韓國水資源學會論文集
第39卷 第1號 · 2006年 1月
pp. 47~57

개념적 강우-침투 과정을 고려한 탱크 모형의 유도

Derivation of a Tank Model with a Conceptual Rainfall-Infiltration Process

박 햇 님* / 조 원 철**
Park, Haennim / Cho, Woncheol

Abstract

This study derives an event-based tank model with a conceptual rainfall-infiltration process, modifying conventional tank models. The model comprises two serial tanks, one parallel tank and an infiltration regulating element. The infiltration process within the element is not represented as a function of only time, but as a function of soil moisture content for three possible cases owing to the relationship between rainfall intensity and infiltration capacity. This study considers the previous soil moisture condition of a watershed by using antecedent precipitation index. Six parameters of the model are identified by using the real coded genetic algorithm. The applicability and validity of the proposed model are assessed for the observed stormwater data from the research basin of the International Hydrological Program, the Pyeongchanggang River basin, Republic of Korea. The results computed streamflows show relatively good agreement with observed ones.

keywords : rainfall-infiltration, tank model, infiltration capacity, soil moisture content, antecedent precipitation index, genetic algorithm

요 지

본 연구에서는 개념적인 강우-침투 과정을 고려하여 사상 기반 탱크 모형을 유도하였으며, 이를 통해 기존의 탱크 모형에서 이 과정에 대한 개념적 개선이 이루어질 수 있도록 하였다. 이 모형은 두 개의 직렬 탱크, 한 개의 병렬 탱크 및 침투 조절요소로 구성되며, 침투 조절 요소내의 침투 과정은 강우 강도-침투능 관계에 의해 성립 가능한 세 가지 경우에 대해 단순히 시간만의 함수가 아닌 토양 함수량의 함수로서 표현된다. 또한 본 연구에서는 선행강수지수를 이용하여 모의시 수문 유역의 선행 함수 상태를 반영하고자 하였다. 모형의 6개 매개변수는 실수 코딩 유전 알고리즘을 사용하여 최적화 하였으며, IHP 연구 유역인 평창강 유역의 실측 호우 사상을 사용하여 모의한 결과, 모형의 적용성 및 유효성이 비교적 양호하게 나타났다.

핵심용어 : 강우-침투, 탱크 모형, 침투능, 토양 함수량, 선행강수지수, 유전 알고리즘

1. 서 론

수자원 및 이와 관련된 사항의 계획, 설계, 분석 등에 있어 강우-침투-유출의 관계를 합리적으로 밝혀내는 것은 매우 중요하다. 특히 침투는 강우의 형태로 유역에 공급되는 물의 분배를 결정하는 과정으로서, 이를 적절히 고려할 수 있는지의 여부가 강우-유출 모형의 유효성을 판단하는 기준이 된다고 해도 과언이 아니다.

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정
Ph. D. Course, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea (e-mail: mohenjo@yonsei.ac.kr)
** 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목환경전공 교수
Prof., School of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea (e-mail: woncheol@yonsei.ac.kr)

van Es(1993)의 연구에서는 농업 지역에서 토양 침투의 시공간적 변화의 상대적 크기를 결정하였으며, Diskin and Nazimov(1995)의 연구에서는 Bauer(1974)와 Verma(1982)의 연구에 근거하여 유입 조절 요소 및 저수지 요소로 구성된 개념적 침투 모형을 제시하였다. 이 연구에서는 요소 및 상태 변수간의 관계를 통해 상부 토양층의 함수량에 따른 침투 및 침루 과정을 가정함으로써, 단순히 시간의 함수로서 침투를 고려하는 것에 비해 보다 합리적으로 침투 과정에 접근하였다. 박햇님과 조원철(2002)의 연구에서는 초기 함수량의 효과를 고려하여 이 개념적 모형을 수정하고, 그 적용성을 검토한 바 있다. 본 연구에서는 Diskin and Nazimov (1995)의 강우-침투 과정을 고려하여 단기 호우 사상에 대해 기존의 탱크 모형을 재유도하였다. 전체적인 모형의 구조는 전형적인 탱크 모형의 구조와 유사한 직렬, 병렬 탱크의 조합 형태를 기본으로 하며, 침투 조절 요소에 의해 모형 내의 토양 함수량과 침투능의 함수 관계를 규정하였다.

기존에 널리 활용되어 오던 탱크 모형(Sugawara, 1972)은 개념적인 집중형(lumped) 모형으로서 모형 구조가 단순하며 요구되는 입력 자료의 수가 타 모형에 비해 적으므로 적용에 편리한 모형으로 간주되어 국내외 장기 유출 해석에 주로 응용되어 왔다. 탱크 모형에 관한 비교적 최근의 연구로는 이상호(1998), 김현영과 박승우(1998), 이동률과 김형섭(1999) 및 배덕효 등 (2003)에서 탱크 모형의 매개변수 추정에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Yue and Hashino(2000)의 연구에서 한 개의 병렬 탱크와 세 개의 직렬탱크로 구성된 모형을 통해 기존의 단위 유량도 개념을 개선시킨 바 있다. 그러나 전형적인 탱크 모형에서는 강우-침투 관계가 최상단 탱크의 하부 유출공 계수에 의해 규정되므로 물리적 의미를 가진 침투 과정 해석이 불가능하며, 유량 자료를 통해 간접적으로 산정된 각 탱크의 초기 저류고를 기준으로 유역의 선행 함수 상태를 반영해야 한다는 단점을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 침투 조절 요소에 의해 기존의 탱크 모형에서 강우-침투 과정에 대한 물리적인 접근과 보다 합리적인 모의 및 해석이 가능할 수 있도록 노력하였다. 또한 선행강수지수(Antecedent Precipitation Index, API)를 이용하여 최대 토양 함수량 및 모의 시작 시점의 토양 침투능을 산정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이를 통해 수문 유역의 선행 함수 상태를 보다 적절히 반영하고자 하였다.

모형의 매개변수 추정을 위해서는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)(Holland, 1975; Goldberg, 1989)을 사용하였는데, 이는 최근 수문 모형의 매개변수 최적화에 자주 사용되어 오고 있다(박봉진 등, 1997; Mohan, 1997; 김성태 등, 1999). 또한 모형의 적용성 평가는 기존 모형에 대한 유도된 모형의 효율성 비교보다는 물리적 의미의 개선 및 유역의 선행 함수 상태 고려의 결과로 유도된 본 모형 자체의 유효성에 중점을 두고 수행되었는데, 이를 통해 모형의 기여도, 특징 및 향후 연구 방향 등을 파악하고자 하였다.

2. 모형의 구성

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 모형은 두개의 직렬 탱크와 하나의 병렬 탱크 및 침투 조절 요소로 구성된다. 침투 조절요소로의 입력($I_R(t)$, mm/hr)은 요소의 상태변수($f(t)$, mm/hr)에 의해 탱크 1과 탱크 2로 배분 된다 ($I_1(t)$ 및 $I_2(t)$, mm/hr). 탱크 1과 탱크 3에서는 각각 수평 유출공으로부터 하나의 출력($O_1(t)$ 및 $O_3(t)$, mm/hr)이 발생하며, 탱크 2에서는 수평 및 수직 유출공으로부터 출력이 발생 한다($O_2(t)$ 및 $I_3(t)$, mm/hr). 탱크 2의 하부 유출공으로부터의 출력은 탱크 3의 입력으로 작용한다. 각 탱크로부터의 출력은 각 탱크의 상태변수(저류고)에 의해 선형적으로 결정된다고 가정한다.

임의 시간 t에서 탱크 1, 탱크 2, 탱크 3으로부터의 수평 출력은 각각 유출의 지표면 유출 성분, 중간 유출 성분, 지하수 유출 성분을 의미하며, 이를 제어하는 유출공의 계수는 각 탱크에 대해 c_1(hr^{-1}), c_{21}(hr^{-1}), c_3 (hr^{-1})이다. 침투 조절 요소의 상태변수는 상부 토양층의 침투능을 의미하며 강우강도($I_R(t)$) 및 토양 함수량 ($H_2(t)$)으로부터 결정될 수 있다고 가정한다. 탱크 2와 침투 조절 요소를 연결하는 피드백 경로는 물 분배 과정을 나타내는 것이 아니라, 이러한 가정이 존재한다는 것을 표시하기 위함이다. 토양 함수량과 침투능 사이의 이러한 관계는 단순히 시간의 함수로서 침투능을 고려하는 것에 비해 보다 합리적인 침투 과정 해석이 가능하도록 해준다(Diskin and Nazimov, 1995). $H_i(t)$ (i=1, 2, 3)(mm)는 각 유출 성분에 기여하는 탱크의 저류고이며, 모의 시작 시점에서 영(zero)의 값을 갖는다고 가정한다. 이러한 가정에 의해 모의 시작 시점에 존재하는 하천 유출량은 모형으로부터 모의된 유출량에 선형 추가하여 고려한다. $H_2(t)$의 경우 최대값이 H_m(최대 토양 함수량, mm)으로서, 이는 강우의 초기 손실 및 중간 유출 생성 과정에 대한 선행 토양 함수 조건의 영향을 나타내는 복합적인 지수라고 할 수 있다. 본 연구에서는 API를 이용하여 최대 토양 함수량을 추정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 2.3절에 수록하였다. t_{d1}(hr)은 지표면 유출에서 피복 상태

및 하도 흐름에 의한 복합적인 지체 효과를 고려하기 위한 것이며, t_{d2}(hr)는 중간 유출과 지하수 유출에서 토양으로 유입된 함수량이 유출을 형성하는 과정에서 필요한 지체 효과를 고려하기 위한 것이다. 본 모형과 같이 배수구역 전체를 대상으로 하는 집중형 모형을 실제 사상에 적용하기 위해서는 각 유출 성분의 지체 효과를 고려해 주는 것이 필수적이라 판단된다. 전형적인 탱크 모형에서는 이러한 지체 효과를 고려하기 위해 수평 유출공의 수직 높이를 매개변수로 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 본 모형에서 $I_1(t)$은 유효 우량으로서 직접 유출을 생성하므로, 탱크 1에서 수평 유출공의 수직 높이를 고려할 경우 유출공의 위치 아래에 존재하는 유효 우량의 일부가 직접 유출의 생성에 기여하지 못하고 남게 된다. 또한 H_m은 선행 토양 함수의 상태에 따라 변화하므로, 수평 유출공의 위치에 따라 중간 유출이 발생하지 않는 경우가 발생할 수도 있다. 상기와 같은 이유와 더불어 모형 유도 과정의 간단화를 위해 본 연구에서는 시간의 단위를 가지는 t_{d1} 및 t_{d2}를 사용하여 각 유출 성분의 지체 효과를 고려할 수 있도록 하였다.

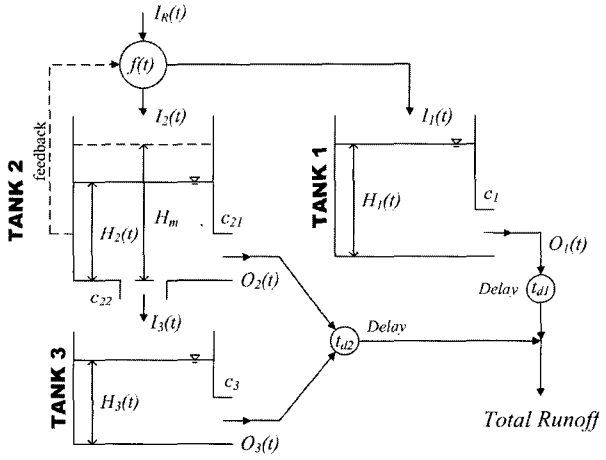


Fig. 1. Schematic structure of the model

2.1 강우-침투과정

침투 조절 요소는 강우-침투 과정을 조절하며 $f(t)$와 $H_2(t)$ 사이에는 다음과 같은 감소 선형관계가 성립한다고 가정한다.

$$f(t) = A + B\left(H_m - H_2(t)\right) \tag{1}$$

여기서 A와 B는 매개변수이며, 이 때, 다음과 같은 조건이 성립할 수 있다.

$$\text{If } H_2(t) = 0 \text{ then } f(t) = f_i \tag{2}$$

$$\text{If } H_2(t) = H_m \text{ then } f(t) = f_c \tag{3}$$

여기서 f_i(mm/hr)는 모의 시작점(호우 사상의 시작점)에서의 토양 초기 침투능, f_c(mm/hr)는 종기(최소) 침투능을 의미한다. Eq. (2)에서 $H_2(t) = 0$이라는 것은 토양 함수량이 완전히 고갈되었음을 의미하는 것이 아니라(박햇님과 조원철; 2002), 모의 시작 시점 이전에 존재하고 있던 유량을 별도로 고려하여 이에 의한 효과를 배제하기 위함이다.

Eqs. (2) and (3)에 의해 Eq. (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Diskin and Nazimov, 1995).

$$f(t) = f_c + (f_i - f_c)\left\{1 - \frac{H_2(t)}{H_m}\right\} \tag{4}$$

임의 시간에서 침투 조절 요소로부터의 출력값은 이 요소로의 강우 강도 및 침투능에 의해 결정되며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$\text{If } I_R(t) \leq f(t) \text{ then } I_2(t) = I_R(t),\quad I_1(t) = 0 \tag{5}$$

$$\text{If } I_R(t) > f(t) \text{ then } I_2(t) = f(t),\quad I_1(t) = I_R(t) - f(t) \tag{6}$$

2.2 유출요소별 저류고와 유출량 관계

일반적인 수문 모의에서 입력 자료는 일정 시간 간격을 갖는 이산형 자료로 주어지므로 유출 모의를 위한 계산 시간 간격을 Δt(hr)라고 하면, 임의 시간 $t = m\Delta t$(m은 음이 아닌 정수)에서 탱크 2에 대한 저류고와 출력과의 관계 및 연속 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_2(m\Delta t) = c_{21} H_2(m\Delta t) \tag{7}$$

$$I_3(m\Delta t) = c_{22} H_2(m\Delta t) \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &H_2(m\Delta t) - H_2((m-1)\Delta t) \\ &= \frac{\Delta t}{2}\left\{I_2(m\Delta t) + I_2((m-1)\Delta t)\right\} \\ &- (c_{21} + c_{22})\frac{\Delta t}{2}\left\{H_2(m\Delta t) + H_2((m-1)\Delta t)\right\} \end{aligned} \tag{9}$$

한편, 임의 시간 t에서 $f(t)$와 $I_R(t)$의 관계는 Eqs. (5) and (6)에 의해 우량 주상도 상에서 Table 1과 같이 세 가지 경우로 나타낼 수 있다.

CASE A : 이 경우 Eq. (6) 및 Table 1에 의해 $I_2((m-1)\Delta t) = f((m-1)\Delta t)$, $I_2(m\Delta t) = f(m\Delta t)$이

다. 따라서 Eq. (9)를 $H_2(m\Delta t)$에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$H_2(m\Delta t)=\frac{\{2-(c_{21}+c_{22})\Delta t\}H_m-(f_i-f_c)\Delta t}{\{2+(c_{21}+c_{22})\Delta t\}H_m+(f_i-f_c)\Delta t}H_2((m-1)\Delta t)+\frac{2f_iH_m\Delta t}{\{2+(c_{21}+c_{22})\Delta t\}H_m+(f_i-f_c)\Delta t} \tag{10}$$

CASE B : 이 경우 Eq. (5) 및 Table 1에 의해 $\frac{I_2(m\Delta t)+I_2((m-1)\Delta t)}{2}=I_R(m\Delta t)$라고 할 수 있다. 따라서 Eq. (9)에 이를 대입하여 $H_2(m\Delta t)$에 대해 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$H_2(m\Delta t)=\frac{2-(c_{21}+c_{22})\Delta t}{2+(c_{21}+c_{22})\Delta t}H_2((m-1)\Delta t)+\frac{2I_R(m\Delta t)\Delta t}{2-(c_{21}+c_{22})\Delta t} \tag{11}$$

CASE C : 이 경우 계산 구간 내의 임의 시간 Δt_1 $(0\le\Delta t_1<\Delta t)$에서 침투능은 강우 강도와 같아지며, Eq. (4)에서 $f((m-1)\Delta t+\Delta t_1)=I_R(m\Delta t)$라고 함에 의해 이 시점에서의 토양 함수량을 구할 수 있다.

$$H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)=\frac{f_i-I_R(m\Delta t)}{f_i-f_c}H_m \tag{12}$$

한편, $(m-1)\Delta t<t\le(m-1)\Delta t+\Delta t_1$인 구간은 CASE B에 해당하므로, Eq. (11)에서 $H_2(m\Delta t)$와 Δt 대신 각각 $H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)$와 Δt_1을 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta t_1=\frac{H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)-H_2((m-1)\Delta t)}{I_R(m\Delta t)-\frac{c_{21}+c_{22}}{2}\{H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)+H_2((m-1)\Delta t)\}} \tag{13}$$

또한 $(m-1)\Delta t+\Delta t_1<t\le m\Delta t$인 구간은 CASE A에 해당하므로, Eq. (10)에서 $H_2((m-1)\Delta t)$와 Δt 대신에 각각 $H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)$와 $\Delta t_2(=\Delta t-\Delta t_1)$를 대입하면 CASE C의 경우에 대한 구간 말단에서의 토양 함수량을 구할 수 있다.

$$H_2(m\Delta t)=\frac{\{2-(c_{21}+c_{22})\Delta t_2\}H_m-(f_i-f_c)\Delta t_2}{\{2+(c_{21}+c_{22})\Delta t_2\}H_m+(f_i-f_c)\Delta t_2}H_2((m-1)\Delta t+\Delta t_1)+\frac{2f_iH_m\Delta t_2}{\{2+(c_{21}+c_{22})\Delta t_2\}H_m+(f_i-f_c)\Delta t_2} \tag{14}$$

임의 시간 $t=m\Delta t$에서 탱크 3에 대한 저류고와 출력과의 관계 및 저류고에 대해 나타낸 연속 관계는 다음과 같다.

$$O_3(m\Delta t)=c_3H_3(m\Delta t) \tag{15}$$

$$H_3(m\Delta t)=\frac{2-c_3\Delta t}{2+c_3\Delta t}H_3((m-1)\Delta t)+\frac{c_{22}\Delta t\{H_2(m\Delta t)+H_2((m-1)\Delta t)\}}{2+c_3\Delta t} \tag{16}$$

탱크 1에 대해서도 마찬가지로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$O_1(m\Delta t)=c_1H_1(m\Delta t) \tag{17}$$

$$H_1(m\Delta t)-H_1((m-1)\Delta t)=\frac{\Delta t}{2}\{I_1(m\Delta t)+I_1((m-1)\Delta t)\}-\frac{c_1\Delta t}{2}\{H_1(m\Delta t)+H_1((m-1)\Delta t)\} \tag{18}$$

여기서 $I_1(m\Delta t)+I_1((m-1)\Delta t)$는 Eqs. (5) and (6)에 의해 구할 수 있으며 탱크 2의 각 CASE 별로 다른 값을 갖는다. Table 2에는 이를 산정한 값을 나타내었다.

Table 1. Three cases available in a rainfall hyetograph for the relationship between rainfall intensity and infiltration capacity

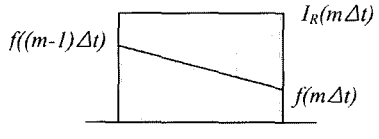
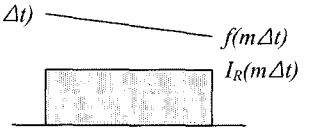
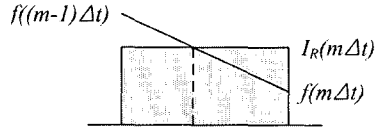
CASE A	CASE B	CASE C
		
$I_R(m\Delta t)>f((m-1)\Delta t)$ $I_R(m\Delta t)>f(m\Delta t)$	$I_R(m\Delta t)\le f((m-1)\Delta t)$ $I_R(m\Delta t)\le f(m\Delta t)$	$I_R(m\Delta t)\le f((m-1)\Delta t)$ $I_R(m\Delta t)>f(m\Delta t)$

Table 2. $I_1(m\Delta t)+I_1((m-1)\Delta t)$ values for three cases in TANK 2

CASE	$I_1(m\Delta t)+I_1((m-1)\Delta t)$
CASE A	$\{I_R(m\Delta t)-f(m\Delta t)\}+\{I_R(m\Delta t)-f((m-1)\Delta t)\}$ $=2I_R(m\Delta t)-\left[2f_i-\frac{f_i-f_c}{H_m}\{H_2(m\Delta t)+H_2((m-1)\Delta t)\}\right]$
CASE B	0
CASE C	$I_R(m\Delta t)-f(m\Delta t)=I_R(m\Delta t)-\left[f_c+(f_i-f_c)\left\{1-\frac{H_2(m\Delta t)}{H_m}\right\}\right]$

각 CASE에 대해 Table 2의 값을 Eq. (18)에 대입한 후, $H_1(m\Delta t)$에 대해 정리하면 다음과 같다.

CASE A :

$$H_1(m\Delta t)=\frac{2-c_1\Delta t}{2+c_1\Delta t}H_1((m-1)\Delta t)+\frac{2\Delta t\{I_R(m\Delta t)-f_i\}}{2+c_1\Delta t}+\frac{\Delta t(f_i-f_c)}{H_m(2+c_1\Delta t)}\{H_2(m\Delta t)+H_2((m-1)\Delta t)\} \quad (19)$$

CASE B:

$$H_1(m\Delta t)=\frac{2-c_1\Delta t}{2+c_1\Delta t}H_1((m-1)\Delta t) \quad (20)$$

CASE C :

$$H_1(m\Delta t)=\frac{2-c_1\Delta t}{2+c_1\Delta t}H_1((m-1)\Delta t)+\frac{\Delta t\{I_R(m\Delta t)-f_i\}}{2+c_1\Delta t}+\frac{\Delta t(f_i-f_c)}{H_m(2+c_1\Delta t)}H_2(m\Delta t) \quad (21)$$

상기 과정을 통해 계산된 임의 시간 $t=m\Delta t$에서의 총 모의 유출량 $Q_{total}(m\Delta t)$(cms)은 각 탱크로부터의 유출량과 모의 시작 시점에 존재하는 하천 유출량의 선형합으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{total}(m\Delta t)=\frac{AR}{3.6}\{O_1(m\Delta t-t_{d1})+O_2(m\Delta t-t_{d2})+O_3(m\Delta t-t_{d2})\}+Q_{old} \quad (22)$$

여기서 AR(km^2)은 유역 면적, Q_{old}(cms)는 모의 시작 시점에 존재하는 하천 유출량이고, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 지표면 유출 성분은 t_{d1}만큼, 중간 유출과 지하수 유출 성분은 t_{d2}만큼 지체되어 나타난다.

2.3 최대 함수량 및 초기 침투능의 산정

강우 입력으로부터 유출 양상을 추정해 내는 데 있어 선행 토양 함수량이 중요한 매개변수로 작용한다는 것은 주지의 사실이다. 그러나 이의 계측과 자료의 구축은 상당한 시공간적 제약을 받는다. 따라서 본 연구에서는 API를 이용하여 상부 토양층의 최대 함수량과 모의 시작 시점에서의 토양 침투능을 산정할 수 있도록 하였다. 이 방법의 이해를 위해 Fig. 2에는 개념적인 토양 구조 내에서 함수량과 침투능의 관계를 나타내었다.

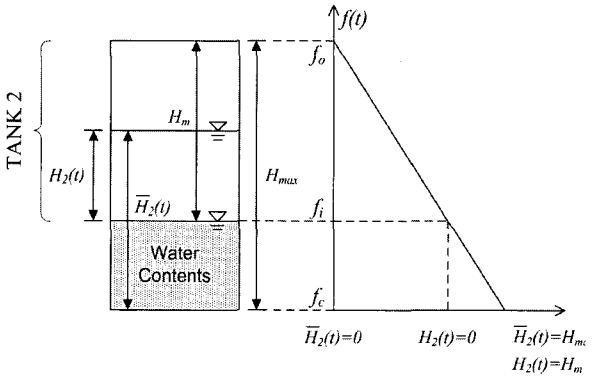


Fig. 2. The relationship between soil water storage and infiltration capacity

Fig. 2의 좌측 부분은 개념적인 토양의 구조를 나타낸다. 여기서 $\overline{H_2}(t)$는 토양 전체를 기준으로 한 토양 함수량을 의미하며 $H_2(t)$는 탱크 2를 기준으로 한 토양 함수량을 의미한다. 즉, 토양 구조의 하부($\overline{H_2}(t)-H_2(t)$에 해당하는 부분)는 현 호우 사상의 시작점에서 토양 내부에 이미 존재하고 있는 함수량을 나타내며, 이 부분에 의한 하천 유출 기여량은 Eq. (22)에 나타낸 바와 같이 별도로 고려한다. 상기 관계에 의해 $H_2(t)=0$인 시점에서 탱크 2의 유효 범위는 호우 사상별로 가변적으로 결정된다. 토양과 함수량 사이의 이러한 구조적 단순화 방법은 전체 토양의 깊이나 초기 토양 함수량에 대한 정보를 매개변수화하지 않고도 선행 토양 함수량

및 모의 과정 중의 토양 함수량 변화를 모형에서 적절히 고려할 수 있게 해준다. Fig. 2에서 H_m은 API를 이용하여 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$H_m = \mathrm{API_m} - \mathrm{API_i} \tag{23}$$

여기서 $\mathrm{API_m}$은 가장 최근에 발생한 강한 호우 사상 직후의 API이며, $\mathrm{API_i}$는 현 호우 사상 시작 시점의 API이다. 최근 호우 사상으로부터 현 호우 사상 시작점까지의 기간에는 호우로 인해 거의 포화되었던 토양으로부터 가능 최대 함수량이 다시 확보되며, 미량의 추가적인 강우가 발생하더라도 이로 인해 토양이 재포화 되지는 않는다(Saxton and Lenz, 1967; Yue and Hashino, 2000).

Fig. 2의 우측 부분은 토양 함수량의 변화에 따른 침투능의 변화를 나타낸 것으로, Eq. (4)에 의해 이들 사이에는 감소 선형 관계가 성립한다. 토양이 완전한 건조 상태에 있을 때($\overline{H_2}(t)=0$)의 침투능은 f_0(최대 침투능, mm/hr)이고, 토양이 완전 포화되었을 때($\overline{H_2}(t)=H_{\max}$, $H_2(t)=H_m$)의 침투능은 f_c이다. 전술한 선형관계를 이용하여 Eq. (4)를 확장하면 다음과 같이 f_i를 구할 수 있다.

$$f_i = f_c + (f_o - f_c)\left\{1 - \frac{\overline{H_2'}}{H_{\max}}\right\} \tag{24}$$

여기서 $\overline{H_2'}$는 모의 시작 시점의 $\overline{H_2}(t)$이며, $\overline{H_2'}$와 $H_{\max}$에 해당하는 시점의 API 비를 이용하면 다음 식과 같이 $\overline{H_2'}/H_{\max}$를 구할 수 있다.

$$\frac{\overline{H_2'}}{H_{\max}} = \frac{\mathrm{API_i}}{\mathrm{API_m}} \tag{25}$$

API는 선행 강우, 토양 특성, 식생, 지표면의 물리적 특성 및 증발산 등의 복합적 영향의 결과로 나타나는 토양 함수량과 밀접한 관계가 있으므로(Saxton and Lenz, 1967), 비의 형태로 나타낸 Eq. (25)의 관계는 충분히 합리적이라고 판단된다. API의 산정에 있어서 감소계수(decay coefficient)는 0.80~0.98의 범위를 가지며(Viessman and Lewis, 1996), 선행 일수(antecedent day)는 일반적으로 5일, 7일, 14일을 사용한다. 본 연구에서는 감소 계수는 0.90, 선행 일수는 14일을 사용하였는데, 이 값은 관습적이기는 하지만 선행함수 고려에 있어 필수적인 최적 값은 아니다(Heggen, 2001).

3. 모형의 적용

본 연구에서는 제안된 모형의 매개변수를 검정하고 모형의 적용성을 평가하기 위해 IHP (UNESCO'S International Hydrological Program) 집중 연구 유역인 평창강 유역(방림 수위관측소의 상류부 유역)을 대상 유역으로 선정하였으며(Fig. 3), 계산의 단순화를 위해 홍수 기간 동안 증발산은 발생하지 않는다고 가정하였다.

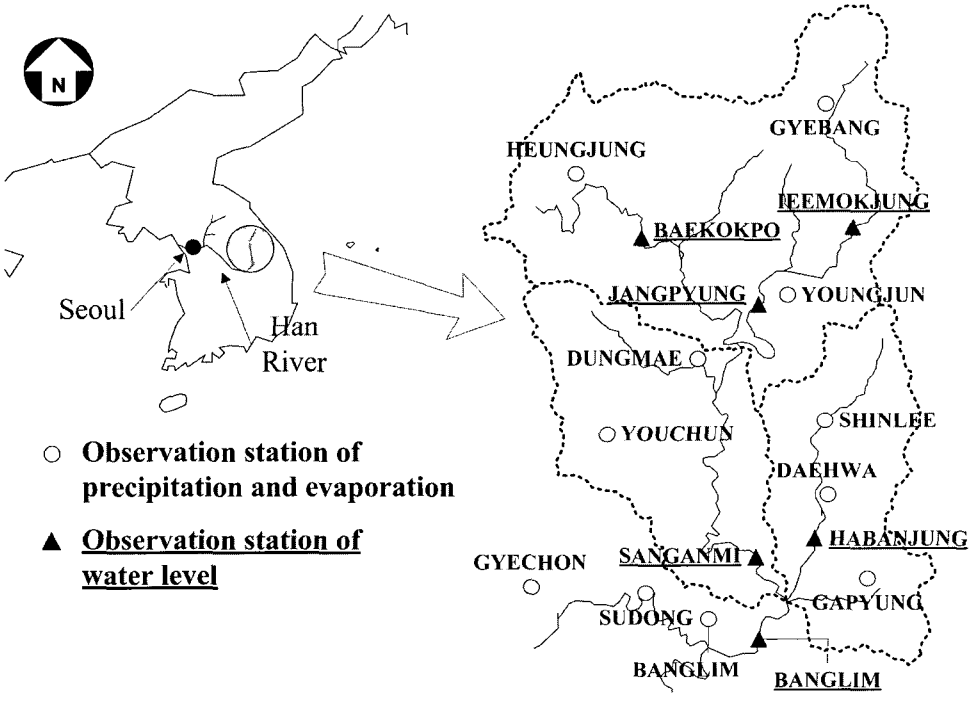


Fig. 3. The Pyeongchanggang River basin, Republic of Korea

Table 3에는 평창강 유역의 기본 현황을 나타내었다. 이 표에서 f_0 및 f_c는 수문학적 토양 그룹별 최대(최소) 침투능 값(Musgrave, 1955; Ventura County Watershed Protection District, 2002)을 이용하여 본 연구에서 산정한 값이며, 수문학적 토양 그룹별 면적은 한국건설기술연구원(1991)에서 제시한 값을 사용하였다.

3.1 모형 매개변수 최적화

본 모형의 적용을 위해서는 각 탱크의 유출공 계수인 c_1, c_{21}, c_{22}, c_3 및 각 유출 성분의 지체 효과를 나타나는 t_{d1}, t_{d2}의 6개 매개변수에 대한 검정과정이 필요하다. 본 연구에서 제시한 모형은 이산 시간 간격으로 계산되는 불연속 모형이므로, 매개변수 결정을 위한 목적함수나 제약조건의 수학적 형태에 제한받지 않으며 최적 개체군에 대한 수렴성이 높은 실수 코딩 유전 알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm, RCGA)을 사용하였다. 알고리즘의 적용에 있어 개체의 선택 방식은 토너먼트 선택(tournament selection)과 엘리티즘(elitism)을 동시에 사용하였고, 개체의 교배 방식은 단순 교배(simple crossover)와 산술적(볼록) 교배(arithmetical (convex) crossover)를 병용하였다. 또한 돌연변이 확률은 0.5%를 사용하였다.

목적함수, 즉 최적화하고자 하는 함수는 각 개체군의 적합도를 평가하는 기반이다. 유전 알고리즘의 적용에 있어서는 적정한 범위 내에서 양수 값으로 표준화된 목적함수를 일반적으로 적합 함수라고 한다. 본 연구에서는 적합 함수를 모의치와 실측치 사이의 결정계수로 설정하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{cal}}(t)\right)^2} \tag{26}$$

여기서, N은 모의된 유량의 개수, $Q_{obs}(t)$ 및 $Q_{cal}(t)$는 각각 시간 t에서의 관측 유량(cms) 및 모의 유량(cms)이고 $\overline{Q_{cal}}(t)$는 모의 유량의 평균값(cms)이다.

또한, 매개변수가 비이상적인 값을 취하는 것을 막고, 전역적인 해를 효과적으로 얻을 수 있도록 하기 위해서 매개변수의 물리적 의미에 기반하여 다음과 같은 제한을 설정하였다.

$$0 \le c_i \le 1,\ c_1 - c_{21} \ge 0,\ c_{21} - c_3 \ge 0,$$
$$c_{21} + c_{22} \le 1,\ \text{and}\ 0 \le t_{di} < P_{DUR} \tag{27}$$

여기서, c_i는 각 탱크의 유출공 계수이고 t_{di}는 각 유출 성분의 지체효과이며 P_{DUR}는 강우 지속시간(hr)이다.

매개변수를 최적화에 사용된 강우-유출 자료는 [950708](1995년 7월 8일) 및 [950808] 호우 사상 자료이다(건설교통부, 1996~2002). Table 4에는 최적화 대상 호우 사상의 기본 특성을 나타내었다. 이 표에서 H_m 및 f_i는 Eqs. (23)~(25)를 이용하여 산정한 것이다.

유전 알고리즘에 의해 최적화된 매개변수 및 최적화 결과는 Table 5 및 Figs. 4 and 5에 나타내었으며, 이 매개변수들은 모두 Eq. (27)의 제약조건을 만족한다. 각 호우 사상에 대한 적합함수 및 수문곡선을 살펴보면 상당히 양호한 수준에서 최적화가 이루어졌음을 알 수 있다.

Table 3. Main features of the Pyeonchanggang River basin (KICT, 1991)

Area (km^2)	Main channel length (km)	Mean basin slope (J. rad)	Infiltration capacity (mm/hr)	
			Maximum (f_0)	Minimum (f_c)
527.83	51.85	0.33291	76.670	5.581

Table 4. Storm properties for parameter optimization

Event	Duration(hr)	Storm depth(mm)	Q_{old}(cms)	H_m(mm)	f_i(mm/hr)
[950708]	86	159.82	0.34	12.507	47.215
[950808]	19	136.25	3.32	25.360	40.380

Table 5. Parameter optimization results by genetic algorithm

Parameter	c_1 (hr^{-1})	c_{21} (hr^{-1})	c_{22} (hr^{-1})	c_3 (hr^{-1})	t_{d1} (hr)	t_{d2} (hr)
Optimized value	0.1815	0.0431	0.2483	0.0098	3	9

Event	Value type	Peak time (hr)	Peak discharge (cms)	Fitness function (Coefficient of determination)
[950708]	Observed	52.0	559.5	0.9304
	Simulated	53.0	513.8	
[950808]	Observed	16.0	574.3	0.9285
	Simulated	16.0	624.3	

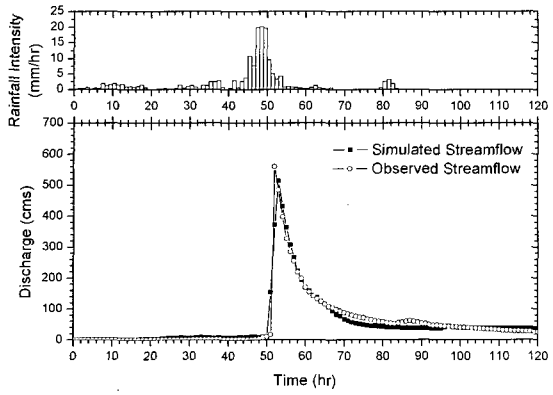


Fig. 4. Parameter optimization result for [950708]

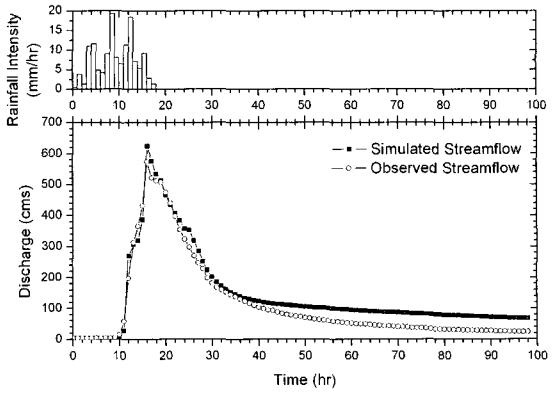


Fig. 5. Parameter optimization result for [950808]

Table 6. Storm properties for the model application

Event	Duration (hr)	Storm depth (mm)	f_i (mm/hr)	H_m (mm)	Q_{old} (cms)
[950715]	23	58.56	16.773	17.274	25.15
[950719]	39	71.49	16.485	20.059	23.13
[960629]	42	47.67	11.796	7.504	15.24
[960825]	60	71.90	67.494	116.075	2.79
[970715]	18	58.52	21.281	20.526	14.11
[980806]	83	291.28	20.166	13.200	57.52
[010629]	31	85.40	33.176	15.700	8.16
[010730]	56	59.80	42.798	65.300	21.50

3.2 모형의 적용성 평가 및 분석

본 연구에서는 실제 사상에 대한 모형의 적용성 평가에 있어 Table 5의 매개변수 값을 사용하였다. 이 매개변수 값은 평창강 유역의 토지 사용, 지형 및 지질, 하천 등의 유역 특성에 대한 대표적이고 복합적인 모형 고유의 값이다. 또한, 모형의 적용성 평가를 위해 IHP 연구 보고서(건설교통부, 1996-2002)에 수록된 평창강 유역의 1995년~2001년 호우 사상 중 일부를 사용했으며, 이 기간 동안 평창강 유역의 대규모 특성 변화는 없다고 가정하였다. 그러나 유역 선행 함수 상태의 경우 내제된 시변 특성을 고려, API를 이용하여 이를 고려할 수 있도록 하였다.

Table 6에는 대상 호우 사상을 나타내었다. 표에서 유역의 선행 함수 상태를 반영하는 f_i 및 H_m은 각각의 사상에 대해 Eqs. (23)~(25)로부터 산정하였다.

Figs. 6~13에는 Table 6의 각 호우 사상에 대한 모의 및 관측 수문곡선을 나타내었으며, Table 7에는 모형의 적용성 평가 결과를 요약하였다.

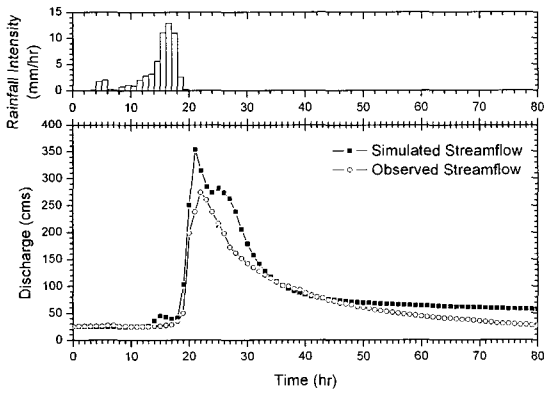


Fig. 6. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [950715]

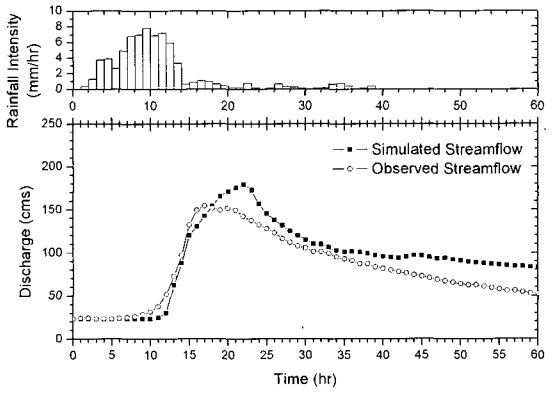


Fig. 7. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [950719]

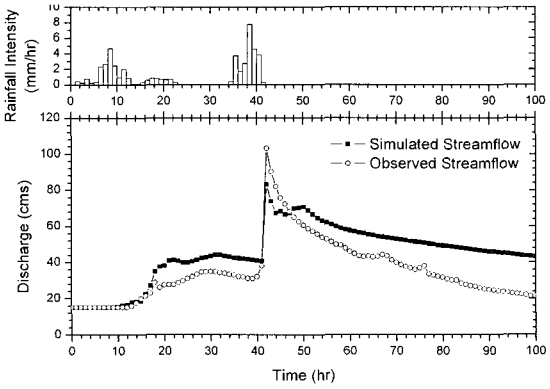


Fig. 8. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [960629]

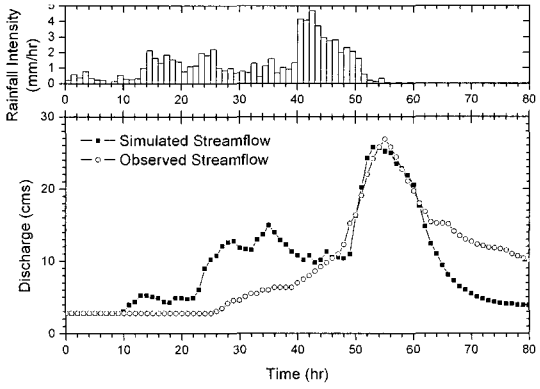


Fig. 9. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [960825]

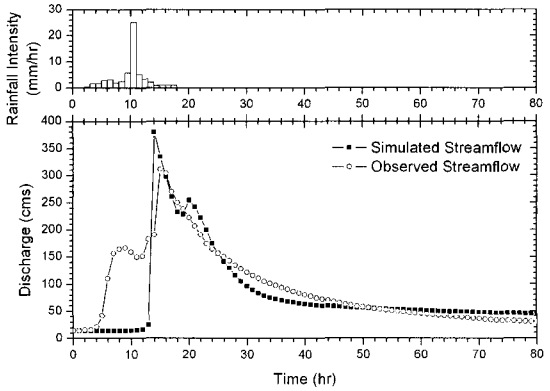


Fig. 10. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [970715]

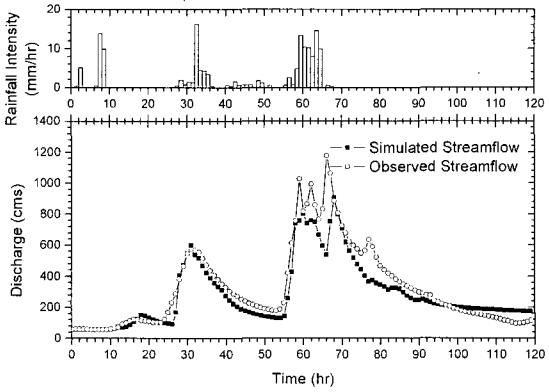


Fig. 11. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [980806]

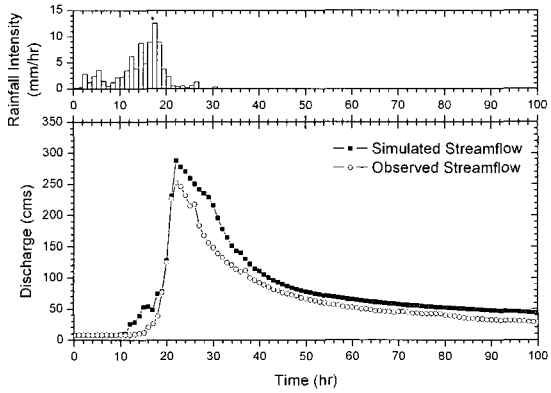


Fig. 12. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [010629]

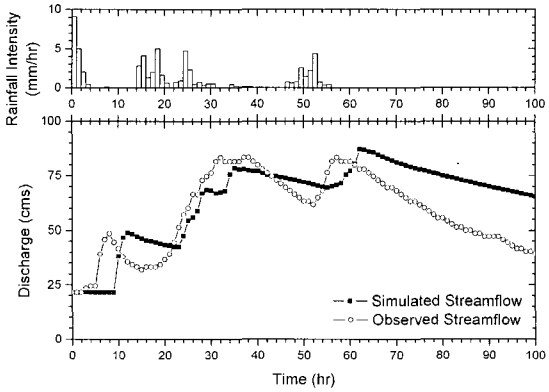


Fig. 13. Rainfall hyetograph and runoff hydrographs for [010730]

[950715] 및 [950719] 사상의 경우 수문곡선의 첨두 부분에서 모의치가 과대 산정되는 경향을 보이나, 상관계수가 약 0.93 이상으로 상당히 양호한 모의 결과를 나타내었다. [960629] 사상에 대해 나타난 모의치와 관측치 사이의 거동 차이는 본 연구 모형의 침투능 변화율과 실제 변화율의 차이에서 기인된 것으로 판단된다, 상관계수가 0.91 이상으로 대체로 양호한 모의 결과를 나타내고 있다. [960825] 및 [970715] 사상의 경우 상관계수는 비교적 낮으나, 강우 특성에 대한 수문곡선의 거동 및 첨두 부분에서의 모의치를 고려하면 상당히 주

Table 7. Application results

Event	Peak time (hr)		Peak discharge (cms)		Runoff volume (m^3)		Correlation coefficient
	Observed	Predicted	Observed	Predicted	Observed	Predicted	
[950715]	22	21	273.9	353.7	21.0E+06	26.6E+06	0.9695
[950719]	17	22	154.5	179.0	18.9E+06	22.4E+06	0.9307
[960629]	42	42	103.1	83.1	13.4E+06	17.6E+06	0.9124
[960825]	55	53	26.9	25.8	2.8E+06	2.9E+06	0.7427
[970715]	15	14	311.3	379.5	30.5E+06	29.7E+06	0.7808
[980806]	66	68	1,176.4	905.5	139.9E+06	121.5E+06	0.9497
[010629]	22	22	251.9	287.7	24.3E+06	31.3E+06	0.9845
[010730]	32	62	83.3	87.1	22.1E+06	25.0E+06	0.8346

목할 만한 결과라고 할 수 있다. [980806] 사상에 대해서는 세 번째 첨두 유출량에 대한 모의치가 다소 과소산정되었지만 관측 첨두 유출량이 1,000 cms가 넘는 대규모 호우 사상에 대해서도 상관계수 0.94 이상의 매우 양호한 모의 결과를 나타낸다. [010629] 사상의 경우 상관계수가 0.98 이상으로 모형의 적용성이 상당히 높게 나타났으며, [010730] 사상에 있어서는 복합 호우에 대한 관측 수문곡선의 추세 변화를 대체로 양호하게 모의하여 충분히 주목할 만한 결과라고 판단된다. 감소곡선부에 대한 전반적인 모의 결과를 살펴보면 대체로 관측치에 비해 약간 과대 산정되어 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 Eq. (26)에서 분모에 모의 유량의 평균치가 사용되어 매개변수 최적화 과정에서 평균치보다 상대적으로 유량이 적은 부분(감소곡선부)에 대해서는 결정계수가 과대산정(오차가 과소산정)된 결과에 의한 것으로 판단된다. 이러한 문제에 대해 향후 연구에서는 다양한 적합함수의 검토, 시변 매개변수의 사용, 수문곡선 구간별 최적화 과정의 적용 등을 해결 대안으로 선정해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 개념적인 강우-침투 과정을 고려하여 기존의 탱크 모형을 재유도하였으며, 모형의 구조는 두 개의 직렬 탱크와 하나의 병렬 탱크 및 침투 조절 요소로 구성된다. 침투 조절 요소에서는 단순히 시간의 함수로서가 아니라 토양 함수량의 함수로서 침투능을 산정하므로 합리적인 강우-침투 과정의 해석 가능성을 내포하며, 이를 통해 기존에 널리 사용되어 오던 탱크 모형에서 이 과정에 대한 개념적 제고가 가능하다. 또한 본 연구에서는 API를 이용하여 강우-유출 과정의 가장 중요한 지배 인자 중 하나인 유역 선행 함수 상태의 시변 특성을 고려하고자 하였다. 결론적으로 모형의 구조적 특성을 기준으로 판단하면 침투 조절 요소의 도입 및 선행 함수 상태의 고려에 의해 보다 합리적인 강우-침투-유출 과정으로의 접근 및 물리적 의미의 보강이 이루어졌다고 할 수 있다.

모형 매개변수의 최적화를 위해서는 실수 코딩 유전알고리즘을 사용하였으며, 매개변수 최적화 결과는 매우 양호한 수준에서 이루어졌다. 유전 알고리즘은 지역탐색과 전역 탐색 사이의 적절한 균형을 이루며, 극대(극소)치가 다양하게 존재하는 경우에 있어 무작위 탐색법이나 구배법에 비해 우월한 성능을 가지고 있으나 해의 정밀도 제고 능력이 부족하다고 할 수 있다 (Mitchell et al., 1993). 그러나 본 연구 모형과 같은 집중형 모형의 검정에 있어서는, 사용된 자료나 유역 대표값의 특성상 상당한 잡음과 불확실성을 내포하고 있기 때문에 최적 매개변수의 정밀도 상승보다는 전역성에 중점을 두게 된다. 그러나 모형 매개변수 최적화 알고리즘의 개선을 위해서는 하이브리드 형태의 유전 알고리즘(Etter and Masukawa, 1981; Kido et al., 1993)을 도입하여 정밀한 전역해의 탐색이 더욱 용이하도록 하는 것도 충분히 고려해볼 만한 향후 연구 과제이다.

평창강 유역의 계측 호우 사상 자료를 이용한 모형의 적용성 평가 결과, 모의치가 관측치의 변화 추세를 잘 나타내어 대체로 양호한 모의 결과를 나타내었다. 그러나 일부 복합 호우 사상에 대한 본 모형의 적용성을 제고하기 위해서는 시변 매개변수의 도입이나 매개변수 간의 비선형성 가정 등이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 유도된 모형은 더 많은 지점의 다양한 자료들에 대한 적용을 통해 충분히 검증되어야 하겠지만, 강우-침투 과정을 내포한 개념적 모형 유도에 있어서는 하나의 방향을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1996-2002). **국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.**

김성태, 채수권, 김건홍 (1999). "유전 알고리즘을 이용한 QUAL2E 모형의 반응계수 추정." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제4호, pp. 507-514.

김현영, 박승우 (1998). "유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화." **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제28권, 제2호, pp. 42-52.

박봉진, 차형선, 김주환 (1997). "유전자 알고리즘을 이용한 저류함수 모형의 매개변수 추정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 347-355.

박햇님, 조원철 (2002). "초기 함수량을 고려한 침투 모형의 유도." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제3호, pp. 285-294.

배덕효, 정일원, 강태호, 노준우 (2003). "유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 423-436.

이동률, 김형섭 (1999). "낙동강 갈수관리를 위한 의사결정 지원시스템." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-4호, pp. 455-465.

이상호 (1998). "탱크모형의 유출공 승수 변화를 고려한 홍수모의." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제1호, pp. 3-12.

한국건설기술연구원 (1991). **평창강유역의 수문특성조사**. 건기연 91-WR-111 연구보고서, pp. 4-18.

Bauer, S.W. (1974). "A modified Horton equation during intermittent rainfall." *Hydrological Sciences Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 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.

Etter, D.M. and Masukawa, M.M. (1981). "A comparison algorithms for adaptive estimation of the time delay between sampled signals." *1981 IEEE International Conference on Genetic Acoustics*, Speech and Signal Processing, Vol. 3, pp. 1253-1256.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co. Inc., N.Y.

Heggen, R.J. (2001). "Normalized antecedent precipitation index." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 5, pp. 377-381.

Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Michigan.

Kido, T. Kitano, H., and Nakanishi, M. (1993). "A hybrid search for genetic algorithms: combining genetic algorithms, tabu search, and simulated annealing." *5th International Conference on Genetic Algorithms*, Editied by Forrest, S. pp. 641.

Mitchell, M., Holland, J.H., and Forrest, S. (1993). "When will a genetic algorithm outperform hill climbing?" *Advances in Neural Information Processing Systems*, Edited by Cown, J.D, Tesauro, G., and Alspector, J. Morgan Kaufmann, San Mateo, C.A.

Mohan, S. (1997). "Parameter estimation of nonlinear muskingum models using genetic algorithm." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 137-142.

Musgrave, G.W. (1955). "How much of the rain enters the soil?" *USDA Water Yearbook of Agriculture*, Washington, D.C., pp. 151-159.

Saxton, K.E. and Lenz, A.T. (1967). "Antecedent retention indexes predict soil moisture." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, No. HY4, pp. 223-241.

Sugawara, M. (1972). *A Method for runoff analysis*. Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo. (in Japanese)

van Es, H.M. (1993). "Evaluation of temporal, spatial, and tillage-induced variability for parameterization of soil infiltration." *Geoderma*, Vol. 60, No. 1/4, pp. 187-199.

Ventura County Watershed Protection District (2002). *Technical guidance manual for stormwater quality control measures*. Appendix E Hydrologic Soil Group, p. E-1.

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

Viessman, W., Jr. and Lewis, G.L. (1996). *Introduction to hydrology*. 4th Ed., HarperCollins, New York.

Yue, S. and Hashino, M. (2000). "Unit hydrographs to model quick and slow runoff components of streamflow." *Journal of Hydrology*, Vol. 227, pp. 195-206.

(논문번호:05-104/접수:2005.07.18/심사완료:2005.11.03)