

## Green-Ampt 방법에 의한 강우침투모형

정 성 원, 김 승

한국건설기술연구원 수자원연구실

### 요 지

본 연구에서는 유출모형을 구성하기 위한 작업의 일환으로 유역의 제반특성을 고려하여 시간에 따라 강우강도가 변화하는 부정강우사상(unsteady rainfall)에 대한 침투량과 초과우량을 산정하는 강우침투모형을 유출모형의 부프로그램으로서 개발하였다. 과거에 제안되었던 침투량 산정방법을 조사하여 강우침투모형을 구축하는데 적합한 침투량 산정방법으로서 Chu가 제안한 단층균질토양의 유역에서 부정강우사상에 대한 침투량을 산정하는 Green-Ampt 변형방법을 선정하였다.

Green-Ampt 방정식의 매개변수인 토양수분부족량의 추정에 필요한 토양수분함량을 산정하기 위하여 단순선행토양수분모형을 응용하여 토양수분의 변화를 추정하였으며 지표면에서의 담수 유무에 따라서 침투량과 초과우량을 산정하고 토양수분을 산정하는 프로그램을 구성하였다.

선정된 적용대상유역의 강우자료와 Green-Ampt 방정식의 매개변수 추정치를 사용하여 계산된 유출량과 실측유출량을 비교함으로써 프로그램의 적정성을 검토하였다.

### 1. 서론

물순환과정 중에서 침투부문은 유출 측면에서 볼 때 차단 및 지표면 저류 등과 함께 손실량을 구성하는 주요 요소일 뿐 아니라 하천유출에 직접적으로 기여한다.

지표면에서 침투된 양은 토양수분을 증가시키며 이중에서 일부는 지표면을 통하여 증발되거나 식생을 통하여 증산되어 대기로 손실되며 일부는

시간을 지체하며 중간유출을 통하여 하천유출에 기여하며 일부는 침투작용을 통하여 지하수유출에 기여한다. 또한 침투부분은 토양의 침투능에 따라서 직접유출의 근원인 초과우량의 발생에 영향을 미친다.

본 연구는 유출모형을 구축하는 작업의 일환으로 강우침투모형을 구축하는데 있다. 따라서 기개발된 침투모형을 조사하여 구조가 단순하면서도 물리적 의미를 가지는 Green-Ampt 방법중 Chu가 변형한 방법을 선정하여 침투량 및 초과우량을 추정하는 프로그램을 구성하였고, 또한 단순선행토양수분모형을 응용하여 토양수분의 변화를 추정하는 프로그램을 구성하였다.

본 연구 결과는 유역물관리시스템의 근간이 되는 유역유출모형의 부프로그램으로서 이용될 것이며, 또한 장기유출 예측, 용수수요 예측, 갈수예측 등 각종 수문연구에서 토양수분의 변화를 추정하는데 이용될 것으로 기대된다.

## 2. 침투량 산정방법의 선정

침투량 산정방법은 경험공식, 대수방정식, 편미분방정식 등 3가지 방향으로 발전하여 왔다. 경험공식은 Kostiakov, Horton, Holtan 등에 의하여 제안되었으며 식 자체가 단순하거나 물리적 의미가 부족하며 담수발생 시간(ponding time) 이전의 침투과정을 단순히 처리하거나 또는 무시하였다. 반면에 편미분방정식에 의한 침투량 산정방법은 Richards, Philip, Parlange 등에 의하여 제안된 방법으로 토양수분의 거동을 수학적으로 표현하여 물의 침투과정을 보다 물리적으로 표현하였으나 수치해법으로 해를 구하여야 하므로 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가진다. 대수방정식에 의한 침투량 산정방법은 두가지 방법의 중간 특성을 가지며 모형이 비교적 단순하면서도 좋은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 모형이 비교적 단순하면서도 매개변수가 물리적 의미를 가진 계산도 비교적 간단하고, 또한 다양한 유역의 조건에서도 적용이 가능한 Green-Ampt 방법을 발전시켜 부정강우사상(unsteady rainfall)에 적용할 수 있는 Chu 방법을 선정하였다.

### 3. Chu의 Green-Ampt 방법에 의한 침투량 산정방법

Green과 Ampt는 1911년에 담수된 지표면 아래에서의 침투과정에 대하여 침투율을 습윤전선까지 토양의 깊이의 함수로 표현하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$f = a + \frac{b}{L_w} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 침투율,  $a$ 와  $b$ 는 상수,  $L_w$ 는 지표면에서 습윤전선까지의 토양깊이이다.

Mein과 Larson은 1973년에 일정강우사상(steady rainfall)에 대하여 적용할 수 있도록 다음과 같이 Green-Ampt 방정식을 변형 발전시켰다.

$$f = f_p = K_s \left( 1 + \frac{S_{av} M_d}{F} \right) \quad (2)$$

여기서  $f_p$ 는 침투능,  $K_s$ 는 포화투수계수,  $S_{av}$ 는 평균모세관흡수력수두,  $M_d$ 는 초기토양수분부족량,  $F$ 는 누가침투량이다.

Chu는 1978년에 Mein과 Larson에 의하여 변형된 Green-Ampt 방법을 부정강우사상에 대하여 적용할 수 있도록 확대 발전시켰다. 또한 실무에서 침투과정을 모형화하는데 편리하도록 침투량을 추정하는데 지표가 되는 지표면에서의 담수유무를 판단할 수 있는 지표면상황지수(surface condition indicator)를 제안하였다.

Chu 방법은 침투과정을 표현하기 위하여 다음과 같은 가정하에 제안되었다.

- . 토양속의 흐름은 평면의 습윤전선을 따라서 이루어진다.
- . 확산(diffusion)의 영향은 고려하지 않는다.
- . 토양수분의 확산을 고려하지 않으므로 강우기간 동안에 투수계수, 모세관흡수력수두, 토양수분부족량은 흙의 깊이 및 방향에 관계없이 일정하다.
- . 토양의 공간 및 수직분포는 유역 전반에 걸쳐 균질하다.
- . 선행토양수분은 균등한 분포를 갖는다.

Chu에 의하여 제안된 부정강우사상에 대한 침투량 산정방법은 지표면에서 담수가 발생하기 전후를 분리하여 다음과 같이 제안하였다.

- 1) 시간  $t'$ 에서  $t$ 까지의 지표면 무담수 기간 동안의 침투과정

$$F(t) = P(t) - R(t') \tag{3}$$

$$R(t) = R(t') \tag{4}$$

$$f(t) = i(t) < f_p \tag{5}$$

$$r(t) = 0 \tag{6}$$

여기서 F는 누가침투량, P는 누가강우량, R은 누가초과우량, f는 침투율, i는 강우강도, f<sub>p</sub>는 침투능, r은 초과강우율이다.

2) 시간 t'에서 t까지의 지표면 담수기간 동안의 침투과정

$$t_p = [KSM/(I - K) - P(t') + R(t')]/I + t', \quad I > K \tag{7}$$

$$P(t_p) = P(t') + (t_p - t') I \tag{8}$$

$$Kt_s/SM = [P(t_p) - R(t')]/SM - \ln\{1 + [P(t_p) - R(t')]/SM\} \tag{9}$$

$$F_s/SM - \ln(1 + F_s/SM) = K(t - t_p + t_s)/SM \tag{10}$$

$$f(t) = f_p = K(1 + SM/F_s) \tag{11}$$

$$R(t) = P(t) - F_s - D, \quad P-F-D > R(t') \tag{12}$$

$$R(t) = R(t'), \quad P-F-D \leq R(t') \tag{13}$$

$$r(t) = i(t) - f_p, \quad G = D \quad i > f_p \tag{14}$$

$$r(t) = 0, \quad G < D \quad \text{or} \quad i \leq f_p \tag{15}$$

여기서 K는 투수계수, S는 모세관흡수력수두, M은 토양수분부족량, t<sub>p</sub>는 담수발생시간, t<sub>s</sub>는 가상전이시간, I는 강우강도, D는 지표수 보류능, G는 지표면 보류량이다.

Chu는 지표면의 담수상태를 파악할 수 있는 지표면상황지수 C<sub>u</sub> 및 C<sub>p</sub>를 다음과같이 제안하였다.

표 1 지표면상황지수에 따른 지표면의 담수상태

지표면상황지수	담수상태	
	시점시각	종점시각
C <sub>u</sub> < 0	X	X
C <sub>u</sub> ≥ 0	X	0
C <sub>p</sub> < 0	0	X
C <sub>p</sub> ≥ 0	0	0

$$C_u = P(t) - R(t') - KSM/(I - K), \quad I > K \tag{16}$$

$$C_p = P(t) - Ft(t) - R(t') \tag{17}$$

지표면상황지수 C<sub>u</sub>는 특정 계산구간의 시점시각에 지표면이 담수되어 있지 않은 상태에서 종점시각에서의 지표면의 담수상태를 나타내며 지표면

상황지수  $C_p$ 는 시점시각에 지표면이 담수되어 있는 상태에서 종점시각에서의 지표면의 담수상태를 나타낸다. 특정 계산시각에 지표면에서의 담수여부는 표 1과 같다.

#### 4. 토양수분의 산정

토양속에서 토양수분은 지표면에서 토양속으로 유입되는 침투량에 의하여 증가되며 지표면을 통한 대기로의 증발, 식생의 증산작용에 의한 증산과 지하수로 보충되는 침투현상 등으로 손실되므로 토양수분함량은 지속적으로 증가 또는 감소한다. 본 연구에서는 Chu 방법의 토양수분부족량을 추정하기 위하여 토양속에서 일어나는 토양수분의 거동을 단순화하여 Rajendran과 Mein이 제안한 단순선행토양수분모형을 응용하여 토양수분부족량의 변화를 산정하였다. 토양수분부족량  $M$ 은 공극률  $n$ 에서 토양수분함량  $\theta$ 를 뺀 값으로 계산된다. 즉,

$$M = n - \theta \quad (18)$$

Rajendran 등에 따르면 현장에서는 토양수분함량은 위조점에 대한 공극률  $n_{w,p}$ 와 채움가능공극률  $n_f$  사이의 수치를 가진다고 알려져 있으므로 토양수분함량과 토양수분부족량은 다음과 같은 범위를 갖는다.

$$n_{w,p} \leq \theta \leq n_f \quad (19)$$

$$n - n_f \leq M \leq n - n_{w,p} \quad (20)$$

단순선행토양수분모형은 토양수분부족량이 하루에 0.02배씩 증가한다는 모형이다.

본 연구에서는 토양수분이 식(19)의 범위내에서 한정된 토양의 깊이까지 수직으로 균등하게 분포한다고 가정하여 토양수분함량이 시간당 0.00083(=0.02/24)배씩 감소한다고 가정하여 토양수분함량  $\theta$ 의 손실 변화량을 계산하여 토양수분부족량을 추정하였다.

#### 5. 모형의 구성 및 적용

##### 5.1 모형의 구성

Chu 방법에 의하여 부정강우사상에 대한 침투량을 산정하기 위한 계산 프로그램은 매개변수, 수문시계열자료 등의 자료 입력부분과 지표면의 담

수조건에 따른 침투량의 산정과 토양수분을 산정하는 계산부분, 계산결과 출력부분으로 구성되었으며 개략흐름도는 그림 1과 같다.

### 5.2 적용대상구역

프로그램을 적용하기 위하여 강우와 유출자료가 비교적 정교한 입엽 연구원의시험구역중 광릉의 침투수림을 선정하였다. 이 구역은 잣나무와 전나무를 재배한인공조림지로서 구역의 방위가 정남을 향하고 있으며 구역의 지형 및 토양특성은 표 2와 같다.

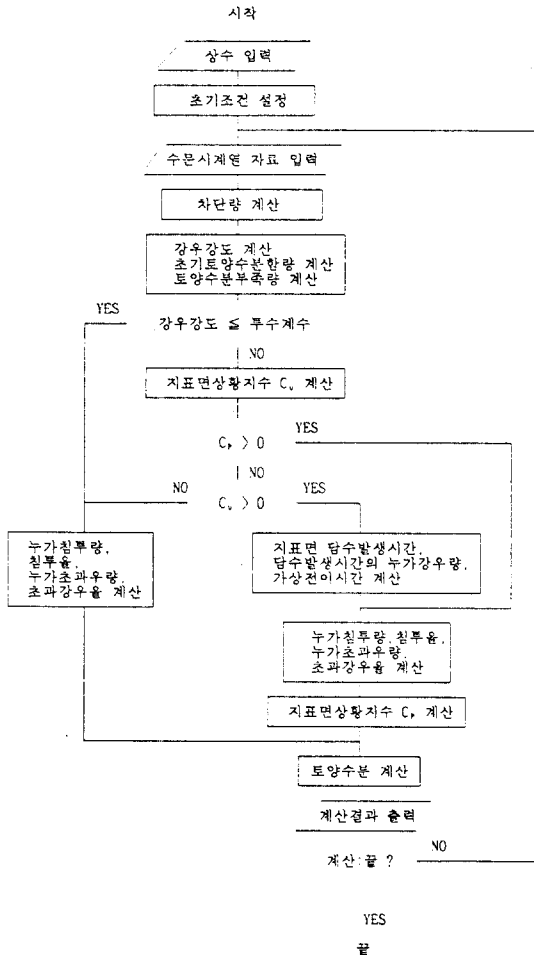


그림 1 개략흐름도

표 2 적용대상구역의 지형특성

면적(ha)	높이(m)	경사(%)	토성분류	기 타
13.60	160-290	13-35	사양토	76년 이식

### 5.3 매개변수 추정

Chu 방법의 매개변수인 투수계수  $K$ , 모세관흡수력수두  $S$  및 토양수분 부족량  $M$ 을 산정하는 방법은 수많은 제안되어 왔다. 그러나 토양에 대한 실험관측자료가 미미하므로 실험자료로부터 토양의 특성을 나타내는 매개변수를 산정하기가 어렵다. 따라서 적용대상구역의 토양이 유역 전반에 걸쳐 사양토로 구성되어 있다고 가정하여 본 연구에서는 Rawls 등이 1983년에 표 3과 같이 토성별로 제시한 수치중 사양토에 대한 자료를 이용하였다. 표에서 포화투수계수  $K_s$ 는 10.9 mm/hr이므로 투수계수  $K$ 는 Rajendran과 Mein이 제안한 포화투수계수의 1/3값을 사용하여 3.63 mm/hr로 추정하였으며, 모세관흡수력수두  $S$ 는 110.1 mm이다. 또한 공극률  $n$ 은 0.453이며 유효공극률  $n_e$ 는 0.412이므로 잔류토양수분함량  $\theta_r$ 은 0.041이다.

$$0.041 \leq \theta \leq 0.4077 \quad (21)$$

#### 5.4 적용결과 및 분석

광릉 침엽수림의 1987년의 4월 1일부터 10월 31일까지의 시강우자료로부터 구성된 프로그램을 이용하여 침투량과 초과우량을 산정하기 위하여 다음과 같은 기본가정 및 초기조건을 사용하였다.

- . 강우 및 식생밀도는 유역전반에 걸쳐 일정하다.
- . 차단량은 식생밀도 및 강우조건과 상관없이 12 mm로 일정하다.
- . 초기토양수분함량은 공극률의 50%가 물로 차있다고 보아 0.2265로 가정하였다.

이 기간의 강우량은 1492.9 mm로 이중 18.5%인 276.4 mm가 차단되고 나머지 81.5%인 1216.5 mm가 지표면에 도달하였다. 이중 72.7%인 884.1 mm가 침투하였으나 나머지 27.3%인 332.4 mm가 초과우량으로 나타났다. 산정된 누가침투량과 누가초과우량의 결과는 그림 2와 같다.

초과우량은 직접유출에 기여하는 우량으로서 지표하유출을 고려하여 유역추적후에 하천유출량으로서 환산되므로 초과우량과 하천유출량의 정량적 비교는 될수 없으나 어느정도 정성적 비교는 가능하므로 강우량과 산정된 초과우량 그리고실측유출량으로부터 환산된 유출고를 비교하였으며 결과는 그림 3과 같다. 대체적으로 초과우량이 유출고보다 다소 작게 나타나고 있으나 강우에 대한 초과우량과 유출고는 유사한 반응을 보이고 있다.

그림 4는 토양수분함량의 변화를 도시한 그림으로 침투로 인한 토양수분의 증가나 증발산, 침투 등으로 인한 손실 등의 양적 변화를 나타내고 있으나 실측토양수분자료의 부재로 적절하게 모의가 되었는지는 판단할 수가 없다.

그림 5는 1987년 8월 15일 호우로 단일 호우사상에 대한 침투량 및 초과우량의 산정결과를 잘 나타내고 있다. 강우초기에는 강우량이 모두 차단되며 강우강도가 투수계수보다 작거나 침투능보다 작으므로 강우량이 전부 토양속으로 침투되며, 강우강도가 침투능을 초과하는 시점에 지표면에서 담수가 발생한다. 담수발생 이후에는 강우량중 침투능에 해당하는 양은 침투되며 나머지는 초과우량으로 나타난다. 강우강도가 침투능 이하로 떨어지는 시점에서 다시 강우량은 모두 침투하게 된다.



### 6. 결론

본 연구에서는 유출모형을 구성하기 위한 작업의 일환으로 유출모형의 부프로그램으로서 강우침투모형을 구축하였다. 침투량을 산정하기 위하여 Chu의 Green-Ampt 방법을 이용하였으며, 토양수분의 산정은 단순선행토양 수분모형을 응용하여 강우침투 프로그램을 구성하였다. 구성된 프로그램의 적정성을 살펴보기 위하여 임업연구원의 시험유역중 침엽수림의 시간단

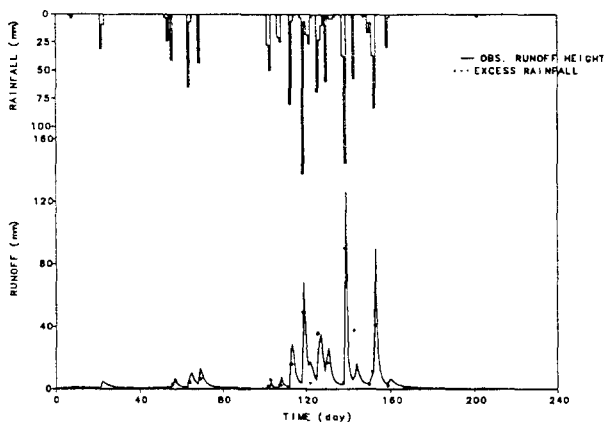


그림 2 누가강우량-누가침투량-누가초과우량 산정결과 비교

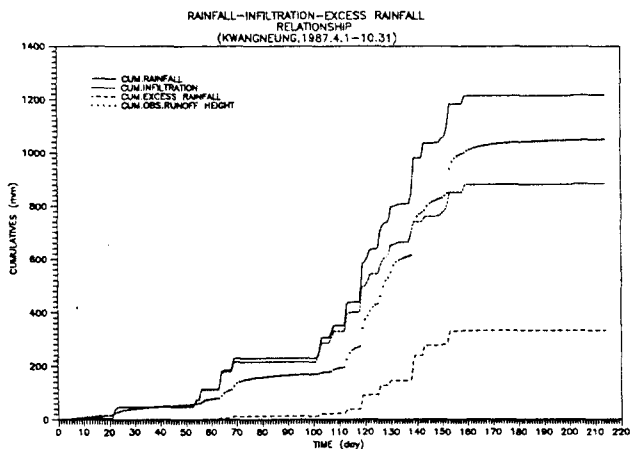


그림 3 초과우량과 실측유출고의 비교

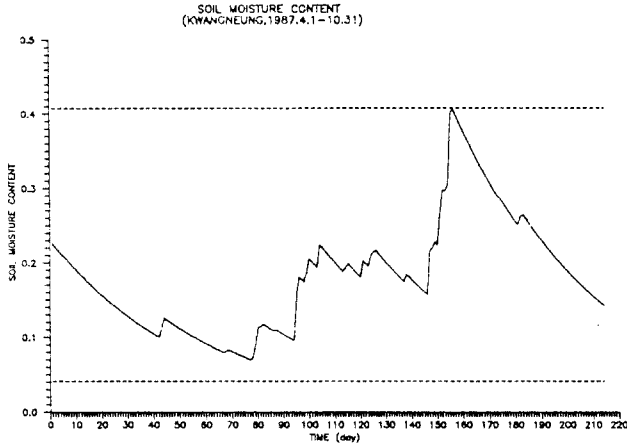


그림 4 토양수분함량의 변화

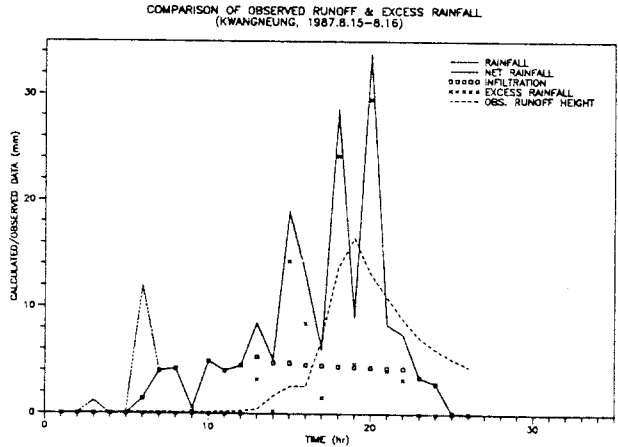


그림 5 강우량-침투량-초과우량의 비교

위의 강우와 유출자료를 이용하여 모의된 초과우량과 실측유출고를 비교하여 보았다. 모의 결과 강우량의 22.3%가 초과우량으로 나타났으며 초과우량은 전반적으로 유출고보다 다소 작게 나타났다.

본 연구의 범위를 강우침투모형의 구성으로 국한하였기 때문에 모의 결과인 침투량과 초과우량만으로는 매개변수 및 모형의 적정성을 판단하기가 어렵다. 따라서 강우침투모형의 적정성을 판단하기 위하여 물순환과정 중 중발산 부분, 중간및 기저유출을 산정하는데 필요한 토양수분 부분, 그리고 유역 및 하도추적 부분을 추가할 것이 요구된다.

## 참고문헌

1. Brakensiek, D.L.(1977), "Estimating the Effective Capillary Pressure in the Green and Ampt Infiltration Equation," Water Resources Research, Vol.13, No.3, PP.680-682.
2. Brakensiek, D.L., and Onstad, C.A.(1977). "Parameter Estimation of the Green and Ampt Infiltration Equation," Water Resources Research, Vol.13, No.6, PP.1009-1012.
3. Chu, S.T.(1978), "Infiltration during an Unsteady Rain," Water Resources Research, Vol.14, No.3, PP.461-466.
4. Clapp, R.B., and Hornberger, G.M.(1978). "Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties," Water Resources Research, Vol.14, No.4, PP.601-604.
5. Fok, Y.S.(1987). "Evolution of Algebraic Infiltration Equations," edited by Fok, Y.S., Proceedings of the '87 International Conference on Infiltration Development and Application, Water Resources Research Center, Univ. Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii, PP.38-49.
6. Green, W.H., and Ampt, G.A.(1911), "Studies on Soil Physics, Part I.The Flow of Air and Water through Soils," Journal of Agricultural Sciences, Vol.4, No.1, PP.1-24.
7. Mein, R.G., and Larson, C.L.(1973), "Modeling Infiltration during a Steady Rain," Water Resources Research, Vol.9, No.2, PP.384-394.
8. Rajendran, R., and Mein, R.G.(1986), "Determination of Rainfall Excess on Spatially Variable Catchments," Journal of Hydrology, Vol.83, PP.67-89.
9. Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N.(1983), "Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data," Journal of the Hydraulic Engineering, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.109, No.1, PP.62-70.
10. Singh, V.P.(1989), Hydrologic Systems, Volume II Watershed Modeling, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, PP.35-77.

11. 건설부(1989), 유역물관리시스템, 수자원관리기법개발 연구조사 보고서, 제 2권, 한국건설기술연구원.
12. 남선우, 최은호(1990), "산지유역의 초과우량추정 모형," 한국수문학회지, 제 23권, 제 3호, PP.351-361.