

## 유전자 알고리즘을 이용한 유출모형의 매개변수 추정

조 현 경 · 이 영 화\*

영남이공대학 토목과 · \*대구한의대학교 토목도시디자인학부

(2003년 7월 14일 접수; 2003년 10월 15일 채택)

### Parameter Estimation of Runoff Model Using the Genetic Algorithm

Hyeon-Kyeong Cho and Yeong-Hwa Lee\*

Department of Civil Engineering, Yeungnam College of Science & Technology, Daegu 705-703, Korea

\*Department of Civil Engineering, Daegu Hanny Univ., Gyeongsan 712-230, Korea

(Manuscript received 14 July, 2003 ; accepted 15 October, 2003)

The genetic algorithm is investigated for parameters estimation of SED (storage - effective drainage) model from the Wi-stream watershed in Nakdong river basin. In the practical application of model, as a number of watershed parameters do not measure directly, it is desirable to make a good estimation from the known rainfall and runoff data. For the estimation of parameters of the SED model using the genetic algorithm, parameters of Green-Ampt equation( $SM$ ,  $K_s$ ) for the estimation of an effective rainfall and initial storage( $y_{in}$ ) used in SED model are obtained a regression equation with 5, 10, 20 days antecedent precipitation. And as a consequence of computation, the parameters were obtained to satisfy the proposed objective function.

From the comparison of observed and computed hydrographs, it shows a good agreement in the shape and the rising limb, peak, falling limb of hydrograph, so the SED model using the genetic algorithm shows a suitable model for runoff analysis in river basin.

Key words : Genetic algorithm, Parameter estimation, SED model

#### 1. 서 론

현재 하천유역에서의 강우-유출 관계를 설명하기 위해 여러 가지 모형들이 개발되어 이용되고 있다. 이 모형들이 하천유역의 강우-유출 과정을 잘 설명하기 위해서는 분석유역에 대한 매개변수의 최적추정 작업이 선행되어야 한다. 매개변수 추정이 모의결과에 미치는 영향은 지대한 것이며, 모형의 사용 자체를 결정하는 주된 인자이므로 지금까지 많은 이론과 기법들이 연구되고 소개되어 왔다. 매개변수 추정방법 중에서 가장 간단하고 많이 연구된 방법으로 목적함수 최소화법(Objective Function Minimization)이 있는데, Ibbitt와 O'Donnell<sup>1)</sup>, Johnston과 Pilgrim<sup>2)</sup>을 비롯하여 많은 연구자들이 이에 대해 연구한 바 있다.

목적함수 최소화법에 의해 매개변수를 추정하려면 반복계산에 의한 수치기법이 필요하고 이러한 기법들에 대한 연구가 Ibbitt<sup>3)</sup>, Bard<sup>4)</sup>, Beck과 Arnold<sup>5)</sup> 등에 의해 수행되었다. 수치기법에 의해 최적 매개변수를 결정하는 방법에는 두 가지 방법이 있는데 하나는 단순히 시행을 반복하여 값을 결정하는 시행착오법(Trial and Error Method)이며, 다른 하나는 선형, 비선형계획법 등 최적화 기법에 의한 자동추정법(Automatic Calibration)이다.

그러나 이 방법들은 여러 가지 단점 때문에 매개변수 추정에 많은 불확실성을 내포하고 있어서 모형의 계산결과와 실측자료가 일치하지 않는 경향이 많았다. 그래서 결과에 영향을 미치는 불확실성을 제거하기 위한 노력의 일환으로 최근 공학분야에서 많이 이용되고 있는 최신 정보이론인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 유출모형의 매개변수 추정에 적용하려는 시도가 있어 왔다. 이에 대한 국내의 연구성과로는 Wang<sup>6)</sup>이 개념적인 강우-유출

Corresponding Author : Hyeon-Kyeong Cho, Department of Civil Engineering, Yeungnam College of Science & Technology, Daegu 705-703, Korea  
Phone : +82-53-650-9316  
E-mail : chohk@ync.ac.kr

모형의 보정에 유전자 알고리즘을 이용한 바 있고, 박봉진 등<sup>7)</sup>이 유전자 알고리즘을 이용한 저류함수 모형의 매개변수 추정에 관해 연구한 바 있으며, 이길성과 김상욱<sup>8)</sup>이 SSARR모형의 보정에 유전자 알고리즘을 이용한 바 있다.

본 연구에서는 대상 모형으로 강우-유출과정에 있어서 유역의 토양습윤상태가 선행수문사상에 따라 동적거동을 하는 것으로 취급하여 강우-유출 과정의 알고리즘을 확립한 SED모형<sup>9)</sup>을 선정하였다. 그리고 과거의 수문사상으로부터 대상유역에 대한 모형 매개변수의 최적화 작업을 선행하여 수행함으로써 SED모형을 실제 호우사상에 적용하는 최적의 방법을 확립코자 하였다.

## 2. SED모형의 이론

### 2.1. SED모형의 개요

어떤 유역에서 강우-유출관계는 동적과정인면서 비선형성을 내포하고 있기 때문에 유출은 저류상태의 연속적인 변화에 의해서 발생되고 이는 유역의 배수상태에 영향을 준다. SED모형은 확정론적 모형으로써 임의의 시간과 지점에서 주어진 입력자료로부터 유역의 저류상태와 유역반응 사이의 관계를 이용하는 모형이다. 이를 위하여 SED모형은 대상유역의 저류상태를 나타내는  $\phi$ 곡선과 SED곡선(Fig. 1)을 제시하였다. 이를 수식화하면 다음 식(1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = x \cdot y = \frac{\alpha \cdot y}{(1 + \beta \cdot e^{\gamma \cdot y})} \quad (1)$$

$$x = \frac{\alpha}{(1 + \beta \cdot e^{\gamma \cdot y})} \quad (2)$$

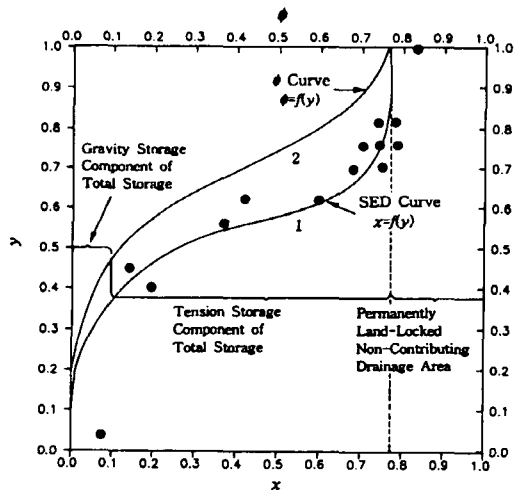


Fig. 1. SED curve and  $\phi$  curve<sup>9)</sup>.

여기서,  $\phi$ 는 유출계수,  $x$ 는 배수면적,  $y$ 는 저류고,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 상수이다. 따라서 좌표  $x, y$ 를 가지는 점들에 대해서 최소자승법을 이용하여 곡선식의 상수인  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 값을 구할 수 있으며, 이 상수들에 의해서 대상유역에 대한 곡선의 형태가 정해진다.

한편 수문곡선은 시간에 따라 분포된 유출량임으로 강우량과 초기저류고  $y_{in}$ 이 주어진다면 임의의 시간에 대한 유출량은  $R = \phi \cdot P$ 일 때, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{\phi \cdot \Delta P}{\Delta T} \quad (3)$$

$$Q_i = \phi_i \cdot P_i \quad (4)$$

여기서,  $Q_i$ 와  $P_i$ 는 각각 임의의 시간에서의 유출량과 강우량이다.

분석유역에서 각 입력 및 출력의 관계는 Fig. 2와 같이 수문곡선의 상승부(첨자  $v$ 로 나타냄)와 하강부(첨자  $w$ 로 나타냄)로 구성되는 동적 수문순환과정으로 나타낼 수 있다. 이러한 입력 및 출력 관계는 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_3} Q_i dt = \int_{t_1}^{t_2} \phi_i P_i dt + \int_{t_2}^{t_3} \phi_i P_i dt \quad (5)$$

여기서, 지체시간  $t_1$ , 침투시간  $T_0$ 와 강우시작시간  $t_0$ 에서의 초기저류고  $y_{in}$ 을 알고 있으면, 유출량은 식(5)에 의해서 계산할 수 있다. 또한 수문곡선이 두 부분  $R_v$ 와  $R_w$  대신에 각 구간  $n$ 의  $\Delta R_{vi}$ 와  $\Delta R_{wi}$ 로 분할된다면 더 높은 정확도를 가지고 재구성될 수 있다.

어떤 수문곡선에서 상승부에서의 각 구간의 유출량은  $Q_{vi} = \Delta R_{vi} / \Delta t_{vi}$ 이고 하강부에서의 유출량은  $Q_{wi} = \Delta R_{wi} / \Delta t_{wi}$ 가 되므로 유출수문곡선은 각 시간  $\Delta t_{vi}$ 에서 대응하는 값으로 정의될 수 있다. 이 관계는 다

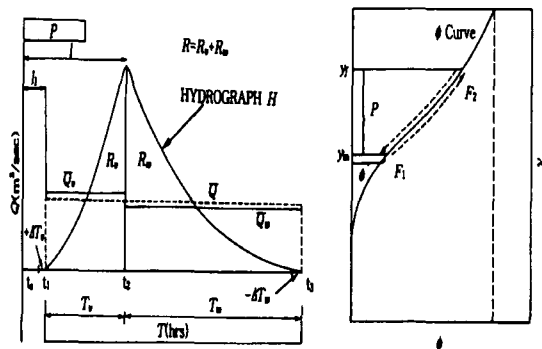


Fig. 2. Hydrograph  $H$  as a function of  $P, y_{in}$  and  $\phi$  curve<sup>9)</sup>.

음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{vi} = \frac{a \cdot \Delta R_i}{\Delta t_{vi}} = \frac{b \cdot \Delta R_i}{\Delta t_{wi}} \quad (6)$$

식(1)과 (2)의 상수  $a, \beta, \gamma$ 가 구해지면, 시간  $t_i$ 에서 어떤 지점에 대하여 초기저류고  $y_m$ 이 결정될 수 있다. 즉, 시간  $t_i$ 에서의  $y_i$ 는 다음 식(7)에 의해 시간  $t_0$ 에서의  $y_m$ 으로부터 계산된다.

$$y_i = y_{i_0} + \frac{(\sum P_{T_i} - \sum R_{T_i} - \sum E_{T_i})}{S_{max}} \quad (7)$$

### 2.2. 초과강우량의 산정

본 연구에서 초과강우량은 Darcy법칙을 응용한 물리적인 침투모델인 Green-Ampt 방법을 이용하였으며, 그 관계식은 다음과 같다<sup>10-12)</sup>

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s + \frac{SM \cdot K_s}{F} \quad (8)$$

여기서,  $f$ 는 침투율,  $F$ 는 누기침투량,  $SM$ 은 초기 토양습윤상태를 나타내는 지수,  $K_s$ 는 수리전도도이다.

## 3. 유전자 알고리즘의 이론

### 3.1. 유전자 알고리즘의 개요

유전자 알고리즘이란 자연계의 진화현상인 유전적 진화와 적자생존이라는 개념을 모델링한 최적화 탐색방법이다. 다윈의 진화론에 의하면 집단내 개체는 주위환경에 적합한 형질을 가질수록 생존할 확률이 높고 교배와 돌연변이를 통해 더 나은 방향으로 진화하며, 부적합한 형질을 가질수록 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다고 한다.

유전자 알고리즘의 최적해를 찾기 위한 탐색의 원리는 자연계의 진화를 지배하는 적자생존의 원리와 유전자의 교환에 의한 세대교체 및 진화의 과정을 통해 이루어지며, 적자생존을 구현하기 위하여 최적화 목표함수값을 해석하고 우수한 부모 해를 보존시키고, 우수한 부모들간의 재조합으로 자손 해를 생성한다. 이처럼 세대교체가 이루어질 때 적자생존의 원리는 확률적 이론에 입각한 차등적인 참여 기회를 부여한다.

유전자 알고리즘에서는 각각의 해를 하나의 개체(Population)로 보고 이들의 집합을 개체군 또는 개체 집단이라고 하며, 하나의 개체는 한 개 또는 여러 개의 염색체(Chromosome)로 구성되어 진다. 이들 염색체를 변형하여 좀더 갱신된 개체집단을 생성하는 역할을 하는 연산자들을 유전연산자(Genetic Operators)라 한다.

### 3.2 유전자 알고리즘의 연산자

유전자 알고리즘은 다음과 같은 연산자들을 이용하여 최적화 문제에서 전역적인 해를 구한다.

#### 3.2.1. 복제(Reproduction)

자연에서의 복제는 부모 개체에 의해 자식 개체를 산함으로써 이루어진다. 이 과정은 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높음을 의미하며, 이는 주어진 환경에 더 잘 적응하는 개체만이 살아남는다는 자연선택의 원리를 뜻한다. 유전자 알고리즘에서 복제는 각각의 스트링이 가지는 적합도에 따라 그 스트링을 복제하는 과정이라고 정의할 수 있다.

#### 3.2.2. 교배(Crossover)

교배는 두 부모의 염색체를 조합하여 바꾸어 자식의 염색체를 만드는 조작이다. 자연계에서 자손은 부모세대로부터 유전자를 이어 받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전자 알고리즘에서도 이 과정을 모방한 것이 교배이다. 이는 개체간의 정보를 교환하고 스트링의 좋은 부분을 결합하는 효과적인 수단이다.

#### 3.2.3. 돌연변이(Mutation)

돌연변이는 유전자를 일정한 확률로 변화시키는 조작이다. 기존의 다른 탐색방법들은 탐색공간에서 최적값을 찾기도 전에 지역극소(Local Minimum)에 빠질 위험성이 있지만, 유전자 알고리즘은 해가 될 가능성이 있는 개체집단을 유지하면서 그들 모두가 동시에 최적값을 찾아나가기 때문에 지역극소에 빠질 위험을 어느 정도 방지할 수 있다. 자연계에서와 마찬가지로 돌연변이는 유전자 알고리즘에서 아주 드물게 일어나는 부가적인 역할을 하며, 복제 및 교배와 함께 사용될 때 전역적 탐색기능을 더욱 향상시킬 수 있다.

다음 Fig. 3은 유전자 알고리즘으로 최적해를 구하기 위한 순서도와 그 절차를 나타낸 것이다.

- 1) 초기화(Initialization) : 매개변수의 하한값과 상한값 내의 가능 해집합을 이진벡터로의 코드화 작업(Encoding)을 통해 요구되는 수만큼의 문자열(String) 즉, 개체들로 이루어진 하나의 집단을 무작위로 생성하여 초기집단을 구성한다.
- 2) 평가(Evaluation) : 이들 각각의 개체에 대한 적합도 평가를 수행한다.
- 3) 복제(Reproduction) : 자연 생태계의 적자생존 원리를 이용하여 높은 적합도를 가진 문자열에 대하여 다음 세대로 복제될 확률을 높게 한다.
- 4) 교배(Crossover) : 문자열을 쌍으로 구성하고 문자열 안에 있는 유전자 정보를 서로 교환하여 새로운 정보를 갖는 문자열을 만든다.

- 5) 돌연변이(Mutation) : 이 문자열을 돌연변이 개념을 이용하여 새로운 유전정보를 갖는 문자열을 만든다.
- 6) 이에 대한 적합도 평가를 수행한다. 최적해를 구할 때까지 3) 이하의 과정을 반복한다.

4. 모형의 적용 및 분석

4.1. 대상유역 및 분석자료

본 연구의 대상유역은 비교적 정밀한 강우, 수위 및 유량 등의 수문자료가 있는 IHP대표유역인 낙동강 위천대표유역을 선정하였다. 유역내에는 자기 강우관측소 11개소와 자기수위관측소 6개소가 있으며, 1982년부터 2002년 현재까지 약 20년간에 걸쳐서 수문관측이 실시되어 왔다. 그리고 위천유역의 하천수계 구성은 Fig. 4와 같이 분류와 비교적 큰 1개의 지류로 구성되어 있으며, 적용지점은 위천유역의 출구점인 무성지점을 선정하였다.

그리고 분석에 사용된 수문자료는 시강우량과 유출량으로 소유역별 평균강우량은 유역내 11개 강우관측소를 기준으로 Thiessen법에 의해서 구하였으며, 관측 유출량은 각 수위표 지점의 수위기록지에 수위-유량곡선(Rating Curve)을 적용하여 관측 유출수문곡선을 산정하였다.

본 연구에서는 여러 호우사상을 선택하여 유출계수  $\phi$ 를 산정하는 저류고  $y$ 와 유효배수면적  $x$ 를 유

도하였으며, 이들 값으로부터 식(1)과 (2)의 상수  $a, \beta, \gamma$ 를 유도한 결과 식(9)~(10)과 같았다.

$$x = \frac{0.852}{(1 + 54.216 \cdot e^{-7.918 \cdot y})} \tag{9}$$

$$\phi = x \cdot y = \frac{0.852 \cdot y}{(1 + 54.216 \cdot e^{-7.918 \cdot y})} \tag{10}$$

4.2. 유전자 알고리즘의 연산자

유전자 알고리즘을 이용하여 모형의 매개변수를 추정하기 위해서는 매개변수 값들을 이진법으로 표현된 염색체로 구성한 다음, 각종 유전연산자들의 인자를 결정해야 한다. Mulligan(1998)에 의하면 개체집단의 크기(Popsize)를 25개에서 100개 사이로 구성하는 것이 적합하다고 하였다. 또한 De Jong (1975)은 개체집단의 크기는 50에서 100개, 교배확률( $p_c$ )은 0.6, 돌연변이 확률( $p_m$ )은 0.001로 하는 것이 적합하다고 발표하였지만, 연산자들의 인자값은 연구자의 경험에 의존할 수 밖에 없다. 그러므로 본 연구에서는 기존의 연구결과를 토대로 일정 범위내에서 여러 가지 조합의 실행을 반복하여 가장 효과적이었던 매개변수 값들인 집단크기 50, 교배확률 0.5 그리고 돌연변이 확률 0.01을 이용하였다. 이 때 염색체의 길이는 소수점의 자릿수를 나타내는 정밀도에 좌우되므로 본 연구에서 정밀도를 4로 하였으며, 요구되는 염색체의 길이는 다음 식(11)을 이용하여 구하였다.

$$2^{m-1} < (b-a) \times 10^n < 2^m - 1 \tag{11}$$

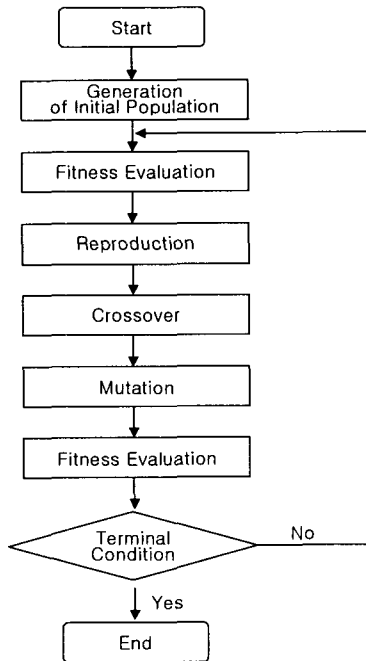


Fig. 3. Flowchart of Genetic Algorithm.

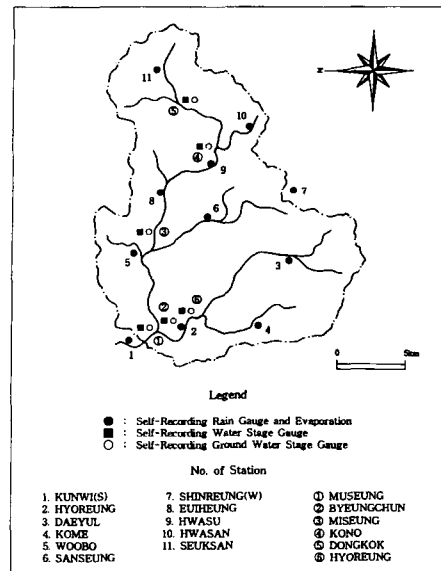


Fig. 4. Study river basin(Wi-stream).

여기서,  $m$ 은 변수의 검색체 길이,  $a$ 와  $b$ 는 매개변수들의 상·하한치,  $n$ 은 정밀도이다.

유출모형의 매개변수를 보정하기 위한 유전자 알고리즘의 적합도 판단기준은 다음과 같은 목적함수를 이용하였다.

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i^* - Y_i)^2 \quad (12)$$

여기서,  $S$ 는 목적함수,  $Y_i^*$ 는 실측치,  $Y_i$ 는 계산치이다. 즉, 대상지점에서 실측치와 모델 계산치간의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 것을 목적함수로 정했다.

#### 4.3. 매개변수의 추정결과

본 연구에서 필요한 매개변수는 두 가지 유형이 있다. 첫 번째는 유효우량 산정을 위한 Green-Ampt 침투방정식의 매개변수인  $SM$ 과  $K_s$ 이고, 두 번째는 유출량 산정과정에서 필요한  $a$ ,  $y_{in}$ ,  $l$ 과  $T_v$  등이다.

이 중에서  $a$ ,  $l$ 과  $T_v$ 는 기존의 강우와 유출자료로부터 직접 구할 수가 있으나  $SM$ 과  $K_s$ ,  $y_{in}$  등은 직접적으로 구할 수 없어서 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법으로 근사적으로 추정하였다.

본 연구에서 제시된 SED모형의 매개변수 최적화를 위하여 대상유역 내에서 발생한 1982년부터 2002년 현재까지의 강우자료를 SED모형에 적용함으로써 유역내에서 발생하는 유출해석에 필요한 최적의 매개변수를 결정하였다. 강우-유출과정의 해석을 위한 모형 매개변수의 최적화 과정은 과거에 관측된 수문자료(강우량, 주요 수위관측소별 수위-유량자료)로부터 매개변수 추정을 위한 초기치를 결정하고, 이로부터 유전자 알고리즘 방법에 의하여 실측 수문곡선에 가장 접근시킬 수 있는 모형의 매개변수를 결정하였다.

#### 4.3.1. SM과 Ks의 추정

Table 1. Optimization value of parameter  $SM$ ,  $K_s$  and  $y_{in}$ (Genetic Algorithm method, No.1)

No.	Date	SM (mm/hr)	K <sub>s</sub> (mm/hr)	y <sub>in</sub>	Antecedent Precipitation		
					5 Day	10 Day	20 Day
1	1983.6.20	500.0	0.600	0.351	0.2	13.8	13.8
2	1989.9. 3	350.0	0.225	0.625	26.5	48.0	68.0
3	1984.4.18	490.0	0.575	0.352	0.6	5.5	19.8
4	1984.9. 2	440.0	0.250	0.837	43.3	79.8	118.1
5	1985.8.17	120.0	0.575	0.952	97.8	151.9	155.7
6	1985.9.18	480.0	0.550	0.876	56.7	62.6	123.2
7	1986.7.21	450.0	0.475	0.665	17.7	72.1	91.3
8	1986.9.19	360.0	0.450	0.342	0.0	10.7	12.4
9	1987.7.14	500.0	0.575	0.861	74.6	78.0	78.0
10	1988.7.13	100.0	0.050	0.363	2.0	2.0	24.1
11	1989.7.11	330.0	0.475	0.621	35.4	35.4	58.7
12	1989.8.21	500.0	0.525	0.314	0.0	2.3	5.0
13	1990.6.19	320.0	0.500	0.786	60.0	60.0	79.0
14	1990.6.24	210.0	0.525	0.921	69.5	129.5	142.5
15	1990.7.18	490.0	0.400	0.936	101.2	108.9	130.2
16	1990.9.10	190.0	0.400	0.652	34.5	50.7	67.1
17	1990.9.23	430.0	0.525	0.568	0.0	23.3	102.5
18	1991.7. 7	280.0	0.325	0.508	17.8	36.1	39.6
19	1991.7.17	490.0	0.275	0.964	23.5	200.3	236.4
20	1991.8. 9	430.0	0.450	0.952	14.7	158.3	232.3
21	1991.8.22	470.0	0.450	0.443	0.0	0.0	63.0
22	1991.9.26	490.0	0.450	0.356	1.6	1.6	19.9
23	1992.8.24	380.0	0.550	0.528	3.1	23.9	79.5
24	1993.9.16	420.0	0.275	0.325	1.0	1.0	6.8
25	1994.8.28	420.0	0.550	0.466	5.5	32.6	44.0
26	1995.8.29	480.0	0.662	0.738	125.4	170.2	235.9
27	1996.7. 4	410.0	0.511	0.685	4.1	167.4	380.5
28	1997.6.24	250.0	0.368	0.592	21.4	21.4	52.8
29	1998.8.15	360.0	0.524	0.658	9.5	35.5	227.0
30	2001.6.23	320.0	0.418	0.568	54.0	62.5	71.0

본 연구에서는 Green-Ampt 방정식의 매개변수인  $SM$ 과  $K_s$ 의 결정을 위하여 과거 유역내에서 발생한 수문관측자료를 수집하였다. 선택된 30개 호우사상을 대상으로 강우-유출 해석을 실시하여 계산치를 산정하고, 그 결과를 관측유량과 비교하면서 유전자 알고리즘 방법으로 최적 매개변수를 추정하였다(Table 1).

유역에서 선택된 30개 호우사상으로부터 유전자 알고리즘 방법에 의해서 최적화된  $SM$ 과  $K_s$ 는 선행강우량과 밀접한 관계를 나타내고 있다고 가정하였으며, 이들 관계로부터 강우-유출 해석에 이용하기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 Table 2와 같이 5일, 10일 및 20일 선행강우량과의 관계식을 유도하였다. 여기서,  $y$ 는  $SM$  또는  $K_s$ ,  $x_1$ 은 5일 선행강우량,  $x_2$ 는 10일 선행강우량,  $x_3$ 는 20일 선행강우량이다.

4.3.2. 매개변수  $y_{in}$ 의 추정

본 연구에서는 SED모형의 매개변수인  $y_{in}$ 을 결정을 위하여 과거 유역내에서 발생한 수문관측자료를 수집하였다. 선택된 30개 호우사상을 대상으로 강우-유출 해석을 실시하여 계산치를 산정하고, 그 결과를 관측유량과 비교하면서 유전자 알고리즘 방법으로 최

적 매개변수를 추정하였다(Table 1).

유역에서 선택된 30개 호우사상으로부터 유전자 알고리즘 방법에 의해서 최적화된  $y_{in}$ 은 선행강우량과 밀접한 관계를 나타내고 있다고 가정하였으며, 이들 관계로부터 강우-유출 해석에 이용하기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 Table 3과 같이 5일, 10일 및 20일 선행강우량과의 관계식을 유도하였다. 여기서,  $y$ 는  $SM$  또는  $K_s$ ,  $x_1$ 은 5일 선행강우량,  $x_2$ 는 10일 선행강우량,  $x_3$ 는 20일 선행강우량이다.

4.4. 매개변수의 검증(Verificaton)

본 연구에서 제시된 SED모형의 매개변수들( $SM$ 과  $K_s$ ,  $y_{in}$ )이 모형의 출력에 어느 정도 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 민감도 분석을 실시하였다. 이 때 나머지 다른 매개변수들은 상수로 고정시키고 임의의 매개변수를 변화시켜서 그 반응(대표적으로 첨두유량)을 살펴보았다. 그 결과  $SM$ 과  $K_s$ 는 그 값이 증가함에 따라 첨두유량은 감소하고,  $y_{in}$ 은 그 값이 증가함에 따라 첨두유량이 매우 증가하는 것으로 나타났다. 특히  $y_{in}$ 의 변화에 따라 첨두유량의 값이 급격히 변함을 알 수 있었다.

또한 위에서 추정된 매개변수들을 다른 강우와 유출자료(매개변수 추정에 이용된 자료 외의 자료)

Table 2. Relationships between  $SM$ ,  $K_s$  and antecedent precipitation

(Unit : mm/hr)

Parameters	Regression Formula	R
$SM$	$y=394.01-0.39946x_1-0.29325x_2+0.29356x_3$	0.915
$K_s$	$y=0.40117+0.00148x_1-0.00111x_2+0.00072x_3$	0.922

Table 3. Relationships between  $y_{in}$  and antecedent precipitation

(Unit : mm/hr)

Parameter	Regression Formula	R
$y_{in}$	$y=0.41594+0.00219x_1+0.00191x_2+0.00028x_3$	0.927

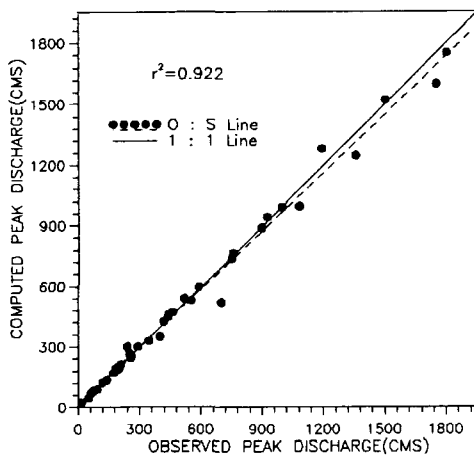


Fig. 5. Comparison of the computed and the observed value.

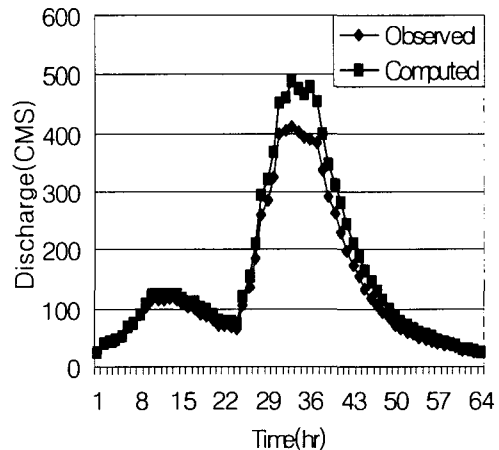


Fig. 6. Comparison of the computed and the observed hydrograph(1989. 8. 21).

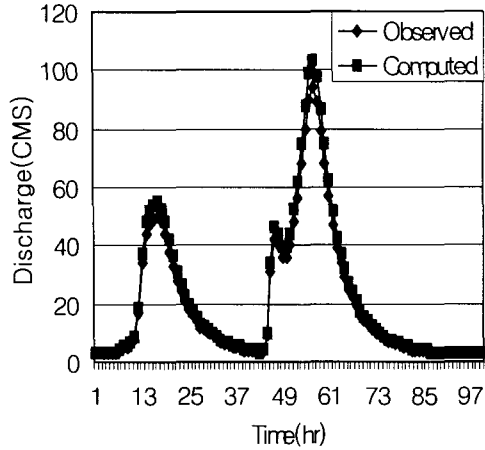


Fig. 7. Comparison of the computed and the observed hydrograph(1993. 8. 8).

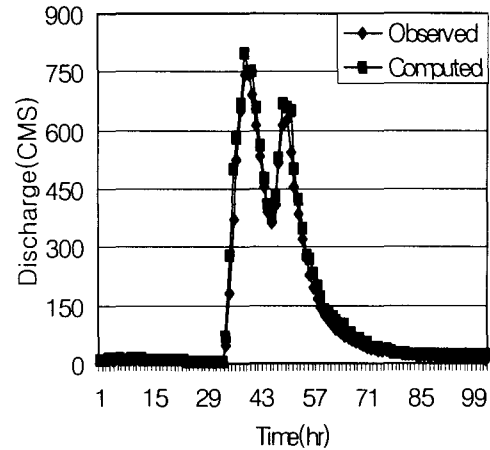


Fig. 8. Comparison of the computed and the observed hydrograph(2000. 7. 13).

에 적용시켜서 그 계산치와 관측치들(대표적으로 첨두유량)을 플롯한 결과, Fig. 5와 같이 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4.5. 모형의 적용분석

본 연구에서는 SED모형에 대한 강우-유출 해석을 위해서 전절에서 유전자 알고리즘 방법으로 유도한 매개변수 추정치를 이용하여 위천유역의 무성지점에서 발생한 1989년 8월 21일, 1993년 8월 8일 및 2000년 7월 13일 호우에 적용하였으며, 그 결과 다음 Fig. 6~8과 같은 수문곡선을 계산할 수 있었다.

수문곡선의 형상을 비교하면 계산수문곡선에 있어서 강우발생 패턴에 대한 유출반응을 대체로 잘 나타내고 있으며, 관측유출수문곡선과 매우 접근하고 있음을 알 수 있었다. 특히 수문곡선의 상승부, 첨두부 및 하강부에서 모두 우수한 것으로 나타났다.

전절에서 선정된 호우에 대한 계산수문곡선과 관측수문곡선을 비교하기 위하여 모델의 효율도(Model Efficient, ME), 절대오차의 평균(Mean Square Error, MSE) 및 상대오차의 평균(Bias)을 검토하였으며, 계산된 수문곡선의 첨두치 특성을 검토하기 위하여 첨두유량 발생시간차(Peak Time Error, TER)를 검토한 결과 다음 Table 3과 같았다. 그리고 이들 적합성 검토에 사용된 방법들을 식으로 표시하면 다음 식(13)~(16)과 같다.

$$ME = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} + Q_{est})^2} \quad (13)$$

$$MSE = \left[ \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$Bias = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})}{n} \quad (15)$$

$$TER = T_{obs} - T_{est} \quad (16)$$

여기서, n은 자료의 수, Q<sub>obs</sub>는 관측유량, Q<sub>est</sub>는 계산유량, T<sub>obs</sub>는 관측첨두유량 발생시간, T<sub>est</sub>는 계산첨두유량 발생시간이다.

Table 4. Comparison of the error indices for storm events

Method	Date	ME	MSE (CMS)	Bias (CMS)	TER (hr)
GAM	1989. 8.21	0.908	25.319	3.582	1.0
	1993. 8. 8	0.923	18.372	2.896	0.0
	2000. 7.13	0.926	17.331	2.964	-1.0

먼저, 수문곡선의 전체적인 검토에 사용된 적합성 검토방법 중 모델의 효율도를 나타내는 ME는 0.908~0.926을 나타내고 있으며, 절대오차의 평균을 나타내는 MSE는 17.331~25.319CMS를 나타내고 있고, 상대오차의 평균을 나타내는 Bias는 2.896~3.582CMS를 나타내고 있다. 그리고 수문곡선의 첨두부분에 대한 적합성 검토는 첨두발생시간의 차 TER을 분석하였으며, 그 결과 -1.0~1.0hr을 나타내고 있다.

이와 같이 Fig. 5~8 및 Table 4의 결과로 볼 때 SED모형으로 계산한 수문곡선이 대체로 관측수문곡선에 근사한 것으로 나타나, 유출모형의 매개변수 산정방법으로써 유전자 알고리즘 방법의 적용성을 확인하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 하천유역의 강우-유출과정을 모의하기 위해 필요한 매개변수들을 추정하는 알고리즘을 확립하였다. 이로부터 추정된 매개변수들을 확정론적 모델인 SED모형에 적용하여 유출량을 산정하고 관측 수문곡선과 비교 분석하였으며, 그 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SED모형에 대한 매개변수를 추정하기 위해서 유전자 알고리즘을 이용한 방법을 제시하였으며, 이를 유효수량 산정을 위한 Green-Ampt 침투방정식의 매개변수인  $SM$ 과  $K_s$ , SED모형의 매개변수인 초기저류고  $y_{in}$ 을 추정하는데 이용하였다.
- 2) 유전자 알고리즘을 이용하여 추정된 매개변수인  $SM$ 과  $K_s$ ,  $y_{in}$ 은 5일, 10일, 20일 선행강우량과 각각 회귀식을 유도하였으며, 높은 상관성을 갖고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 계산수문곡선과 관측수문곡선의 형상을 비교해 볼 때 상승부, 첨두부, 하강부의 형상이 우수한 것으로 나타나 강우에 대한 유출반응을 대체로 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제시한 유전자 알고리즘을 이용한 방법으로 매개변수를 추정하여 유출모형에 적용한 결과 최적의 매개변수를 추정함으로써 하천 유출해석에 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 1) Ibbitt, R. P. and T. O'Donnell, 1971, Fitting Method for Conceptual Catchment Models, J. Hydraul. Div., Proceedings of American Society of CIVIL Engineers, 1331-1342pp.
- 2) Johnston, P.R. and D.H. Pilgrim, 1976, Parameter Optimization for Watershed Models, Water Resources Research, 12(3), 477-486.
- 3) Ibbitt, R. P., 1970, Systematic Parameter fitting for Conceptual Models of Catchment Hydrology, Ph. D. dissertation, Univ. of London, 215-224pp.
- 4) Bard, Y., 1974, Nonlinear Parameter Estimation, Academic, Orlando, Fla., 382-398pp.
- 5) Beck, J.V. and K.J. Arnold, 1977, Parameter Estimation in Engineering and Science, John Wiley, Inc., New York, 416-432.
- 6) Wang, Q. J., 1991, The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models, Water Resour. Res., 27(9), 2467-2471.
- 7) 박봉진, 차형선, 김주환, 1997, 유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구, 한국수자원학회지, 30(4), 347-355.
- 8) 이길성, 김상욱, 2001, 유전자 알고리즘을 사용한 SSARR 모형의 자동보정, 대한토목학회지, 21(3-B), 171-183.
- 9) Holecek, G., 1988, Storage-Effective Drainage (SED) Runoff Model, J. Hydrol., 98, 295-314.
- 10) Mein, R. G. and C. L. Larson, 1971, Modeling the Infiltration Component of the Rainfall-Runoff Process, Water Resour. Res. Center, Bull. 43, Univ. of Minn., Minneapolis, 72pp.
- 11) Mein, R. G. and C. L. Larson, 1973, Modeling Infiltration during a Steady Rain, Water Resour. Res., 9(2), 384-394.
- 12) Chu, S. T., 1978, Infiltration during an Unsteady Rain, Water Resour. Res., 14(3), 461-466.