

유역을 대표하는 Horton 침투 모형내 매개변수의 최적 결정

Optimal Determination of the Parameters Representative of a Basin in the Horton's Infiltration Model

유 주 환*

Yoo, Ju Hwan

Abstract

The parameters in the Horton's model which has well known as typical infiltration model were determined by the use of the optimization technique. It was assumed the initial infiltration capacity in this model was related to the antecedent precipitation per 10 days with linear combination. And both the parameters of the ultimate infiltration capacity and the decay factor were determined uniquely on a basin. Thus the optimal model's parameters representative to a basin were obtained and the Horton's infiltration equations by rainstorm events were determined. The data of ten rainstorm events for this study were observed at the Jeonjeokbigyo station located at the Selmacheon experimental basin that was 8.5 km^2 wide in the Imjin river.

keywords : Horton infiltration model, antecedent precipitation, parameter optimization, effective precipitation

요 지

최적화 방법을 이용하여 대표적 침투 모형으로 잘 알려진 Horton 모형의 최적 매개변수를 결정하였다. Horton 침투 모형내 초기 침투능은 10일 단위 선행 강수량과 선행 조합의 관계를 갖는다고 가정하였다. 그리고 중기 침투능과 감쇄지수 값은 유역내 하나의 대표치로 결정하였다. 이렇게 하여 유역을 대표하는 모형의 매개변수 최적치를 얻었고 호우 사상별로 Horton의 침투식을 결정하였다. 본 연구에서 적용한 10개의 호우 자료는 임진강 내에 있고 배수 면적이 8.5 km^2 되는 설마천 시험 유역내 전적비교 지점에서 관측된 것이다.

핵심용어 : Horton 침투모형, 선행강수량, 매개변수 최적화, 유효강수량

1. 서 론

유출 모형의 성공을 좌우할 수 있는 중요한 요소 중 하나는 강수 손실량(precipitation loss)을 결정하는 것이다. 손실량은 홍수 예측이나 수자원 평가를 위한 유출 모형의 주요 입력 자료가 된다. 만족할 만한 유출 모형을 구현하기 위해서는 손실량의 정확한 평가가 요

구된다(Najafi, 2003). 총 강수량 중에서 손실량을 뺀 초과 강수량 또는 유효 강수량은 치수적 측면이든 이수적 측면에서 요구되는 직접 유출량(direct runoffs)에 상당하는 규모로서 유출 모형에서 매우 중요하다. 이제 까지 직접 유출되는 유효 강수량은 많은 경우에 총강수량에서 주요 손실 성분인 침투량을 차감하여 산출하여 왔다. 이 때 침투량은 호우사상별로 적게는 유출량의

* 영동대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Youngdong Univ., Chungbuk, Korea 370-701

(e-mail: jhyoo@youngdong.ac.kr)

30%에서 많게는 100%까지 차지할 만큼 주요한 손실 성분으로 취급되었다(Chow, 1964 ; Singh, 1989). 침투량을 산정하기 위한 기존 침투모형은 크게 물리적 모형과 경험적 모형으로 다양하게 정립되어 왔다(Singh, 1989). 그러나 각 모형내 포함되는 매개변수 값은 실용적으로 잘 정립되지 않았기 때문에 유출 모형에 실제 적용하는데 어려움이 있다.

한편 침투량 산정 모형 중에 Horton 모형은 가장 잘 알려져 있는 모형 중 하나이다(Horton, 1939, 1940). Blake et al.(1968)은 실험 자료를 가지고 최소자승법을 이용하여 Horton 매개변수를 결정하였고 Rawls et al.(1976)은 특정 지역의 몇몇 토사별로 Horton의 매개변수를 제시하기도 하였으나 이 모형 역시 적합한 매개변수 값을 결정해서 사용해야 하는 실용상의 어려운 점을 가지고 있다(Singh,1989). 이와 같은 상황에서 국내에서도 조홍제(1986)는 홍수유출을 해석하기 위해서 Horton의 침투곡선과 지표법을 이용한 유효우량을 산정한 바 있고 남선우와 최은호(1990)는 수정 Green-Ampt 모형으로부터 침투율과 초과우량을 산정하였고 정성원과 김승(1991)은 시험유역의 유출 분석을 위해서 Green-Ampt 방정식의 매개변수 추정치를 적용한 사례가 있다. 안태진 등(2000)은 유역의 단위도와 침투율을 결정하기 위해서 선형계획 모형을 적용하고 Kostiaikov, Philip, Horton 공식의 매개변수를 섭동시켜서 계산한 바 있고, 최근 박해남과 조원철(2002)은 개념적 모형에 다양한 초기 함수량 조건을 포함하는 침투 모형을 제시한 바 있다. 하지만 대표적인 침투 모형인 Horton 모형내 매개변수의 유역 대표치를 결정하는 방법론을 제시하고 정립하는 연구가 아직 미흡한 형편이다.

이에 본 연구에서는 유효 강수량을 산출하는데 적용

가능한 Horton 침투 모형내 매개변수의 유역 대표치를 결정하기 위해서 여러 개의 강수-유출 자료를 적용하여 비선형적으로 최적화하는 모형을 제시하였다.

Horton(1940)이 제시한 대로 침투능(infiltration capacity, f)은 소모 과정(exhaustion process)을 따르는 것으로 가정하여 미분방정식 (1)로 나타내었다.

$$\frac{df}{dt} = -k(f - f_c) \quad (1)$$

여기서 f_c 는 장기 침투능을 나타내고 k 는 비례 상수로서 침투능이 시간에 따라 점감되는 정도를 나타내는 감쇄지수를 나타낸다. 이때 t 는 시간축이다. Eq. (1)은 침투능의 초기 조건($t=0, f=f_0$)을 적용하여 미분방정식을 풀면 다음 Eq. (2)가 된다. Eq. (2)의 f 은 침투능(mm/hr)으로서 Fig. 1(a)와 같이 세로축 절편값이 f_0 이고 시간축이 증가할수록 f_c 에 접근하는 함수 형태를 갖는다.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

이때 초기 침투능 f_0 (mm/hr)는 초기 토양 함수량에 좌우되기 때문에 이를 반영하기 위해서 Eq. (3)과 같이 선행 강수량과 선행 조합 관계를 갖는다고 가정하였다.

$$f_0 = A_0 + A_1P(1) + A_2P(2) + \dots + A_iP(i) \quad (3)$$

여기서, A_0 은 식의 세로축 절편값(mm/hr)이 되고 A_i 는 i 기간 전 선행 강수 상관계수(10 days/hr; $i = 1, 2, \dots, I$)이고 $P(i)$ 는 i 기간에 선행된 강수량(mm/10 days)이 된다. 이 때 i 는 선행 강수량의 시간 단위이다.

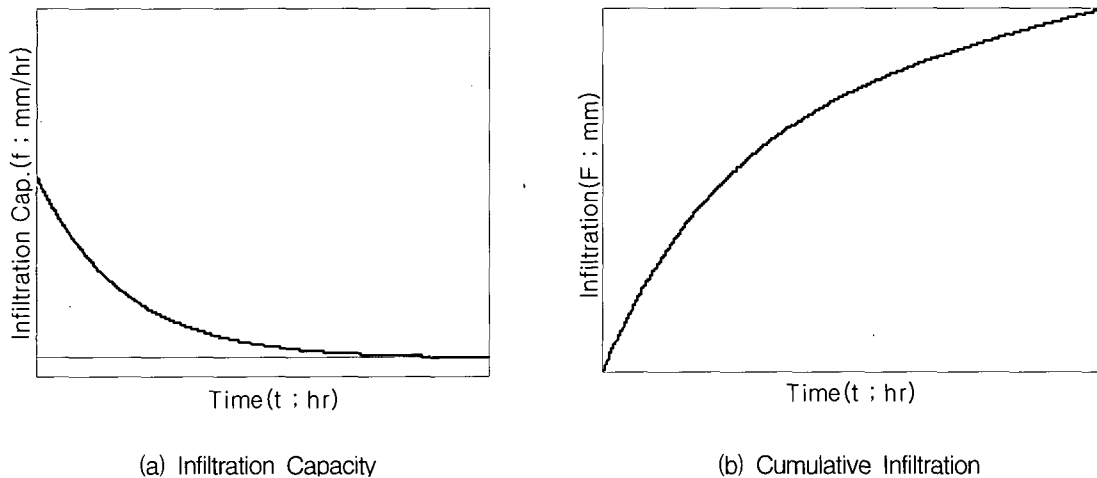


Fig. 1. Horton's Infiltration Function

그리고 Eq. (4)와 같이 침투능의 시간적 누계량 F 는 시간에 따른 침투 총량이 되고 Eq. (5)는 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 시간에 따라 증가하는 함수가 된다.

$$F = \int f dt \quad (4)$$

$$F = f_c t + \frac{1}{k} (f_0 - f_c) (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

기존 연구 결과(Rawls et al., 1976)에서는 토사의 종류에 따라 f_0 , f_c , k 값이 변동되었지만 본 연구에서는 적용하는 시험 유역의 토질을 포함하는 유역의 특성이 변하지 않는다고 가정하였다. 즉 f_0 는 선행강수, 유역 특성 등에 따라 호우별로 다른 값을 가지고 f_c 와 k 값은 하나의 유역에서 유일한 값을 갖는 것으로 가정하였다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 선행 강수에 따른 영향을 고려하는 Horton 침투 모형의 매개변수 등을 최적화 기법을 이용하여 유역을 대표하는 값이 되도록 결정하는 모형을 제시하였다.

2. 연구 모형

2.1. 최적화 모형

2.1.1 목적함수

호우사상 i 의 총 강수량에서 직접 유출량을 빼서 산출한 침투 손실량을 관측치 \hat{F}_i 라 하고 Eq. (5)로부터 계산한 침투량 계산치를 F_i 라 하면 관측치와 계산치 두 값의 차를 제공하여 호우 전체 사상에 대하여 누계한 총량, 즉 잔차 제곱을 전체 누계하여 1/2를 곱한 것을 목적함수(objective function) Z 로 하였고 이를 최소화하도록 Eqs. (6)~(10)과 같이 정식화하였다.

$$\text{Min}_{\alpha, A} Z = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (F_i - \hat{F}_i)^2 \quad (6)$$

$$\text{Subjetto } F_i = f_c t_i + \frac{(f_0^i - f_c)}{k} (1 - e^{-kt_i}) \quad (7)$$

$$f_0^i = A_0 + A_1 P^i(1) \quad (8)$$

$$\alpha = [k, f_c] \quad (9)$$

$$A = [A_0, A_1] \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

여기서 t_i 는 시간축이고 $P^i(j)$ 는 i 호우사상에서 j 단위 시간 전 선행 강수량으로서 단위 시간은 10일간으로 하였다. 그리고 α 는 Eq. (9)와 같이 침투 감쇄지수 k 와 최종 침투량 f_c 의 2개 매개변수 성분을 갖는 결정 벡터이고 A 는 선행 강수의 상관계수로서 2개 성분의 결정 벡터이다. 이때 i 는 호우사상 번호이고 n 은 호우사상의 총수이다.

2.1.2 최적 조건

목적함수 Eq. (6)을 최소화할 수 있는 미지 벡터 α 와 A 를 결정하기 위한 필요조건을 Eq. (11)과 Eq. (12)와 같다.

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial A} = 0 \quad (12)$$

Eq. (11)에 대한 벡터 α 의 성분별 편미분은 다음 Eq. (13)과 Eq. (14)와 같고 이 식들은 모형에 적용하는 최급 경사법의 경사 값을 구하는데 이용된다.

$$\frac{\partial Z}{\partial k} = \sum_{i=1}^n [F_i - \hat{F}_i] \cdot \left[\left(\frac{t_i}{k} + \frac{1}{k^2} \right) e^{-kt_i} - \frac{1}{k^2} \right] \times [A_0 + A_1 P^i(1) - f_c] \quad (13)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial f_c} = \sum_{i=1}^n [F_i - \hat{F}_i] \cdot \left[t_i - \frac{1}{k} (1 - e^{-kt_i}) \right] \quad (14)$$

그리고 Eq. (12)를 만족시키는 필요조건은 Eq. (15)의 연립조건이다.

$$F_i = \hat{F}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Eq. (15)는 다음 Eq. (16)으로 나타낼 수 있다.

$$A_0 + A_1 P^i(1) = (\hat{F}_i - B^i) / C^i + f_c \quad (16)$$

여기서 B^i 와 C^i 는 Eq. (17)과 Eq. (18)과 같다.

$$B^i = f_c t_i \quad (17)$$

$$C^i = \frac{1}{k}(1 - e^{-kt_i}) \quad (18)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

Eq. (16)을 행렬식으로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} 1 & P^1(1) \\ 1 & P^2(1) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & P^n(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\hat{F}_1 - B^1)/C^1 + f_c \\ (\hat{F}_2 - B^2)/C^2 + f_c \\ \vdots \\ (\hat{F}_n - B^n)/C^n + f_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

또는

$$[P] [A] = [F] \quad (20)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $[P]$ 는 선행 강수 행렬이고 $[A]$ 는 선행 강수의 상관계수로 미지 벡터이고 $[F]$ 는 Eq. (16)의 우변항을 나타내는 벡터이다.

2.1.3 해법

비선형(Nonlinearity)을 갖는 목적함수를 최소화하여 매개변수를 결정하기 위해서 최급 경사법(steepest gradient method)을 적용하였다. 여기서 결정 매개변수는 시간에 따라 변하는 침투능 함수의 감쇄 지수 k 와 최종 침투능이 되는 f_c 을 성분으로 한 2차원 벡터로 하였다. 그리고 초기 침투능(f_0)는 Eq. (8)에서 정식화한 바와 같이 선행 강수의 상관계수(A_0, A_1)의 선형 조합으로 하였다.

최급 경사법에 의하여 최적화 할 조사(search) 벡터, 즉 결정 벡터는 다음 Eq. (21)과 같다.

$$\alpha = \begin{bmatrix} k \\ f_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

목적함수를 최소화하기 위한 경사법은 다음과 같은 조사 단계를 갖는다.

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j - \lambda \cdot \nabla_{\alpha} Z \quad (22)$$

$$\nabla_{\alpha} Z = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z}{\partial k} \\ \frac{\partial Z}{\partial f_c} \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 λ 는 조사 길이(step size)이고 j 는 최급 경사법에 의한 조사 단계이다. 이때 α 의 조사 초기 벡터 α_0 는 Eq. (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_0 = \begin{bmatrix} k_0 \\ f_{c0} \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 성분 k_0 는 k 의 조사 초기값이고 f_{c0} 는 f_c 의 조사 초기치이다. 벡터 α 와 A 의 최적치를 결정하기 위한 최급 경사법은 Fig. 2와 같은 계산과정을 갖는다.

2.2 입력자료

2.2.1 유역 선택

본 연구를 위한 연구 자료는 계속적으로 측정 관리되는 유역의 자료를 선정하였다. 한강권역내 속해 있는 임진강의 하구로부터 상류 방향으로 약 46 km 지점에 있는 설마천에 설치 운영되고 있는 시험 유역의 전적비교 관측소 지점 유역(Fig. 3)을 택하였다. 선택 지점은 동경 126° 55' 54" ~ 126° 54' 57", 북위 37° 54' 57" ~ 37° 56' 23" 에 위치하고 유역면적이 8.5 km²이고 유로 연장이 5.8 km 정도 되는 미개발 지대로서 대부분이 산림지대이고 약간의 전답이 있는 형편이다. 그리고 유역의 지질은 선캠브리아기에 조성된 경기편마암 복합체로 구성되어 있다. 유역의 남부에는 주로 호상의 엽리를 보이는 편마암이 우세하고 북부는 안구상 편마암이 발달되어 있고 곳에 따라 재결정된 규암과 변성 관입암류가 관찰된다. 유역에 분포한 편마암은 화강암에서 기원하여 근본적으로 불투수층에 분류되나 절리가 비교적 많이 발달하고 엽리의 발달이 강하여 지하수 함유가 가능하다. 그리고 유역의 임상은 아교목 또는 관목 상태의 활엽수림과 혼효림이 대부분을 차지하고 계곡 근처의 사면 하부에 국소적으로 일본 잎갈나무와 잣나무가 식재되어 있지만 산림의 총상 구조가 발달되어 있지 않아 수원의 함양 능력이 작다. 한편, 25,000 축척의 정밀 토양도를 확인한 결과 하천 주위를 따라서 약간 조사되어 있을 뿐 전체적인 토양도가 구분되어 있지 않고 있다. 따라서 엄밀한 토양도 구분은 아니지만 대체적인 토양 특성으로서 SCS의 분류에 의하면 전체 시험유역의 3.3%를 차지하는 전답 중에 B형의 토양은 85.7%이고 나머지 14.3%는 C 토양형으로 구분되고 96.7%를 차지하는 산림 지역내 토양의 경우 B형, C형, D형 토양이 각각 16.0%, 70.7%, 3.45%를 차지하고 있다. 이와 같은 지질 및 토양의 특성상 적은 강우나 초기의 강우에는 하천 수위가 큰 변화를 보이지 않다가 엽리, 단층, 절리 등에 의한 지하수 함유 능력을 초과하면

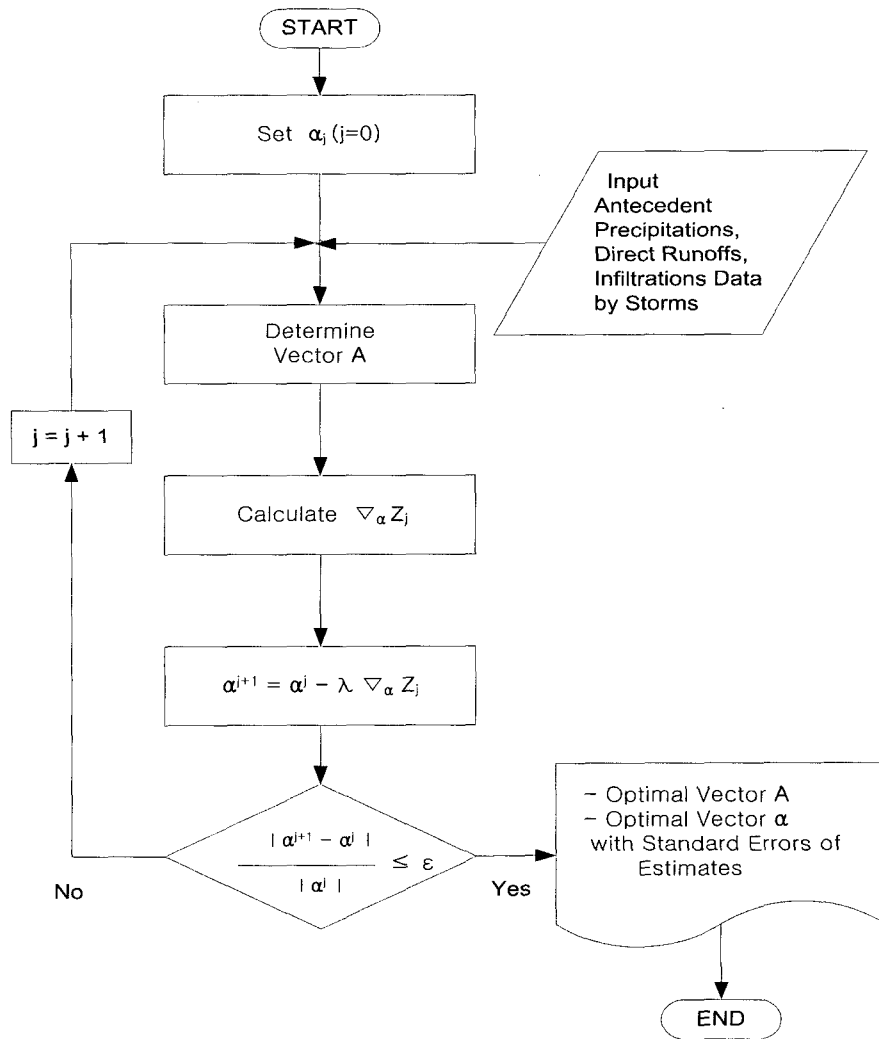


Fig. 2. Flow Chart of the Optimization

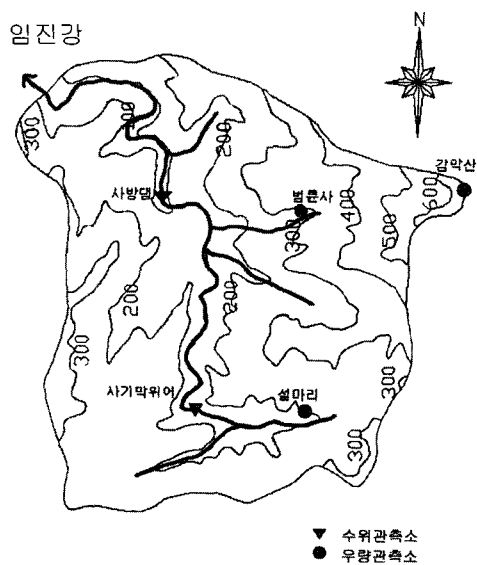


Fig. 3. Jeonjeokbibyo basin in the Selmacheon

급격하게 수위가 증가하는 특성을 보인다(한국건설기술연구원, 1996).

2.2.2 강우-유출 자료

시험 유역의 강수량은 관리 기관(한국건설기술연구원)이 측정하여 산출한 시간별 면적 평균 강수량이다. 이 강우 자료로부터 10일 단위 선행 강수량을 산출하였고 호우사상별 시간 자료도 구하였다. 그리고 유출 자료는 관리 기관이 작성한 수위-유량 곡선으로부터 얻어진 시간별 유출 수문 곡선 자료를 이용하였다. 본 연구에 사용되는 호우 사상은 Table 1과 같이 총 10개를 선정하였다.

2.2.3 초과 강수량과 손실량

호우 사상별 직접 유출량은 각각의 유출 수문 곡선에서 수평직선 분리 방법을 이용하여 산출하였고 이 때

Table 1. Storms Events Used in the Study

| No. | Start Date | Rainfall Duration(hr) | Runoff Duration (hr) |
|-----|------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 98.3.19 | 11 | 355 |
| 2 | 98.9.20 | 19 | 340 |
| 3 | 99.3.18 | 13 | 362 |
| 4 | 00.7.22 | 13 | 366 |
| 5 | 00.9.15 | 46 | 276 |
| 6 | 01.6.29 | 28 | 208 |
| 7 | 01.7.5 | 8 | 60 |
| 8 | 01.7.14 | 14 | 154 |
| 9 | 02.4.29 | 27 | 382 |
| 10 | 02.7.19 | 14 | 132 |

Table 2. Precipitation and Infiltration Loss by Storm Events

| No. | Rainfall (mm) | Precipitation Excess(mm) | Infiltration Loss (mm) |
|-----|---------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 22.90 | 10.81 | 12.09 |
| 2 | 104.10 | 81.71 | 22.39 |
| 3 | 39.00 | 9.63 | 29.37 |
| 4 | 61.90 | 30.98 | 30.92 |
| 5 | 181.70 | 151.04 | 30.66 |
| 6 | 127.50 | 86.23 | 41.27 |
| 7 | 49.30 | 37.41 | 11.89 |
| 8 | 126.20 | 111.62 | 14.58 |
| 9 | 94.00 | 71.45 | 22.55 |
| 10 | 70.80 | 40.63 | 30.17 |

호우 사상별 총 손실량은 총 강수량에서 직접 유출량에 상당하는 초과 강수량을 빼서 산출하였다. 산출한 결과, 총강수량(rainfall), 초과강수량(precipitation excess), 침투 손실량(infiltration loss)은 Table 2와 같다. 여기서 침투 손실량은 침투 누계량으로 하였다.

2.2.4 선행 강수량

선행 강수량은 호우 사상이 발생하기 전의 강수량으로서 초기 침투 산출에 입력 자료가 된다. 선행 강수량의 단위 기간은 국내에서 통용되는 순(10일) 단위로 하였다. 본 연구에서는 초기 침투능과 10일전 선행 강수량과의 상관성을 고려하였다. 이때 10일전 선행된 강수

총량인 $P(1)$ 은 Table 3과 같다.

2.2.5 최적화 입력 자료

본 연구에서 적용한 최급 경사법에 적용한 최적화 입력 조건을 요약하면 Table 4와 같다.

3. 주요 결과 및 검토

3.1 최적 매개변수 결과

침투 모형내 매개변수(parameters)인 결정 벡터 a 가 조사 단계에서 변동률이 10^{-6} 일 때 수렴시킨 최적화 결과는 Table 5와 같다.

Table 3. Antecedent Precipitation by Storm Events

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|------|-----|------|
| Rainfall(mm/10day) $P(1)$ | 2.2 | 0.4 | 0.0 | 31.0 | 10.3 | 17.8 | 153.8 | 84.9 | 0.0 | 36.6 |

Table 4. Input Condition for the Optimization

| Sign | k_0 | f_{c0} | λ | ϵ |
|------------|-------|----------|-----------|------------|
| Input Data | 0.5 | 0.5 | 10^{-6} | 10^{-6} |

Table 5. Optimized Parameters

| Element | k | f_c |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Optimized Value | 6.39×10^{-2} | 3.61×10^{-1} |

초기 침투능 f_0 는 선행 강수량에 따라 결정되는데 10개 호우사상을 적용한 최적화 결과 Eq. (25)와 같이 나타났다. 이 때 계산상의 표준개산오차(standard error of estimate) 값은 0.92 mm 만큼의 분산을 보여 주었다.

$$f_0 = 1.93 - 0.00129 P(1) \quad (25)$$

Eq. (25)로부터 산출된 호우사상별 초기 침투능(f_0)는 Table 6과 같다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 좌표축 상에서 0.129% 음의 기울기를 갖는다. 이때 선행강수가 없을 경우에 초기 침투능은 1.93 mm/hr 이었다. Fig. 4의 그래프 상에서 10일전 선행 강수량 $P(1)$ 이 주어지면 f_0 값을 구할 수 있다. f_0 값은 1.73~1.93 범위에서 결정되었고 이 때 10일 강수량의 정의역은 0 ~ 160 mm 구간 안 쪽이다.

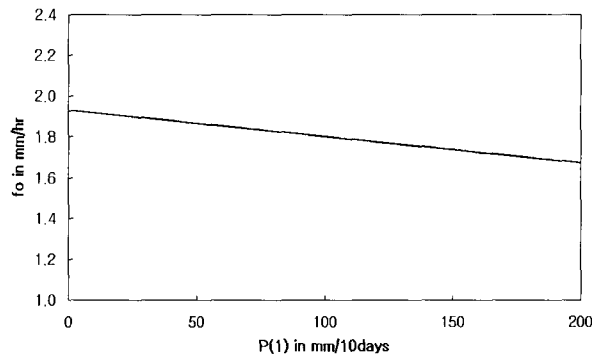


Fig. 4. Relation Initial Infiltration Capacity and Antecedent Precipitation

3.2 최적 매개변수에 의한 침투량 산출 결과

호우사상별 침투능과 누계 침투량은 Eq. (2)와 Eq. (5)에 의하여 결정된다. 최적화 모형으로부터 계산한 침투량 계산치와 강우-유출 자료로부터 산출된 침투 관측치는 Table 7과 같다. 여기서 계산치와 관측치가 작게는 4 % 에서 많게는 40 % 정도 차이를 보이는 것은 계산된 매개변수들이 여러 호우들에 대하여 대표값으로 최적화된 특성 때문이다.

3.3 호우별 침투능 함수 결과

호우별로 침투능 곡선들은 Fig. 5와 같이 초기 침투능이 대략 1.7 ~ 2.0 mm/hr 정도에서 변동되어 나타났고 100시간 정도 이후에 모두가 종기 침투능 0.36 mm/hr에 접근됨을 보여 준다. 이때 초기 침투능은 선행 강우나 유역 상태 등에 좌우된다.

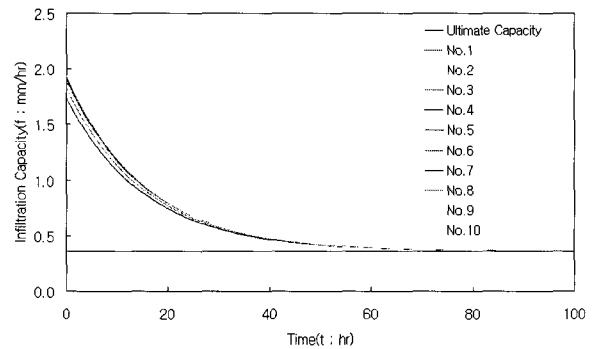


Fig. 5. Horton's Infiltration Capacity with Optimal Parameters by Storm Events

Table 6. Initial Infiltration Capacity by Storm Events

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| f_0 (mm) | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.89 | 1.92 | 1.91 | 1.73 | 1.82 | 1.93 | 1.88 |

Table 7. Cumulative Infiltration by Storm Events

| No. | Observation (M, mm) | Calculation (N, mm) | Relative Error ($ M-N \times 100/M$, %) |
|-----|------------------------|------------------------|---|
| 1 | 12.09 | 16.34 | 35.2 |
| 2 | 22.39 | 24.11 | 7.7 |
| 3 | 29.37 | 18.55 | 36.8 |
| 4 | 30.92 | 18.19 | 41.2 |
| 5 | 30.66 | 39.65 | 29.3 |
| 6 | 41.27 | 30.26 | 26.7 |
| 7 | 11.89 | 11.47 | 3.5 |
| 8 | 14.58 | 18.56 | 27.3 |
| 9 | 22.55 | 29.92 | 32.7 |
| 10 | 30.17 | 19.13 | 36.6 |

4. 결 론

본 연구에서 제시한 유역을 대표하는 Horton 침투 모형내 매개변수의 최적 결정에 관한 결론은 요약하면 다음과 같다.

- 1) 침투 모형내 매개변수를 최적 결정하기 위한 목적 함수는 침투 손실량 관측치와 계산치의 잔차 제곱의 합계를 최소화하도록 정식화하였다.
- 2) 최급 경사법을 적용하여 얻은 최적 결정변수인 감쇄지수와 종기 침투능은 결정변수 변동률 10^{-6} 에서 수렴된 각각 0.0639와 0.361 mm/hr이었다.
- 3) 초기 침투능은 1순(10일) 전 강수량과 선형 조합 관계로 보고 관계식을 결정하였다. 여기서 초기 침투능은 강우가 없을 경우 1.93 mm/hr 이었고 10일전 선형 강수량의 증가에 대하여 0.129% 감소 경향을 갖는다. 한편 호우사상별 초기 침투능은 1.7 ~ 2.0 mm/hr 범위에서 다르게 나타났지만 100 시간이 지나면 종기 침투능 0.36 mm/hr에 접근됨을 보여 주었다.
- 4) 본 연구 결과는 임진강의 설마천내 위치한 유역면적이 8.5 km^2 정도 되는 시험유역의 호우사상 10개를 택하여 적용한 결과로서 적용 자료의 관측 신뢰도는 본 연구 결과의 신뢰도에 직접적인 영향을 줄 수 있다.

참 고 문 헌

남선우, 최은호 (1990). "산지유역의 초과우량 추정 모형." *수공학논총*, 제32권, pp. 49-52.

박해님, 조원철 (2002). "초기함수량을 고려한 침투모형의 유도." *한국수자원학회논문집*, 제35권, 제3호, pp. 285-294.

안태진, 류희정, 정광근, 심명필 (2000). "단순 강우-유

출 사상으로부터 최적단위도와 침투율의 결정." *한국수자원학회논문집*, 제33권, 제3호, pp. 365-374.

정성원, 김승 (1991). "Green-Ampt방법에 의한 침투모형." *수공학논총*, 제33권, pp. 144-155.

조홍제 (1986). "소유역의 홍수 도달시간과 사면길이의 분포특성을 고려한 홍수유출해석." *한국수문학회지*, 제19권, 제2호, pp. 139-148.

한국건설기술연구원 (1996). *시험유역의 운영 및 수문 특성 조사·연구보고서*, 1996년 설마천 시험유역.

Blake, G.J., Mallinson, G.D., and Lykles, S. (1968). "Infiltration in the Puketurua experimental basin." *Journal of Hydrology(N.Z.)*, Vol.7, No.1, pp. 38-46.

Chow, V.T. ed. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill.

Horton, R.E. (1939). "Analysis of runoff-plat experiment with varying infiltration capacity." *Transactions of the American Geophysical Union* 20, pp. 693-711.

Horton, R.E. (1940). "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.5, pp. 399-417.

Najafi, M. R. (2003). "Watershed modeling of rainfall excess transformation into runoff." *Journal of Hydrology*, Vol.270, pp. 273-281.

Rawls, W., Yates, P. and Asmussen, L. (1976). *Calibration of selected infiltration equations for the Georgia Coastal Plain*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-S-113, Washington. D.C.

Singh, V. P. (1989). *Hydrologic Systems, Watershed Modeling Vol. II*, Prentice-Hall.

(논문번호:05-150/접수:2005.11.30/심사완료:2006.10.25)