.53	16.27	0.0867	0.0867	1.529	1.595
	㉢ 0.1481	30	5.74	5.92	0.1481	0.1481	0.850	0.877
	0.0867	8						
0.1481	20	9.18	9.64	0.1481	0.1481	0.869	0.936	
Colby silt loam (constant ϕ) (I)	㉠ 0.1058	30	4.83	5.59	0.1058	0.1058	0.510	0.591
	㉡ 0.1693	1						
	0.1058	20	4.27	4.93	0.1058	0.1058	0.514	0.585
	㉢ 0.1693	30	1.89	2.03	0.1693	0.1693	0.320	0.344
	0.1058	2						
0.1693	15	2.64	2.82	0.1693	0.1693	0.319	0.350	
Colby silt loam (II)	㉠ 0.1270	30	7.83	4.27	0.1270	0.1270	0.990	0.542
	0.0635	4						
	㉡ 0.1905	2		4.37		0.1905		0.324
	0.1270	15	9.00		0.1270		1.016	

1. ㉠은 Smith (1972)에서 산정된 결과, ㉡는 본 연구에서 개선한 침투 모형에 의한 결과

즉, 임의 계산구간 내의 강우강도가 식 (29)와 같은 범위에서 주어질 때, 구간 말단에서의 상부 토양층 함수량은 감소하고 침투능이 회복하게 된다. 이러한 침투능 회복현상은 단순히 시간의 함수로서 침투를 고려하는 것에 비해 보다 합리적으로 실제의 침투 과정에 접근한 것이라고 판단된다.

그림 2를 보면 본 연구에서 제시한 침투 모형의 경우, 상부 토양층의 초기 함수량이 클수록 강우강도에 대한 침투능 곡선의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. Diskin과 Nazimov (1995)에서 제시한 침투 모형의 경우 초기 함수량이 클수록 초기 침투능이 작게 나타나는데, 이는 초기 침투능을 일정 값 ($f_0 = 20.5 \text{ mm/hr}$)으로 가정한 것에 위배되는 현상이다. Diskin과 Nazimov (1995)에서 제시한 침투 모형은 상부 토양층의 초기 함수량이 존재하지 않는다는 가정에 의해 유도되었으므로, 초기 함수량이 주어질 때 침투능 곡선의 이러한 거동은 비합리적인 것으로 판단된다. 따라서 침투능 곡선의 변화를 보다 합리적으로 모의하기 위해서는 본 연구에서와 같이 상부 토양층의 초기 함수량을 고려하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

표 2에는 상부 토양층의 초기 함수량 조건에 대한 총 유효강우량의 산정 결과를 나타내었는데, 이는 표 1의 R_c 항목으로부터 산정된 것이다. 이를 통해 저수지 요소의 상태변수 초기 값 (초기 함수량)이 클수록 발생하는 총 유효강우량이 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 모형의 적용성 검토

본 연구에서 개선된 침투 모형의 적용성을 일련의 현장조사를 통해 검토한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 그러나 Smith (1972)는 다공질 토양내의 비포화 연직 흐름에 대한 미분 방정식을 풀어 다양한 토양별로 다양한 지속시간을 갖는 호우 사상-수막 시간의 관계를 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 Smith (1972)의 연구결과와 비교하여 모형의 적용성을 검토하고자 하였다.

모형의 적용성 검토에 앞서 본 연구에서는 각 토양 자료에 대해 모형의 매개변수를 최적화하였다. 이를 위해 Smith (1972)가 제시한 각 토양별 강우강도-수막 시간의 관계를 이용하였다. 최적화 과정에 있어서 중기 침투능은 Smith (1972)에 의해 각 토양별로 제시된 값을 사용하였으며, 초기 침투능, 상부 토양층의 초기 함수량 및 최대 함수량을 최적화 대상으로 설정하였다.

표 3에는 각 토양별 중기 침투능 및 강우강도-수막

시간의 관계와 본 모형의 매개변수 최적화 결과를 나타내었다. 여기서 Colby silt loam은 토양의 함수량에 따라 공극률이 일정한 경우 (I)와 그렇지 않은 경우 (II)로 나누었다. 표 3에서 결정계수는 0.9675~0.9970의 범위로 1.0에 근사하게 나타났으므로 최적화 결과는 상당히 양호하다고 할 수 있다.

Smith (1972)는 다양한 지속시간을 갖는 호우에 대해 수막 시간, 수막 시간에서의 침투율, 수막 시간까지의 총 침투량 등을 산정하였는데, 이러한 산정 결과는 각 토양형에 대해 0.999 이상의 상관계수를 갖는 침투 식으로부터 계산된 것이므로 본 연구에서는 이를 적정 기준으로 삼고 모형의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 각 토양별로 최적화된 매개변수 (표 3)를 사용하였으며, 적용성 검토 결과는 표 4에 자세히 나타내었다.

표 4를 보면, 수막 시간의 경우 Poudre sand의 ② 호우 사상에 대해 Smith (1972)에서 산정된 수막 시간은 3.04 분이나, 본 연구에서 산정된 수막 시간은 0.71 분과 3.28 분으로 나타났다. 이는 0.71 분에 첫 번째 수막이 발생한 후에 침투능보다 작은 강우강도가 발생하고, 3.28 분에 다시 두 번째의 수막이 발생한 것을 의미한다. 그러나 두 번째 수막 시간의 경우 Smith (1972)의 산정결과와 본 연구의 모의결과가 유사하게 나타나 0.24 분 (7.9 %)의 차이를 보인다. Poudre sand의 ③ 호우 사상이나 Colby silt loam (II)의 호우 사상에 대해서는 수막 시간의 모의결과가 비합리적으로 나타났다. 그러나, 이러한 경우를 제외하고는 수막 시간의 모의결과가 전반적으로 양호하게 나타났다.

수막 시간에서의 침투율에 대해서는 Colby silt loam (II)의 경우를 제외하고는 상당히 양호한 모의결과를 나타내었다. 이는 수막이 발생하는 계산구간에서의 강우강도-침투능의 관계가 2.2절의 Case (c)에 해당하여, 상기한 수막 시간의 차이에도 불구하고 동일한 값을 갖는 우량 주상도 구간에서 수막이 발생하기 때문이다. 수막 시간까지의 총 침투량에 있어서도 Poudre sand의 ③ 호우 사상이나 Colby silt loam (II)의 호우 사상에 대한 경우를 제외하고는 전반적으로 양호한 모의결과를 나타내었다.

결론적으로, 본 연구에서 제시한 침투 모형은 Poudre sand의 일부 호우 사상이나 Colby silt loam (II)의 호우 사상에 대한 경우를 제외하고는 전반적으로 상당히 양호한 모의 결과를 나타내어 모형의 적용성이 비교적 높은 것으로 나타났다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서 사용된 침투 모형은 조절된 유입구를 가진 저수지 요소와 조절 요소로 구성되는 비교적 간단한 개념적 모형으로서 기존 연구 (Diskin과 Nazimov, 1995, 1996)에서는 상부 토양층의 초기 함수량이 존재하지 않는다는 가정을 통해 침투 과정을 모의하고, 일정 강우강도에 대한 수막 시간을 유도하였다. 그러나 실제 자연상태에서 상부 토양층의 초기 함수량이 완전히 고갈되는 것은 불가능하므로, 본 연구에서는 Diskin과 Nazimov (1995)에서 제시한 침투 과정에 초기 함수량을 추가적으로 고려하여 개선된 모형을 제시하였다.

초기 함수량 조건에 따른 침투능 곡선 변화를 분석한 결과, 침투능보다 작은 강우강도에 대해 침투능이 부분적으로 회복하는 과정을 모의할 수 있었으며 단순히 시간의 함수로서 침투를 고려하는 것에 비해 보다 합리적으로 실제의 침투 과정에 접근할 수 있었다. 그러나 Diskin과 Nazimov (1995)에서 제시한 모형의 경우 초기 함수량 조건에 대해 비합리적인 거동을 나타내었으며, 따라서 본 연구에서와 같이 상부 토양층의 초기 함수량을 고려하는 것이 보다 바람직하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서는 다양한 토양자료에 대해 모형의 매개변수를 최적화하고 호우 사상-수막 시간, 수막 시간에서의 침투율, 수막 시간까지의 총 침투량 관계를 통해 모형의 적용성을 검토하였다. 모형의 적용성 검토에서는 대체로 양호한 결과를 나타내 모형의 적용성이 전반적으로 높은 것으로 나타났다. 그러나 본 모형의 일반적인 적용이 가능하도록 하기 위해서는 일부 호우 사상이나 토양자료에 대해서 추가적인 모의 및 해석이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 저류요소 및 유입조절요소의 관계에서 상부 토양층의 함수량에 따른 침투 및 침투의 과정을 가정함으로써 단순한 시간의 함수로서 침투를 고려하는 것에 비해 보다 합리적으로 침투 과정을 이해할 수 있는 가능성을 내포한다. 하지만 토양 함수량과 관계된 매개변수의 산정이 용이하지 않으므로 이에 관한 추가적인 연구뿐만 아니라, 유도된 유효강우량의 시간적 분포에 대한 적절성 검토 또한 향후의 연구과제가 될 것이다.

참 고 문 헌

김성준 (1991). 토양의 물리적 특성의 변화를 고려한 강우의 침투모형 개발. 박사학위논문, 서울대학교.
 김일섭, 강정훈, 이도훈, 이은태 (2000). "장력침투계

를 이용한 침투율 및 토양 수리적 특성의 결정."

2000년 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 401-404.

이은태 (1989). 침투를 고려한 지표유출 모형에 관한 연구. 박사학위논문, 고려대학교.

정상옥 (1991). "침투연구의 발달과 필요성." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제24권, 제1호, pp. 6-12.

정성원, 김승 (1991). "Green-Ampt 방법에 의한 강우침투 모형." 수공학논총, 제33권, pp. 144-155.

정하우, 김성준 (1993a). "토양의 물리적 특성의 변화를 고려한 강우의 침투모형 개발." 한국 농공학회지, 한국농공학회, 제35권, 제3호, pp. 36-46.

정하우, 김성준 (1993b). "Green-Ampt 침투식 및 매개변수의 발전과정." 서울대농학연구지, 제18권, 제2호, pp. 67-81.

Aron, G., Dempsey, B.A., and Smith, T.A. (1992). *Pen State runoff model user manual*. Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, PA.

Bauer, S.W. (1974). "A modified Horton equation during intermittent rainfall." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 19, pp. 219-224.

Diskin, M.H., and Nazimov, N. (1995). "Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process." *Journal of Hydrology*, Vol. 172, pp. 313-330.

Diskin, M.H., and Nazimov, N. (1996). "Ponding time and infiltration capacity variation during steady rainfall." *Journal of Hydrology*, Vol. 178, pp. 369-380.

Singh, V.P. (1989). *Hydrologic Systems : Volume. 2. Infiltration*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Smith, R.E. (1972). "The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer." *Journal of Hydrology*, Vol. 17, pp. 1-21.

Verma, S.C. (1982). "Modified Hortons infiltration equation." *Journal of Hydrology*, Vol. 58, pp. 383-388.

(논문번호:01-050/접수:2001.6.27/심사완료:2002.05.14)