韓國水資源學會論文集
第33卷 第3號 · 2000年 6月
pp 365~374

단순 강우-유출 사상으로부터 최적단위도와 침투율의 결정

Determination of Optimal Unit Hydrographs and Infiltration Rate Functions from Single Rainfall-Runoff Event

안 태 진* / 류 희 정** / 정 광 근*** / 심 명 필****
Ahn, Taejin / Lyu, Heui Jeong / Chung, Kwang Kun / Shim, Myung Pil

Abstract

This paper is to present the determination of the optimal loss rate parameters and unit hydrographs from the observed single rainfall-runoff event using optimization models coupled with a stochastic technique for the global solution. Two kinds of the linear program models are formulated to derive the optimal unit hydrographs and loss rate parameters for gaged basins; one minimizes the summation of the absolute residual between predicted and observed runoff ordinates and the other, the maximum absolute residual. Multistart algorithm which is one of stochastic techniques for the global optimum is adopted to perturb the parameters of the loss rate equations. Multistart efficiently searches the feasible region to identify the global optimum for loss rate parameters, which yields the optimal loss rate parameters and unit hydrograph for Kostiakov's, Philip's, and Horton's equation. The unique unit hydrograph ordinates for a given rainfall-runoff event is exclusively obtained with Φ index, but unit hydrograph ordinates depend upon the parameters for each loss rate equations. The parameters of Green-Ampt's are determined through a trial and error method. In this paper the single rainfall-runoff event observed from a watershed is considered to test the proposed method. The optimal unit hydrograph herein found has smaller deviations than the ones reported previously by other researchers.

Keywords : loss rate parameters, optimal unit hydrograph, global optimum, linear program model, multistart algorithm

요 지

본 연구는 관측된 단일 강우-유출사상으로부터 최적화 모형과 추계학적 기법을 결합하여 침투율 공식의 최적 매개변수와 단위도를 결정하였다. 수문계측유역에서의 최적 단위도와 침투율을 결정하기 위하여 관측 유출수문곡선과 계산치의 절대오차누계를 최소화하는 모형과 절대최대오차를 최소화하는 선형계획모형을 정립하였다. 손실율의 매개변수를 섭동하기 위하여 추계학적 최적화방법 중의 하나인 Multistart 알고리즘을 채택하였다. Multistart는 분석가능영역을 효과적으로 탐사하여 Kostiakov, Philip, Horton 공식의 최적매개변수를 결정하였다. 유역평균침투능 Φ지표를 적용하면 유일한 단위도의 종거가 결정되지만, Kostiakov, Philip, Horton 및 Green-Ampt공식은 매개변수의 값에 따라 단위도의 종거와 침투율은 달라진다. Green-Ampt공식의 매개변수는 시산법을 적용하여 결정하였다. 제안한 방법의 적용성을 검정하기 위하여 강우-유출 관측자료를 보유한 유역에 관하여 침투식의 매개변수와 단위도를 결정하였으며, 이전 연구자들의 결과보다 나은 해를 구하였다.

핵심용어 : 손실율 매개변수, 최적 단위도, 전체해, 선형계획, Multistart 알고리즘

* 한경대학교 토목공학과 조교수
Asst. Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ., Ansung, Kyonggi 456-749, Korea
(ahntj@hnu.hankyong.ac.kr)
** 한경대학교 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong Nat. Univ., Ansung, Kyonggi 456-749, Korea
*** 농업기반공사 농어촌연구원 선임연구원
Res., Korea Agri. & Rural Infra. Corp., P. O. Box 12, Anyang, Kyonggi 430-600, Korea
**** 인하대학교 토목공학과 교수
Prof. Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

1. 서 론

단위도는 치수 사업에 있어서 계획 홍수수문곡선을 결정하는데 가장 근본적인 사항이다. 한국건설기술연구원(1993)에서 수자원관련 실무자들을 대상으로 실시한 설문조사 결과에 의하면 관측기록이 있는 사업지구에서도 간접적인 방법으로 단위도를 유도한다고 대부분 응답하여 직접관측에 의한 방법에 주저하고 있음을 알 수 있었다. 수문관측시설이 없는 유역은 말할 것도 없고, 하천정비기본계획, 하천 실시설계 등과 같은 중규모 치수사업 이상 하천내 홍수관리를 위한 계획홍수수문곡선의 추정시, 수문계측자료가 있는 경우에도 간접적인 방법으로 계획 홍수수문곡선을 추정하고 있는 실정이다. 따라서 수자원 관련 사업에서 홍수량은 가장 근본이 되는 수문량임에도 불구하고 소홀히 다루어져 계획홍수량 관련 시설의 규모가 불합리하게 설계되고 운영되는 경우가 많다.

직접관측에 의한 단위도의 유도는 단일 또는 복합 강우–유출사상으로부터 Φ지표법으로 손실우량을 계산한 후, 종래의 방법으로 단위도를 유도할 수 있다. 임의 유역은 임의 강우사상에 반응하는 고유의 유역 특성이 있어 고유의 단위도를 갖는다는 것이 단위도의 가정임을 고려할 때 단일 강우–유출사상으로부터 유도한 단위도를 그 유역의 대표단위도로 확정하는 것은 무리임을 알 수 있다. 동일한 유역이라 할지라도 강우사상에 따라 단위도의 종거와 지속기간은 달라지므로 여러 개의 강우–유출사상을 고려할 필요가 있다. 이때 유역 단위도의 종거와 지속기간은 각각 강우사상으로부터 구한 단위도의 종거와 지속기간을 평균하여 결정할 수 있지만(Ponce, 1989), 각 단위도의 기저시간, 첨두유량의 크기 및 첨두유량이 발생하는 시각을 어떤 기준으로 평균하여야 하는지에 대한 의문점이 대두된다(Mawdsley와 Tagg, 1981). 그리하여 최소자승법(least squares methods), 선형 및 비선형계획법 등으로 여러 개의 강우-유출사상을 동시에 해석하여 단위도를 유도하는 방법이 제시되었다. 그러나 Singh(1976)은 최소자승법에 의한 단위도 유도는 단위도 종거의 비부성(nonnegativity)을 보증할 수 없다고 지적하였다. 다행스럽게도 선형 및 비선형계획법은 모형내 변수의 비부성조건을 두어 단위도 종거의 비부성을 보증한다.

Mays와 Coles(1980)은 선형계획모형으로 복합 강우–유출사상으로부터 단위도를 결정하였으며, 손실우량은 Φ지표법으로 결정하였다. Mays와 Taur(1982)는 비선형계획으로 손실우량의 분포가 주어지지 않은 조건에서 단위도를 결정하였고, Unver와 Mays(1984)는 비선형계획인 단위도와 침투식의 매개변수를 결정하였으나, 주어진 초기해에 따라 결과가 달라지므로 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 여러 개의 초기해를 상정하여 비선형계획을 실행하였다. Prasad 등(1999)은 단위도와 Kostiakov, Philip 및 Green-Ampt의 침투식의 매개변수를 선형계획 모형을 이용하여 결정하였다. Mays와 Coles(1980), Mays와 Taur(1982), Unver와 Mays(1984) 및 Prasad 등 (1999)에서 적용한모형은 선형 또는 비선형 제약회귀(constrained regression)모형에서 절대오차누계를 최소화하는 모형이다(Reklaitis 등, 1983).

본 연구에서는 Kostiakov, Philip, Horton 및 Green-Ampt 공식을 침투능 공식으로 채택하였으며, 절대오차누계를 최소로 하는 선형계획모형과 절대최대오차를 최소로 하는 선형계획모형을 정립하고, 각 선형계획모형의 분석가능영역을 용이하게 탐사하는 추계학적(stochastic) 최적화방법인 Multistart 알고리즘을 결합하여 최적침투율과 단위도의 종거를 결정하였다.

2. 선형계획모형

모형 1은 관측 유출수문곡선(direct runoff hydrograph, DRH) $Q_{i,n}$의 종거와 계산 유출수문곡선(DRH) $Q^c_{i,n}$의 편차인 절대오차누계를 최소화함으로서 단위도(unit hydrograph, UH)를 유도한다. 모형 1은 비선형계획이지만 손실우량 $H_{i,n}$이 주어진다면 선형계획 모형으로 변환된다(Prasad 등, 1999).

본 연구에서는 모형 1에 첨부하여 단위도와 침투식의 매개변수를 결정하기 위한 선형제약모형을 절대최대오차를 최소화하는 모형 2를 정립하였다. 모형 1 및 모형 2에서 비음수성 변수(nonnegative variables)인 $Z_{i,n}$와 $V_{i,n}$을 도입하여 양수값의 편차 또는 음수값의 편차(positive or negative deviation)를 허용하였다. $Z_{i,n}$는 절대잔차의 양수부분을, $V_{i,n}$는 음수부분을 의미한다.

▶모형 1 (M1)

$$\min Z_{o1} = \sum_{i=1}^{I} \sum_{n=1}^{N_i} (Z_{i,n} + V_{i,n}) \tag{1}$$

s. t.

$$(R_{i,n} - H_{i,n}) U_1 + (R_{i,n-1} - H_{i,n-1}) U_2 + (R_{i,n-m+1} - H_{i,n-m+1}) U_m + \cdots + Z_{i,n} - V_{i,n} = Q_{i,n} \quad (2)$$

$$(R_{i,n} - H_{i,n}) \ge 0 \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^{L_i} (R_{i,n} - H_{i,n}) = D_i \quad (4)$$

$$C \sum_{m=1}^{M} U_m = 1, \quad Z_{i,n},\ V_{i,n},\ U_m \ge 0 \quad (5)$$

▶모형 2 (M2)

$$\min\ Z_{o2} = y \quad (6)$$

s. t.

$$(R_{i,n} - H_{i,n}) U_1 + (R_{i,n-1} - H_{i,n-1}) U_2 + (R_{i,n-m+1} - H_{i,n-m+1}) U_m + \cdots + Z_{i,n} - V_{i,n} = Q_{i,n} \quad (7)$$

$$(R_{i,n} - H_{i,n}) \ge 0 \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{L_i} (R_{i,n} - H_{i,n}) = D_i \quad (9)$$

$$C \sum_{m=1}^{M} U_m = 1 \quad (10)$$

$$y - Z_{i,n} + V_{i,n} \ge 0 \quad (11)$$

$$y + Z_{i,n} - V_{i,n} \ge 0, \quad Z_{i,n},\ V_{i,n},\ U_m \ge 0 \quad (12)$$

여기서 i는 1, 2, …, I, I는 관측 DRH의 총 개수, n은 1, 2, … , N_i, N_i는 i번째 관측 DRH에서 종거의 총 개수, m는 1, 2, … , M, M는 UH에서 종거의 총개수, Z_o와 y 는 목적함수의 값, $Z_{i,n}$는 i번째 관측 DRH의 n번째 종거에서 관측 DRH 종거 $Q_{i,n}$과 계산 DRH 종거에서 $Q^c_{i,n}$와의 양수값의 편차, $V_{i,n}$는 i번째 관측 DRH의 n번째 종거에서 관측 DRH 종거 $Q_{i,n}$과 계산 DRH 종거 $Q^c_{i,n}$와의 음수값의 편차, R는 Δt 기간의 강우량, H는 Δt 기간의 손실우량, U는 UH의 종거, D는 직접유출 체적, 그리고 Δt는 DRH와 UH에서 종거의 시간간격이다.

i번째 강우사상의 직접유출체적(direct runoff volume) D_i는 다음과 같이 계산된다.

$$D_i = C \sum_{i=1}^{N_i} Q_{i,n} \quad (13)$$

C는 직접유출체적을 유출고(in.)로 환산하기 위한 상수이다. 즉 $C = 12(3600)\Delta t/\ (5280)^2 A$ 이며 A는 유역면적(mi^2)이고, Δt 는 DRH의 시간간격(h)이다.

모형 1과 2는 비선형계획이나 손실우량 $H_{i,n}$이 주어진다면 선형계획 모형으로 변환되며 결정변수는 단위도 U_m와 양·음수 오차 $Z_{i,n}$, $V_{i,n}$이다. 임의 기간 Δt 내 침투손실은 다음 식 (14.a)와 (14.b)로 결정되며 각 침투량식을 고려할 수 있다.

$$H_{i,n} = F_{i,n} - F_{i,n-1} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \quad \text{if } R_{i,n} > \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \quad (14.a)$$

$$H_{i,n} = R_{i,n} \quad \text{if } R_{i,n} \le \int_{t_{n-1}}^{t_n} f(t)dt \quad (14.b)$$

여기서 $F_{i,n}$와 $F_{i,n-1}$는 각각 n 및 $n-1$기간에서의 누가침투손실량이다.

3. 침투공식

Kostiakov 공식은 임의 시간 t 에서의 침투율(infiltration rate, f) 또는 손실율(loss rate)과 누

가침투량(cumulative infiltration, F)을 각각 식 (15)와 (16)으로 표시하였다.

$$f = A\alpha\, t^{\alpha - 1} \tag{15}$$

$$F = A\, t^{\alpha} \tag{16}$$

여기서 A와 α는 각각 손실율 매개변수이며, α는 0에서 1사이의 값을 갖는다.

Philip 공식의 침투율과 누가침투량 공식은 각각 식 (17) 및 식 (18)과 같다.

$$f = \frac{S}{2\sqrt{t}} + K \tag{17}$$

$$F = S\sqrt{t} + Kt \tag{18}$$

여기서 S는 흡수성(sorptivity)이고 K는 최종침투율(ultimate infiltration rate)으로 각각 손실율 매개변수이다.

Kostiakov 공식과 Philip 공식과 달리 Green-Ampt공식은 초기토양수분조건을 고려하고 있으며 침투율과 누가침투량 공식은 각각 식 (19) 및 식 (20)과 같다.

$$f = K(1 + \frac{a}{F}) \tag{19}$$

$$F = Kt + a\ \ln(1 + \frac{F}{a}) \tag{20}$$

여기서 $a = S_f \triangle\theta$이며 S_f는 습윤면 토양흡입수두이고 $\triangle\theta$는 저류가능공극이다.

Horton은 침투능 실측자료를 이용하여 침투율과 누가침투량 공식을 각각 식 (21) 및 식 (22)와 같이 제안하였다.

$$f = f_c + (f_o - f_c)\, e^{-kt} \tag{21}$$

$$F = f_c t + \frac{1}{k}(f_o - f_c)(1 - e^{-kt}) \tag{22}$$

여기서 f_o는 초기침투능이고 f_c는 최종침투능이며 k는 토양의 종류와 식생피복에 따라 결정되는 상수이다.

이상의 침투율공식에서 침투는 시간의 함수로 표현되어 각 공식의 매개변수가 결정되면 침투능 및 침투량은 강우량의 크기에 관계없이 동일하다. 그리하여 Unver와 Mays(1984)는 강우강도를 고려한 침투량 공식을 제안하여 단위도를 유도한 바 있다.

4. 추계학적 최적화방법

침투율의 매개변수가 결정되어 있다면 선형계획 모형 1 또는 모형 2에 의한 결과는 전체 최적해(global optimum)이다. 그러나 침투율이 관측되지 않았다면 침투율의 매개변수에 따라 수많은 해가 있으므로 관측유출량과 계산유출량의 오차를 최소화하는 침투율의 매개변수를 결정하기 위하여 오차를 최소화하는 추계학적인 방법인 모형 3을 제안하였다.

▶모형 3 (M3) : $\underset{q_i}{Min}\left[\ \underset{x \in X}{Min}\ \ f(x)\right]$

여기서 q_i는 섭동된 매개변수의 세트(set), X는 모형 1의 식 (2)~(5) 또는 모형 2의 식 (7)~(12)으로 구성되는 분석가능영역이고 $f(x)$는 섭동된 매개변수 (perturbed parameters)에 따른 목적함수의 값이다. 모형 3에서 내서는 inner problem이라 하며 선형계획 code로 해석한다. 절대오차누게가 최소(모형 1)로 되거나 절대최대오차가 최소(모형 2)로 되는 손실율 매개변수와 단위도의 종거를 결정하기 위하여 채택한 추계학적(stochastic) 최적화방법은 모형 1과 2의 분석가능영역을 탐사하여 근사 전체해(near global optimum) 또는 전체해를 구하는 알고리즘이다 (Schoen, 1991). 즉 모형 3을 근본으로 한 Multistart Local Search와 같은 추계학적 최적화기법을 일부 수정하여 전체해를 구하고자 하였으며, 그 알고리즘은 다음과 같다.

Procedure MULTISTART

Step 0. (Initialization) Select a suitable density function (pdf) with known parameters and assign the number of seed points to be generated, NMAX: determine an estimate of global optimal value f_g : assign a large value for the imcument best objective function value. Best: Set n = 1.

Step 1. (Iterative Local Minimization) Until n = NMAX

do : Generate a seed point the pdf. Apply minimizer the inner problem of the Model 3(M3) from the perturbed parameters. Update incumbent Best.

Step 2. (Termination) If $|f_g - Best| <$ tolerance, report Best and optimal solution and stop. Otherwise, revise parameter values for the generating function, and/or global value f_g and tolerance. Set n = 1; go to step 1.

End procedure

추계학적 최적화방법에 의한 계측지점에서의 단위도 유도 절차(procedure)는 다음과 같다

① 강우-유출 사상 선정

② 손실우량은 Φ지표법으로 결정

③ 각 침투식 상정

④ 추계학적 최적화방법을 적용하여 침투식의 매개변수를 섭동함으로서 모형 1 및 모형 2에 의한 단위도의 종거 및 침투식의 매개변수를 결정

5. 모형의 적용

침투율 매개변수 및 단위도를 결정하기 위한 모형을 적용하기 위하여 Wills Creek 유역에서 관측된 강우-유출 자료를 이용하였다 Wills Creek유역은 미국 Maryland주 Cumberland 인근에 위치하고 있으며 유역면적은 640km^2(247mi.^{2})이다. 1941년 4월 4일부터 5일까지의 발생한 강우의 지속기간은 12시간이었으며 강우-유출 관측자료는 Table 1과 같다. Table 1의 관측자료는 1954년에 미공병단에서 발표하였으며 Unver과 Mays(1984) 및 Prasad 등(1999)의 연구에 적용되었다 Φ 지표는 0.173cm/h(0.0683in./h)이며, 누가침투량은 2.082cm(0.82in.)으로 발표되었다.

Prasad 등(1999)은 Kostiakov 공식의 침투율을 0.0203cm/h(0.008in./h)에서부터 Φ 지표 값인 0.173 cm/h(0.068in./h)까지 0.0254cm/h(0.01in./h)씩 증가시켜 매개변수를 결정한 후, 모형 1을 해석하여 최적 매개변수와 단위도를 결정하였다. 또한 Philip 공식도 임의 시각의 침투율과 누가침투량을 임의로 결정한 후, 모형 1을 해석함으로서 최적 매개변수와 단위도를 결정하였으며, Green-Ampt 공식의 상수는 시산법으로 계산하였다.

관측된 강우-유출 사상으로부터 최종누가침투량을 결정할 수 있으므로, 최종누가침투량의 매개변수값이 결정된다면 임의 시각의 누가침투량이 계산되고, 임의 시각의 손실량을 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모형 1 및 2를 적용하기 전에 Kostiakov, Philip 및 Horton 침투율 공식에서 최종누가침투량의 매개변수 값을 먼저 가정하였다. 즉 임의 시각의 누가침투량이 계산되면 임의 시간의 손실량을 결정할 수 있으므로 비선형계획인 모형 1 및 2는 선형계획으로 변환되어 용이하게 해석된다. 또한 최종누가침투량에 해당되는 매개변수는 Multistart algorithm으로 발생시켜 각 매개변수에 해당하는 침투량과 단위도를 결정하였다. 선형계획 및 표준정규분포 난수발생을 해석하는 부프로그램은 IMSL(International Mathematics Subroutine Library)의 DLPRS 및 RNNOR을 이용하였다 그러나 Green-Ampt 공식의 매개변수는 시산법으로 계산하였다.

모형 1 및 모형 2를 Multistart algorithm에 적용시켜 Φ 지표에 해당하는 단위도, 그리고 Kostiakov, Philip, Green-Ampt 및 Horton 침투율 공식의 최적 매개변수와 단위도를 계산한 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다. Table 1 및 Table 2에서 보는 바와 같이 단위도의 첨두유량은 모형 1에 의한 Φ지표 경우를 제외하고는 모두 1941년 4월 4일 22:00에 발생하였다.

Kostiakov 공식의 최적매개변수 및 단위도를 결정하기 위하여 최종누가침투량 식으로부터 모의발생 시킨 α에 해당하는 A를 계산하고 모형 1 및 2에 적용시켜 해석하였다. 본 연구에서는 Prasad 등(1999)의 결과와 비교하기 위하여 최종누가침투량은 0.8217in.를 적용하였으며, Table 3에 이전의 연구 결과와 금번 연구 결과를 나타내었다. 모형 1 및 Multistart Algorithm을 적용시킨 금번 분석 결과는 α값이 0.349에서 0.441 범위 이내인 경우에는 목적함수(Z_{o1}) 값이 모두 209.1cfs로서 전체해(global optimum)의 범위가 넓었다. 따라서 계산된 단위도와 유효우량으로 유출수문곡선(runoff hydrograph)의 종거를 계산하고 관측 유출수문곡선과의 평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE)를 계산하여 RMSE가 가장 작은 매개변수를 최적매개변수로 하였다.

Table 1. UHO and loss by M1 for Wills Creek, Cumberland, Maryland, April 4-5, 1941

Time	Recorded Data		Φ-index		Kostiakov's Equation		Philip's Equation		Green-Ampt's Equation		Horton's Equation	
	Total Rainfall, in.	DROs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs
1000	0.61	0	0.205	0.0	0.4872	0.0	0.4603	0.0	0.3870	0.0	0.4340	0.0
1300	0.50	150	0.205	370.4	0.1455	978.1	0.1924	673.2	0.1760	672.7	0.2155	504.7
1600	0.33	800	0.205	1705.5	0.1045	3692.1	0.1483	3701.9	0.1360	2610.2	0.1358	3487.9
1900	0.22	2300	0.205	4322.4	0.0845	6277.0	0.0207	6938.9	0.1227	5936.4	0.0364	6873.4
2200		4000		6188.0		6595.6		7072.0		6747.9		7242.6
100		4950		6317.7		5669.6		5184.6		6089.9		5195.8
400		5000		5674.0		5311.7		4925.7		5112.9		4848.4
700		4600		5046.1		4436.0		4899.0		4957.0		5010.2
1000		4000		4215.8		3757.1		3773.1		3629.9		3858.6
1300		3450		3680.2		3241.0		2789.9		3653.6		2778.9
1600		2950		3115.3		2872.3		2871.9		2599.6		2784.8
1900		2550		2735.2		2376.1		2723.5		2895.7		2895.4
2200		2150		2218.6		1797.6		1566.2		1578.4		1564.0
100		1800		1868.9		1935.6		1677.0		2125.1		1599.1
400		1550		1679.8		1111.3		1381.5		1226.5		1475.5
700		1200		1080.4		1025.8		1057.0		1061.8		1037.1
1000		1000		1094.5		1005.2		599.0		947.4		709.1
1300		800		782.4		454.5		545.6		456.5		450.3
1600		600		1037.5		596.0		752.6		831.0		816.8
1900		450										
2200		300										
100		150										
Objective function, Z_{o1} (cfs)				526.8		209.1		209.1		249.8		209.1
RMSE, cfs				62.4		27.4		22.7		28.9		22.5
Optimal Loss Rate Parameters					α=0.377, A=0.322		S=0.264, K=0.001		a=5.077, K=0.005 or a=4.143, K=0.006		f_c=0.03, f_o=0.212 k=0.336	
Note: 1 in ; 1 cfs = 0.0283 m^3/s; DRO=direct runoff ordinate, UHO=unit hydrograph ordinate												

Philip 공식의 최적매개변수는 Table 4와 같으며 Kostiakov 공식과 마찬가지로 목적함수(Z_{o1})가 209.1 cfs으로 전체해(global optimum)의 범위가 넓었다. 즉 K가 0.001일 때 S=0.242-0.264, K가 0.002에서는 S=0.239-0.267, 그리고 K가 0.003일 때는 S=0.236-0.262이내의 매개변수가 전체해를 기약하였으나 RMSE가 가장 작은 K=0.001, S=0.264를 최적매개변수로 하였다. 한편 Prasad 등(1999)에 의하면 Philip 공식에 의한 단위도는 1941년 4월 4일 10시에 해당하는 단위도 종거는 0이지만, 본 연구에서의 모형 1에 의한 결과는 0이 아니었다. 이는 손실량 계산시 소수점 자리에 기인한 듯하다.

Table 2. UHO and loss by M2 for Wills Creek, Cumberland, Maryland, April 4-5, 1941

Time	Recorded Data		Φ-index		Kostiakov's Equation		Philip's Equation		Green-Ampt's Equation		Horton's Equation	
	Total Rainfall, in.	DROs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs	Loss, in.	UHOs, cfs
1000	0.61	0	0.205	0.0	0.4792	0.0	0.4368	0.0	0.3870	0.0	0.4499	0.0
1300	0.50	150	0.205	716.4	0.1483	821.5	0.1862	685.3	0.1760	437.0	0.1946	764.2
1600	0.33	800	0.205	1280.0	0.1072	3581.9	0.1450	3196.8	0.1360	2716.9	0.1204	3489.1
1900	0.22	2300	0.205	4179.6	0.0870	6228.3	0.0537	6575.4	0.1227	5750.7	0.0569	6536.1
2200		4000		6756.5		6572.4		7072.5		6792.1		6995.1
100		4950		5617.4		5595.7		5492.1		6343.4		5443.0
400		5000		5667.9		5327.0		4869.0		4596.1		4854.8
700		4600		5591.6		4305.0		4914.5		5232.3		5042.9
1000		4000		3500.3		3916.6		3897.4		3804.6		3633.5
1300		3450		3687.2		3420.7		2752.6		3621.5		2894.8
1600		2950		3656.7		2530.2		2982.7		2138.5		2834.7
1900		2550		2019.1		2557.7		2817.4		3281.7		2854.3
2200		2150		2918.7		2097.5		1408.6		1668.4		1495.3
100		1800		1905.8		1517.7		1786.4		1624.1		1592.0
400		1550		1117.4		1270.5		1683.7		1472.1		1605.3
700		1200		1798.7		1365.6		797.9		1337.2		997.3
1000		1000		1089.5		591.6		633.4		787.8		616.8
1300		800		239.2		582.4		821.6		401.5		705.8
1600		600		1250.3		807.9		713.7		1074.1		750.0
1900		450										
2200		300										
100		150										
Objective function, Z_{o2} (cfs)				140.1		42.6		31.3		52.6		27.7
RMSE, cfs				130.8		40.4		29.1		50.3		25.1
Optimal Loss Rate Parameters					α=0.389, A=0.313		S=0.247, K=0.003		a=5.077, K=0.005 a=5.077, K=0.006		f_c=0.03, f_o=0.239 k=4.12	
Note: 1 in., 1 cfs = 0.0283 m^3/s: DRO=direct runoff ordinate: UHO=unit hydrograph ordinate												

Unver와 Mays(1984)는 비선형계획으로 Horton공식에서 최종침투율 f 는 0.03in/h로 가정하고 나머지 상수를 결정하였다 Horton 공식의 최적매개변수는 Table 5와 같으며 Kostiakov 및 Philip 공식과 마찬

가지로 목적함수(Z_{o1})가 209.1cfs으로 전체해(global optimum)의 범위가 넓었다.

Table 3, Table 4 및 Table 5에서 보는 바와 같이 Horton, Kostiakov 및 Philip 공식에 관한 모형 2의 결과는 유일한 전체해를 주었으나 모형 1에 의한 RMSE 보다 큼을 알 수 있다. Green-Ampt 공식의 상수를 시산법으로 계산한 결과는 Table 6과 같으며, 모형 1과 모형 2에 의한 최적매개변수의 값은 동일하지만 UH의 종거값은 서로 상이하다. 한편 Prasad 등 (1999)은 강우 손실량을 소수점 이하 두자리만 표기하여 본 연구의 Green-Ampt 공식에 의한 결과와 직접 비교하기는 어려웠다.

결정된 단위도와 유효우량을 이용하여 유출수문곡선의 종거를 계산한 결과는 Table 7과 같으며, 실측 유출수문곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. Table 7에서 보는 바와 같이 Φ 지표법과 Green-Ampt 공식에 의

Table 3. Loss rate parameters of Kostiakov's equation for Wills Creek

	α	A	Z_{o1}, cfs	RMSE, cfs	F_p, in.
Prasad, et al. (1999), LP	0.415	0.293	204.9	27.9	0.8217
Unver and Mays (1984), NLP	0.554	0.207	262.7	29.7	0.8200
Present study (2000), LP : M1	0.377	0.322	209.1	27.4	0.8217
〃 〃 LP : M2	0.389	0.313	42.6(Z_{o2})	40.4	0.8217
Note: 1 in.=2.54 cm; 1 cfs=0.0283 m^3/s					

Table 4. Loss rate parameters of Philip's equation for Wills Creek

	S	K	Z_{o1}, cfs	RMSE, cfs	F_p, in
Prasad, et al. (1999), LP	0.230	0.002	228.5	29.8	0.8207
Unver and Mays (1984), NLP	0.227	0.003	228.1	30.9	0.8223
Present study (2000), LP : M1	0.264	0.001	209.1	22.7	0.8217
〃 〃 LP : M2	0.247	0.003	31.3(Z_{o2})	29.1	0.8217
Note: 1 in.=2.54cm; 1 cfs=0.0283m^3/s					

Table 5. Loss rate parameters of Horton equation for Wills Creek

	fo	k	Z_{o1}, cfs	RMSE, cfs	F_p, in.
Unver and Mays (1984), NLP	0.189	0.338	235.6	28.5	0.8222
Present study (2000), LP : M1	0.212	0.336	209.1	22.5	0.8217
〃 〃 LP : M2	0.239	0.412	27.7	25.1	0.8217
Note: 1 in.=2.54 cm; 1 cfs=0.0283 m^3/s					

Table 6. Loss rate parameters of Green-Ampt's equation for Wills Creek

	a	K	Z_{o1}, cfs	RMSE, cfs	F_p, in.
Prasad, et al. (1999), LP	3.988	0.006	236.8	(50.9)*	0.85
Present study (2000), LP : M1	5.077 4.143	0.005 0.006	249.8	28.9	0.8217
〃 〃 LP : M2	5.077 4.143	0.005 0.006	52.6(Z_{o2})	50.3	0.8217
Note: 1 in.=2.54 cm, 1cfs=0.0283 m^3/s (50.9)* can not be directly compared with the result of the present study.					

Table 7. Computed DRO in cfs for Wills Creek, Cumberland, Maryland, April 4-5, 1941

Time	Observed runoff, cfs	computed direct runoff ordinate in cfs				
		Φ-index	Kostiakov's Equation	Philip's Equation	Green-Ampt's Equation	Horton's Equation
1000	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1300	150	150.0	120.8	100.8	150.0	88.8
1600	800	800.0	800.0	761.4	800.0	757.5
1900	2300	2300.0	2300.0	2300.0	2300.0	2300.0
2200	4000	4000.0	4000.0	4000.0	4000.0	4000.0
100	4950	4950.0	4950.0	4950.0	4950.0	4950.0
400	5000	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0	5000.0
700	4600	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0	4600.0
1000	4000	4000.0	4000.0	4000.0	4000.0	4000.0
1300	3450	3450.0	3450.0	3450.0	3450.0	3450.0
1600	2950	2950.0	2950.0	2950.0	2950.0	2950.0
1900	2550	2550.0	2550.0	2550.0	2550.0	2550.0
2200	2150	2150.0	2150.0	2150.0	2150.0	2150.0
100	1800	1800.0	1800.0	1800.0	1800.0	1800.0
400	1550	1550.0	1550.0	1550.0	1550.0	1550.0
700	1200	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0
1000	1000	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
1300	800	800.0	794.1	733.3	734.1	753.3
1600	600	804.0	600.0	600.0	620.3	600.0
1900	450	420.3	450.0	450.0	450.0	450.0
2200	300	141.4	196.0	245.5	205.6	241.3
100	150	15.6	80.8	150.0	80.9	150.0
rmse, cfs		62.4	27.4	22.7	28.9	22.5
Note: 1 cfs = 0.0283 m^3/s, DRO=direct runoff ordinate, UHO=unit hydrograph based on M1						

한 계산 유출수문곡선은 기저시간 후반부에서 관측 유출수문곡선과 상이하나, Horton, Kostiakov 및 Philip 공식의 경우에는 기저시간 전·후반부에서 상이함을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

강우-유출사상으로부터 유역의 단위도와 침투율을 결정하기 위하여 기존의 절대오차누계를 최소화하는 모형에 더불어 절대최대오차를 최소화하는 모형을 정립하였다. 관측된 강우-유출사상으로부터 최종누가침투량을 결정하고 매개변수를 섭동시킴으로서 오차가 가장 작은 Kostiakov, Philip, Horton 공식의 매개변수와 단위도를 결정하였다. Green-Ampt공식의 상수는 시산법을 적용하여 결정하였다. 유역평균침투능 Φ지표를 적용하면 유일한 단위도가 결정되지만, Kostiakov, Philip, Horton, Green-Ampt공식 등과 같은 각종 침투식은 매개변수에 따라 단위도의 종거와 침투율은 달라진다. 관측유출량과 계산유출량의 차인 오차를 가장 적게 하는 침투율공식은 Philip 공식과 Horton공식이었다. 즉 Philip 공식과 Horton공식은 관측 및 계산유출량 오차를 최소화하는 유효우량 분포를 제공하였다.

추계학적(stochastic) 최적화방법은 분석가능한 영역을 용이하게 탐사(search)하여 오차가 가장 적은 침

투식의 매개변수와 단위도를 결정하였으며, 이전 연구자들의 결과 보다 나은 해를 구하였다. 본 연구는 직접관측에 의한 단위도 및 침투율 공식을 결정함으로서 치수사업 수립시 복합강우사상에 적용하면 타당한 홍수수문곡선 결정에 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

한국건설기술연구원 (1993). "수문모형 평가에 관한 연구: 강우-유출모형을 중심으로." 연구보고서, 건기연 92-WR-111-2.

Mays, L. W. and Coles, S. L. (1980). "Optimization of unit hydrograph determination", *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 106, No. 1, pp. 85~97.

Mays, L. W and Taur, C. K. (1982). "Unit hydrograph via nonlinear programming.", *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 744~752.

Mawdsley J. A. and Tagg, A. F. (1981). "Identification of unit hydrographs from multi-event analysis.", *J. of Hydrology*, 49, pp. 315~327.

Ponce, V. M. (1989). Engineering Hydrology: *Principles and Practices*, Prentice Hall.

Prasad, T D., R. Gupta, and S. Prakash (1999). "Determination of optimal loss rate parameters and unit hydrograph.", J. of *Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 4, No 1, pp. 83~87.

Reklaitis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M. (1983). *Engineering Optimization*: Methods and Application, John Wiely and Sons.

Schoen, F. (1991). "Stochastic techniques for global optimization A survey of recent advances.", *J. of Global Optimization* 1, pp. 207~228.

Singh, K. P. (1976). "Unit hydrograph-A comparative study", *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 12, No., 2, p. 381.

Unver, O. and Mays L. W. (1984). "Optimal determination of loss rate functions and unit hydrograph.", *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 203~214.

(논문번호:00-017/접수 2000.03.17/심사완료:2000.04.19)