

## 선행강우지수를 고려한 홍수유출 시뮬레이션 모형 Flood Runoff Simulation Model by Using API

허 창 환\* / 임 기 석\*\* / 안 경 수\*\*\* / 지 홍 기\*\*\*\*

Heo, Chang Hwan / Lim, Kee Seok / Ahn, Kyoung Soo / Jee, Hong Kee

### Abstract

This study is aimed at the development of a deterministic runoff model which can be used for flood runoff. The model is formulated by the watershed runoff model. Based on the assumptions that runoff system is nonlinear, the proposed watershed runoff model is the conceptual model.

In the model structure, the conceptual model divides the runoff system into a surface structure and a subsurface structure corresponding to the surface flow, and inter flow and ground water flow respectively. The lag time effect of surface can be represented by the sub-tank of surface structure in the conceptual model.

The parameter calibration of inter flow and ground water flow in the subsurface structure of the conceptual model is performed by separating the components with numeric filter. The runoff coefficient( $a_2$ ) is expressed as the function of antecedent precipitation index(API). The parameters with the surface flow can be calibrated with the runoff coefficient( $a_1$  and  $a_{11}$ ) in the conceptual model. In the conceptual model, an algorithm is developed to calibrate the parameters automatically based on efficiency criteria. The comparative study shows that simulated value from the conceptual model well agreed to observed value.

**keywords** : deterministic runoff model, watershed runoff model, conceptual model, antecedent precipitation index(API)

### 요 지

본 연구의 목적은 홍수유출해석을 위한 확정론적 유출모형의 개발에 있으며, 유출과정은 비선형으로 취급하여 단순화시킨 개념적 모형을 유역유출모형으로 제시하였다.

개념적 모형의 구조는 지표유출을 일으키는 지표면과 지표하유출을 일으키는 토양층으로 구분하고 이들 각 구조를 지표와 지표하로 나누어 유출과정을 개념화하였으며, 지표흐름의 지체효과는 부탱크를 도입하여 나타내었다. 지표하 구조에서 중간 및 지표하 흐름의 성분들은 수치 filter를 이용하여 분리하였다. 유출계수  $a_2$ 는 선행강우지수의 함수로 표현하였으며, 지표흐름에 관계되는 매개변수인 유출계수( $a_1$ ,  $a_{11}$ )는 민감도를 분석하여 결정하였다.

본 연구에서 개념적 모형의 알고리즘은 효율도를 기준으로 자동 추출되게 하였으며, 개념적 모형에서 시뮬레이션시킨 결과는 실측 홍수수문곡선에 매우 접근하고 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 확정론적 유출모형, 유역유출모형, 개념적 모형, 선행강우지수(API)

\* 충주대학교 토목공학과 강사  
\*\* 영남대학교 토목공학과 대학원 박사과정  
\*\*\* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수  
\*\*\*\* 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 교수

## 1. 서론

유역의 강우-유출관계에서 유역유출은 공간적으로 그 특성이 상이하고 시간적으로 변화가 심하여 유역유출계의 상태는 유역에서 발생한 선행의 수문사상에 크게 지배를 받고 있다. 그러므로 유역유출과정을 정확히 모의하기 위해서는 유역유출계를 동적계로 취급해야 한다. 이를 위해서는 유역특성을 나타내는 물리변수를 정확히 추적하고 이들 변수가 수문기상학적 변수와 어떤 관련성이 있는가에 대한 깊은 연구가 선행되어야 한다. 또한 유역의 유출과정을 나타내는 과정변수는 유역의 지표유출, 중간유출 및 지하유출 등의 유출상태, 저류상태, 침투 및 증발산 등의 정량적 성질을 나타내는 것으로 이들 변수와 과정변수의 상호관련성을 규명하기 위해서는 유역유출계의 거동과 과정변수간의 상관관계가 정립되어야 한다.

확정론적 방법에 의한 유출모형은 유역의 수문기상현상과 물리 및 과정변수간의 관계를 구체적이고 명확한 수학적 이론의 근거에 의해서 설정하고 이들 매개변수의 거동을 정확히 표현해야 한다. 그러나 유역의 강우-유출과정이 강한 비선형성을 지니고 있고 유역유출계가 시간에 따라 동적거동을 하는 시변계이지만 실제 적용의 어려움으로 인하여 선형근사 및 시불변계로 접근하고 있는 실정이다. 특히, 유역유출계의 과정변수는 유역의 물리계인 토양 및 토지이용상태와 선행수문사상에 따라 유역의 습윤조건이 달라지므로 이를 반영할 수 있는 유역유출계의 수학적 모형의 최적화와 선행수문사상을 고려한 과정변수의 합리적인 추정방법 등의 연구가 필요하다.

지금까지 유역유출계에 적용하는 모형은 구조의 복잡성을 피하고 간단하게 표현할 수 있는 유출과정의 개념화가 추구되어 왔으며, 이들 모형의 매개변수와 유역의 물리변수 혹은 유출의 과정변수 사이에서 상호 관련성을 찾는 데 많은 연구가 있었다. 그 대표적인 유출모형으로서 Tank 모형은 유역을 일련의 저수지(선형 및 비선형)의 조합으로 취급하였으며, Dawdy 및 O'Donnell(1965)은 유출모형의 기본구조가 Tank 모형과 근본적으로 유사한 2단 탱크와 부탱크로 구성되는 Dawdy-O'Donnell 모형을 개발하였다. Wood와 Cooper(1980)는 실시간 홍수예측을 수행할 수 있는 입·출력모형을 제시하고 이 모형의 매개변수 추정을 위해서 선행강우지수(Antecedent Precipitation Index : API)를 이용하였다. 특히,

Bergstorm과 Forsman(1973)은 강우에 의한 유출역을 상부역(upper zone ; surface flow)과 하부역(lower zone ; inter & base flow)으로 구분한 개념적인 확정론적 강우-유출모형을 연구하였으며, Bergstorm(1975)은 개념적 강우-유출모형을 발전시켜 상·하부역의 유출에 시간-면적 변환계를 부착하여 유역유출을 추정하는 HBV(Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning)모형을 개발하였다. 또한 지홍기(1989)는 홍수예측을 위한 확정론적 유출모형의 연구에서 시간유출량을 산정하기 위한 유역유출모형을 개발하여 낙동강 위천유역을 대상으로 HBV 모형과 Tank 모형을 적용·분석한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 유역유출은 유역의 습윤상태를 설명하는 인자인 유역의 선행수문사상으로부터 그 지수를 이용할 수 있도록 강우-유출과정에 있어서 토양 습윤상태가 강우-유출계내에서 동적거동을 하는 것으로 취급하여 강우-유출과정의 개념적 알고리즘을 확립토록 하였다. 한편 모형의 기본구조는 유역유출과정을 지표유출과 지표하유출(중간 및 지하유출 포함)로 나누었으며, 각각의 유출성분을 대변할 수 있는 지표와 지표하에서 유출이 발생하는 유역유출과정으로 모형화하여 홍수유출을 해석하고자 하였다.

## 2. 유역유출모형의 개념

### 2.1 유역유출 모형화 과정

유역유출계에서 강우는 지표면에 강하하여 일부는 지표를 따라 유출되고 나머지는 손실이 되는데 그 가운데 일부는 증발이 되고 그 일부는 토양으로 침투가 된다. 지표로부터 공급된 침투수는 토양습윤상태(soil moisture storage)로 존재하면서 식물근을 통하여 증산이 되거나 지하수로 충전이 되며, 나머지가 중간유출로 나타나게 된다. 지하로 침투된 지하수는 서서히 용출되어 기저유출로 나타난다. 따라서 유출과정은 그림 1(a)과 같이 지층사이에서 물이 이동하면서 지표유출, 중간유출 및 기저유출 등의 성분들이 합성되어 유역유출을 형성하게 된다.

그러나 유역내의 토양 및 지질의 구조와 분포가 공간적으로 다양하기 때문에 중간유출이나 지하수유출의 성분을 분리한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 그러므로 유역의 유출과정을 보다 단순화시키면 그림 1(b)과 같이 지표와 토양층의 구조로 나눌 수 있으며, 유출성분은 각각 지표면유출과 지표하유출의 형태가 되어 총

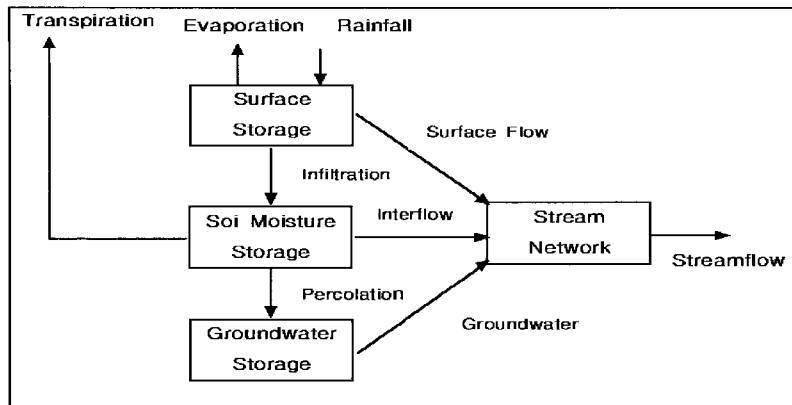


그림 1(a). 유역유출 시스템

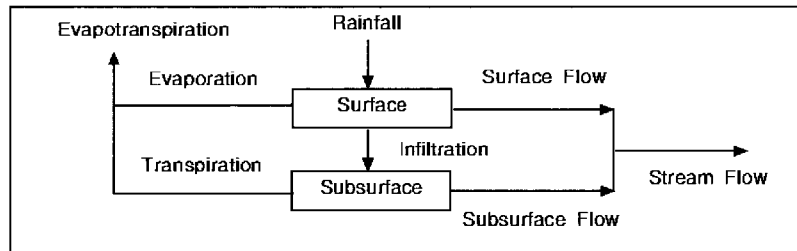
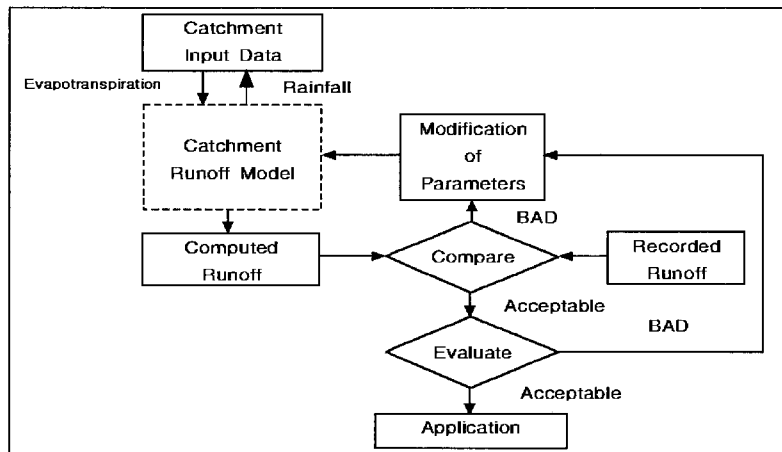


그림 1(b). 유역 유출시스템의 개념도



유출로 나타나게 된다. 이때 증발과 증산은 각각 지표와 토양층에서 발생하며, 강우-유출 손실(증발산 및 저류) 사이에는 물수지가 항상 존재하게 된다.

따라서 유역유출과정을 모형화하기 위한 접근방법은 먼저 가상의 유역유출모형을 가정하고 이 모형에 유역

의 자료가 입력되어 유출량을 계산함으로써, 이를 실제 유출량과 비교하여 적합성을 판단하게 된다. 이때 모형의 계산치와 실측치가 일치하지 않을 때는 모형의 매개 변수를 조정하든지 아니면 모형의 수정을 실시하여 최적의 유역유출모형을 설정한다. 이러한 유역유출의 모

형화 과정은 그림 2와 같으며, 모형의 수정이나 매개변수의 조정은 많은 수문사상들을 대상으로 실시하고 이를 특정 수문사상에 적용하든가 아니면 다른 수문사상에 적용성을 확인함으로써 완전한 유역유출모형을 확립하게 된다.

## 2.2 유역 유출모형의 구조

### 2.2.1 모형의 일반

유역유출계에서 유출성분은 지표유출, 중간유출 및 지하수 유출 등으로 구분하고 있으나 이들 각 성분의 엄격한 분리가 매우 어렵다. 먼저, 지표면유출은 유역의 지표면 처리상태에 따라 달라지며, 선행수문사상에 크게 지배된다. 다음으로, 중간유출은 강우가 지표면을 침투하여 식물근 혹은 지표하에 일시적으로 저류되었던 토양함수로서 서서히 유출을 일으키게 되며, 이는 토양의 깊이나 토지이용상태에 따라 크게 좌우된다. 마지막으로, 지하유출은 지표면을 침투한 강우가 지표하의 심층부까지 침투된 후에 장시간 지속되는 유출의 형태로 나타나게 되며, 이는 대수층의 깊이와 지하불투수층의 구조에 따라 달라진다.

따라서 본 연구에서는 유출과정을 개념화시킨 Dawdy-O'Donnell 모형을 기본형으로 하는 개념적 모형을 대상으로 이들 모형의 구조와 이론 및 모형의 매개변수 추정방법 등을 개발토록 하였다.

### 2.2.2 개념적 모형

유역유출계에 있어서의 유출과정은 그림 1(a)와 같이 지표면 유출, 중간유출 및 지하수유출 등의 성분들에 의해서 총유출이 형성되며, 이 가운데 중간유출과 지하수유출은 성분분리가 불명확하므로 이들을 동일한 성분으로 취급한다면 유역유출과정은 그림 1(b)와 같이

단순화시킬 수 있다. 일반적으로 유출구조는 지표유출을 일으키는 지표면과 지표하유출을 일으키는 토양층으로 구분하고 이들 각 구조를 지표와 지표하로 나누어 유출과정을 개념화할 수 있다.

따라서 개념화된 유출모형의 유출과정은 지표에 내린 강우의 일부가 증발이나 침투가 되고 나머지는 지표면유출로 나타나며, 지표하로 침투된 침투수는 일부가 증산이 되거나 지하수로 보충이 되고 나머지는 지표하유출로 기여하게 된다. Dawdy-O'Donnell은 지표면 유출이 유역의 지표면 상태에 따라 저류 및 차단이 되어 유출의 지체가 발생하게 됨으로 이를 반영할 수 있도록 그림 3과 같이 부탱크를 부착한 유출구조를 제안한 바 있다. 이와 같이 하천유출은 지표의 지표면유출과 지표하의 지표하유출의 합으로 이루어지며, 유출모형의 구조내에서 강우, 증발산, 침투, 저류 및 유출 등의 수문순환과정은 완벽한 물 수지가 일어나도록 하고 있다.

## 2.3 유역유출모형의 이론

### 2.3.1 유출모형의 물수지

유역유출계의 수문순환과정은 장기적인 관점에서 물수지가 이루어지고 있으며, 유역유출모형에 있어서 유출과정을 나타내는 모형의 거동은 근본적으로 물수지를 이루어야 한다. 즉, 유출모형에서 출력되는 유출량( $Q$ )은 지표면 및 지표하를 통과하는 유출량( $Q_U$  및  $Q_L$ )의 합이며, 이는 지표면에 강하한 강우량( $R$ )에서 지표면 및 지표하의 저류변화량( $\Delta S_U$  및  $\Delta S_L$ )과 손실량인 증발산량( $E$  및  $T$ )을 제외한 값과 같다.

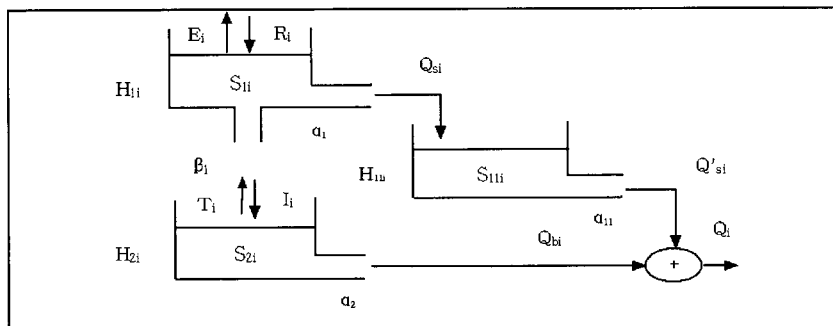


그림 3. 개념적 모형의 개념도(O'Donnell Model)

$$Q = Q_U + Q_L \quad (1)$$

$$= R - (\Delta S_U + \Delta S_L) - (E + T)$$

한편 유출모형의 각 구조내부에서도 물수지는 근본적으로 유지되어야 하므로, 지표면에서의 지표유출량 ( $Q_U$ )은 강우량에서 증발량 ( $E$ ), 침투량 ( $I$ ) 및 저류 변화량 ( $\Delta S_U$ )을 제외한 값과 같으며, 지표하에서의 지표하 유출량 ( $Q_L$ )은 지표면으로부터 발생한 침투량에서 증산량 ( $T$ )과 지표하의 저류변화량 ( $\Delta S_L$ )을 제외한 값과 같다.

$$Q_U = R - (E + \Delta S_U) - I$$

$$Q_L = I - (T + \Delta S_L) \quad (2)$$

### 2.3.2 개념적 모형

개념적 모형의 유출과정은 지표면에 입력된 강우( $R_i$ )는 증발( $E_i$ ), 지표하로의 침투( $I_i$ ) 및 저류( $S_{li}$ )가 되고 나머지는 부탱크( $Q'_{si}$ )로 유출이 된다. 부탱크에 유입된 물은 다시 유출( $Q'_{si}$ )이 되는데 이는 부탱크의 저류량 ( $S_{lii}$ )에 지배된다. 또한 지표하에 침투된 물은 서서히 증산( $T_i$ ) 및 저류( $S_{2i}$ )가 되면서 유출( $Q_{bi}$ )에 기여하게 된다.

따라서 이들 각 모형의 구조에서 발생하는 유출과정을 수식화하면, 지표면의 침투를 나타내는 매개변수  $\beta$ 와 지표하 유출성분을 나타내는  $\alpha_2$ 는 선행의 강우에 밀접한 관계가 있으므로 선행강우지수의 함수로 표현할 수 있으며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$Q_{si} = \alpha_1 S_{li}$$

$$Q'_{si} = \alpha_{11} S_{lii}$$

$$I_i = \beta(\text{API})S_{li}$$

$$Q_{bi} = \alpha_2(\text{API})S_{2i} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  및  $\alpha_{11}$ 는 각각 지표면 및 지표하와 부탱크의 유출계수이고  $\beta$ 는 지표면에서 지표하로 침투되는 침투계수이다.

한편 지표면 및 지표하와 부탱크의 저류상태를 각각의 저류고( $H_{li}$ ,  $H_{2i}$  및  $H_{lii}$ )로 표시할 때 평균저류량 ( $S_{li}$ ,  $S_{2i}$  및  $S_{lii}$ )은 시간단계 전후의 저류고( $H_i$  및  $H_{i-1}$ )의 평균으로 표시된다.

$$S = \frac{1}{2}(H_{li} + H_{li-1})$$

$$S_{lii} = \frac{1}{2}(H_{lii} + H_{lii-1})$$

$$S_{2i} = \frac{1}{2}(H_{2i} + H_{2i-1}) \quad (4)$$

그러나 저류상태는 선행강우의 조건에 따라 달라지므로 초기조건인 지표면, 지표하 및 부탱크의 저류고 ( $H_{10}$ ,  $H_{20}$ ,  $H_{110}$ )를 계산해야 하지만 이를 구하기가 용이하지 않으므로 초기조건을 경험적으로 가정하고 경과시간을 부여함으로써 계산오차를 줄일 수 있다.

$$H_{10} = H_{1i}$$

$$H_{20} = H_{2i}$$

$$H_{110} = H_{11i} \quad (5)$$

따라서 개념적 모형의 유출과정에 있어서 출력된 유출( $Q_i$ )은 부탱크의 유출( $Q'_{si}$ )과 지표하의 유출( $Q_{bi}$ )의 합으로 표시할 수 있다.

$$Q_i = Q'_{si} + Q_{bi} \quad (6)$$

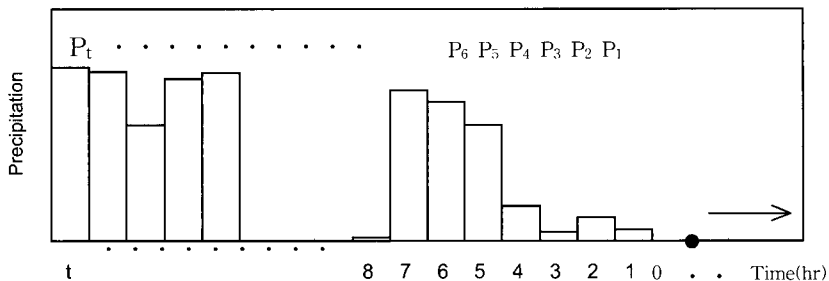


그림 4. 선행강우 시계열의 구조

### 3. 모형의 매개변수 추정기법 및 예측기법

#### 3.1 선행강우지수

유역유출계에서 유출모형의 하부구조인 토양습윤상태는 선행강우지수에 지배되며, API는 역지수형과 지수형으로 구분하고 있다. 일반적으로 API는 장기유출과 단기유출에 따라 그 적용을 달리하고 있으며, 가중지수를 달리하여 적용하고 있다. 따라서 API의 결정에 있어서 강우시계열이 그림 4와 같이 발생하고 있을 때 각 시계열 API는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} API_t &= a_1P_1 + a_2P_2 + \dots + a_tP_t \\ API_t &= b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_tP_t \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $P_t$ 는 기준 강우보다  $t$  시간 선행하는 강우량이며,  $a$  및  $b$ 는 경과시간에 따른 가중지수이다. 즉,  $a$ 는 1 보다 작은 상수이므로  $t$ 의 역수로 표현되며,  $t$ 의 멱함수이다.

#### 3.2 모형의 매개변수와 선행수문사상

앞에서 제시한 유역유출모형의 형태는 개념적 모형으로서 유출구조를 지표면과 지표하로 나누었으며, 모형에서 출력되는 지표면 유출성분은 부탱크를 부착하여 유역의 지체를 계산하고 지표하 유출성분은 토양층으로부터 발생하는 중간 및 지하수 유출성분을 합한 값을

계산토록 하였다. 그러므로 토양층으로부터 중간 및 지하수 유출이 발생하는 지표하의 토양습윤상태는 선행수문사상에 전적으로 지배를 받게 된다.

따라서 앞에서 정의한 모형매개변수의 초기치 추정에 있어서 지표하의 유출계수( $\alpha_{2i}$ )와 지표하로 유입되는 침투계수( $\beta_i$ )는  $API_i$ 에 의해서 추정할 수 있으며, 유출계수 및 침투계수는 시간에 따라 변화하는 것으로 취급하여 식 (8)~(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_i = f(API_i) = a^{API_i} b \quad (8)$$

$$\alpha_{2i} = f(API_i) = c^{API_i} d \quad (9)$$

여기서,  $a, b, c$  및  $d$ 는 회귀상수이다.

#### 3.3 예측과정 및 프로그램 구성

하천의 유출과정을 예측하기 위해서는 앞에서 제시한 개념적 모형을 대상으로 매개변수의 추정과정을 거쳐서 유출계산이 되므로 유역의 유출과정과 모형의 프로그램구성은 그림 5와 같다. 먼저, 모형의 매개변수 추정은 지표면 유출성분을 계산하는데 사용된 개념적 모형을 대상으로 중간유출 및 지표하유출 성분을 계산하는데 사용된 모형의 매개변수는 실측수문곡선과 계산수문곡선을 비교하여 그 적합성 검정을 실시함으로써 최적의 모형매개변수를 설정토록 하였다. 한편 모형매개

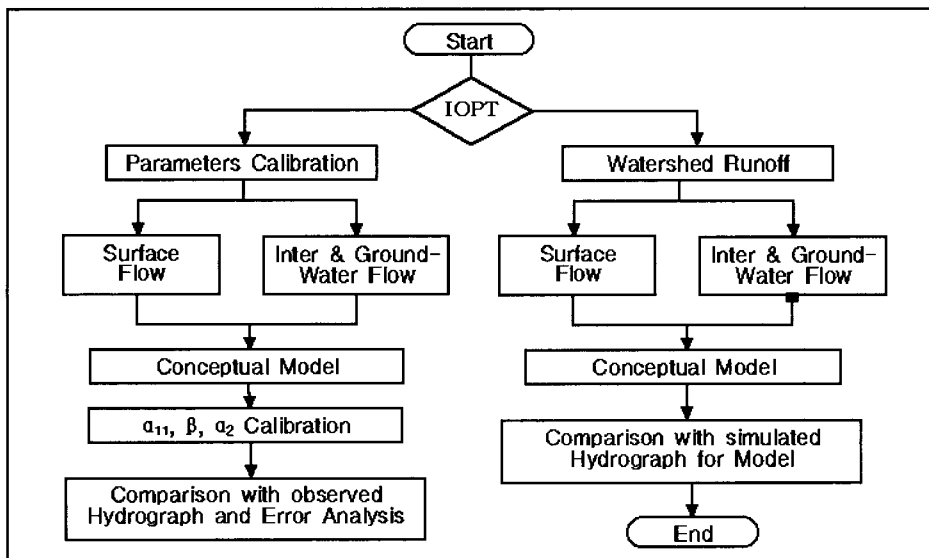


그림 5. 모형의 매개변수 조정 및 유출계수 계산절차

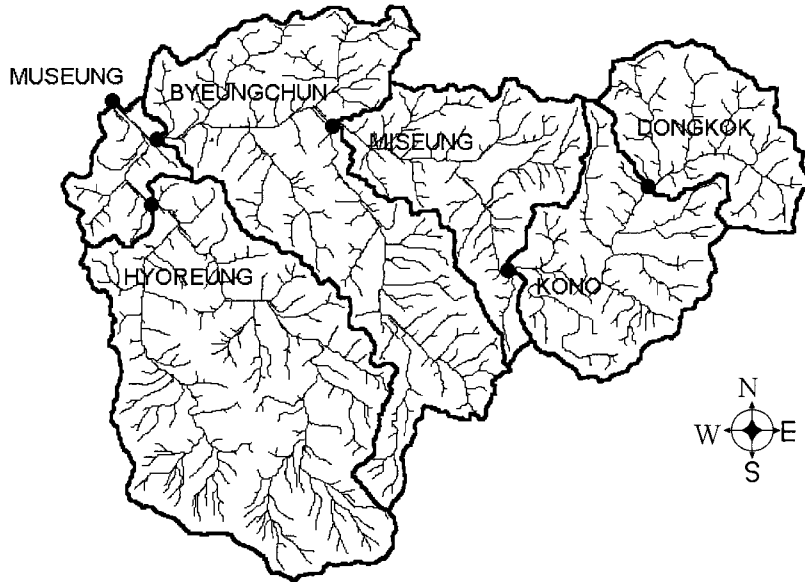


그림 6. 분석 유역의 수계구성 및 수위표 지점

변수의 조정에 있어서 모형의 유출성분을 발생시키는 지표면유출의 매개변수( $\alpha_{11}$ )와 지표하유출의 매개변수( $\beta$  및  $\alpha_2$ )는 각각 민감도 분석을 실시하여 최적의 매개변수가 되도록 하였다.

#### 4. 적용 및 분석

본 연구에서 제시한 개념적 모형에 대하여 이론과 알고리즘을 실제 하천유역에 적용하여 유역유출계산을 실시하였다. 적용대상 유역은 비교적 정밀한 강우, 수위 및 유량 등의 자료가 있는 IHP 대표유역인 낙동강 위천유역( $A=472.52 \text{ km}^2$ )을 선정하였다.

##### 4.1 유역유출계의 구성

적용대상 유역인 위천유역의 수계구조는 그림 6과 같이 본류와 비교적 큰 1개의 지류로 구성되어 있으며, 수위표 지점(무성(No.1), 병천(No.2), 무성(No.3), 고노(No.4), 동곡(No.5), 효령(No.6))을 기준으로 6개의 소유역으로 분할하여 매개변수의 추정과 분석을 실시하였다.

##### 4.2 수문자료의 분석 및 성분분리

위천유역 내에서 관측되고 있는 수문자료는 강우량, 증발량 및 수위(유량) 등이 있으며, 본 연구에서는 소유

역별 평균강우량과 선행강우량은 11개 강우관측소를 기준으로 Thissen 계수에 의하여 산정하고 이를 이용하여 소유역별로 각 평균강우량과 선행강우량을 계산하였으며, 모형의 매개변수를 추정하였다.

유역유출계에서 홍수수문곡선의 유출성분은 응답시간을 달리하는 지표면유출, 중간유출 및 지하수유출로 구성이 되어 있으나 실제 하천에서 관측된 수문곡선은 이들 성분이 합성된 형태로 나타나므로 실제하천의 자료로부터 명확한 성분분리점을 찾기가 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 위천유역의 6개 수위표 지점을 대상으로 5개의 호우사상(1983. 6.20, 1986. 9.19, 1987. 7.14, 1987. 7.22, 1989. 7.11발생)에 대하여 수치 filter에 의한 성분분리를 수행하였으며, 중간유출과 기저유출에 대한 응답시간  $T_{c1}$  및  $T_{c2}$ 를 구하기 위하여 관측 수문곡선의 감소부 유량에 대하여 기울기  $\alpha_1'$  및  $\alpha_2'$ 를 추정토록 하였다.

따라서 각 호우별로 추정된 응답시간  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$  및 기울기  $\alpha_1'$ ,  $\alpha_2'$ 의 평균치는 표 1과 같다. 이는 본 분석 유역의 유출성분을 나타내는 물리적 특성으로서 많은 사상의 호우를 적용할 때 이는 유출분리의 기준이 될 수 있다.

표 1. 중간유출 및 지하수유출의 성분분리를 위한 매개변수

Basin	Interflow		Groundwater Flow	
	$\alpha_1'$ (1/hr)	$Tc_1$ (hr)	$\alpha_2'$ (1/hr)	$Tc_2$ (hr)
No. 1	0.0621	16.11	0.0140	71.34
No. 2	0.0462	21.66	0.0138	72.24
No. 3	0.0383	26.08	0.0367	57.25
No. 4	0.0409	24.45	0.0159	62.92
No. 5	0.0372	26.92	0.0081	123.41
No. 6	0.0479	20.89	0.0085	117.40

표 2. 개념적 모형의 매개변수 초기치

Basin	$H_{10}$ (mm)	$H_{20}$ (mm)	API (hr)	$\alpha_1$	$\alpha_{11}$	$\beta_i = a^{**}API_i^{*}b$		$\alpha_{2i} = c^{**}API_i^{*}d$	
						a	b	c	d
No.1	0.0	50.0	72	0.300	0.585	0.933	0.95	0.998	0.006
No.2	0.0	50.0	72	0.296	0.580	0.938	0.95	0.999	0.006
No.3	0.0	50.0	72	0.292	0.540	0.943	0.95	0.999	0.006
No.4	0.0	50.0	72	0.277	0.525	0.948	0.95	0.998	0.007
No.5	0.0	50.0	72	0.288	0.495	0.948	0.95	0.998	0.007
No.6	0.0	50.0	72	0.257	0.510	0.953	0.95	0.999	0.007

4.3 모형의 매개변수 추정

개념적 모형의 매개변수 추정은 모형의 효율도를 기준으로 자동추정이 될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제시된 개념적 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 각 수위표 지점을 대상으로 기왕의 5개 호우로부터 분석을 실시하였으며, 호우사상별 모형의 매개변수들을 분석해보면 일정한 값에 수렴되지는 않으나 대체로 유사한 값들이 추정되는 것을 알 수 있었다.

지표면에서 입력성분은 강우가 되며, 출력성분은 지표면유출과 증발산, 침투량으로 나눌 수 있다. 매개변수  $\alpha_1$ 을 추정하기 위해서는 유역의 강우량과 수차 filter에 의한 지표면 성분으로부터 평균  $\alpha_1$ 을 계산하였다. 이 과정에서  $\alpha_1$ 은 단순한 지표면 저류를 나타내는 매개변수가 되며, 이 매개변수로만으로는 유역의 지체특성을 나타낼 수 없다. 수문곡선의 상승부를 잘 나타낼 수 있도록 부탱크를 도입하여 매개변수  $\alpha_{11}$ 을 추정함으로써 지체효과를 모의할 수 있도록 하였다.  $\alpha_{11}$ 을 추정하기 위해서는  $\alpha_1$ 에 의한 지표면유출을 입력으로 하여 가정된  $\alpha_{11}$ 에 의한 유출계열과 유출성분분리에 의한 지표면유출 수문곡선의 적합도를 관측치와 계산치의 절대오차의 평균을 나타내는 RMS(Root Mean Square)와 상대오차의 평균을 나타내는 Bias가 최소로 되는  $\alpha_{11}$ 을 최적매개변수로 추정하였다.

지표하의 입력성분은 지표면의 침투계수에 의한 침

투량이 되고 유출성분을 지표하의 유출수문곡선으로 나타낼 수 있으며, 입력과 출력관계를 설명하는 상태방정식은 평균저류고에 의하여 표현된다. 한편 지표하 유출성분을 나타내는 매개변수  $\alpha_{2i}$ 와 지표면침투를 나타내는 매개변수  $\beta_i$ 는 API<sub>i</sub>와 밀접한 관계가 있다는 가정으로부터 수차 filter에 의한 유출성분분리에서 각 단계의 지표하 유출을 종속변수로 취하고 API<sub>i</sub>를 독립변수로 취하였으며, 이들 관계는 회귀분석을 실시하여 API<sub>i</sub>와  $\alpha_{2i}$  및  $\beta_i$ 의 관계를 유도하고 이로부터  $\alpha_2$ 와  $\beta$ 의 값을 추정하는 초기치로 사용하였다.

개념적 모형의 매개변수 추정은 지표면유출의 매개변수  $\alpha_{11}$ , 지표하로의 침투를 나타내는 매개변수  $\beta$  및 지표하유출의 매개변수  $\alpha_{2i}$ 로 나누어 각각의 매개변수에 대한 민감도분석을 실시토록 하였다.

먼저, 지표면유출을 표현하는 부탱크의 유출계수  $\alpha_{11}$ 은 각각 0.400부터 0.680까지 0.005씩 증가시키면서 Bias 및 RMS를 계산하였으며, 이들 값이 최소가 되는 값을 표 2에 나타난 바와 같이 초기치로 사용하였다.

다음으로, 지표면의 침투계수  $\beta$ 와 지표하의 유출계수  $\alpha_{2i}$ 의 초기치를 구하기 위하여 API<sub>i</sub>의 함수로 표시하였다. 침투계수  $\beta_i$ 의 회귀계수 a 및 b 그리고 지표하의 유출계수  $\alpha_{2i}$ 의 회귀계수 c 및 d의 값을 -25%에서 +25%까지 5% 씩 증가 및 감소시키면서 Bias와 RMS가 최소가 되는 값을 초기치로 구하였다.



표 3. 개념적 모형의 최적 매개변수

Basin	$\alpha_1$	$\alpha_{11}$	$\beta$	$\alpha_2$	AMC-II
No. 1	0.300	0.585	0.956	0.006	65.8
No. 2	0.296	0.580	0.959	0.007	66.9
No. 3	0.292	0.540	0.957	0.007	69.2
No. 4	0.277	0.525	0.958	0.008	73.1
No. 5	0.288	0.495	0.958	0.008	76.2
No. 6	0.257	0.510	0.957	0.007	64.2

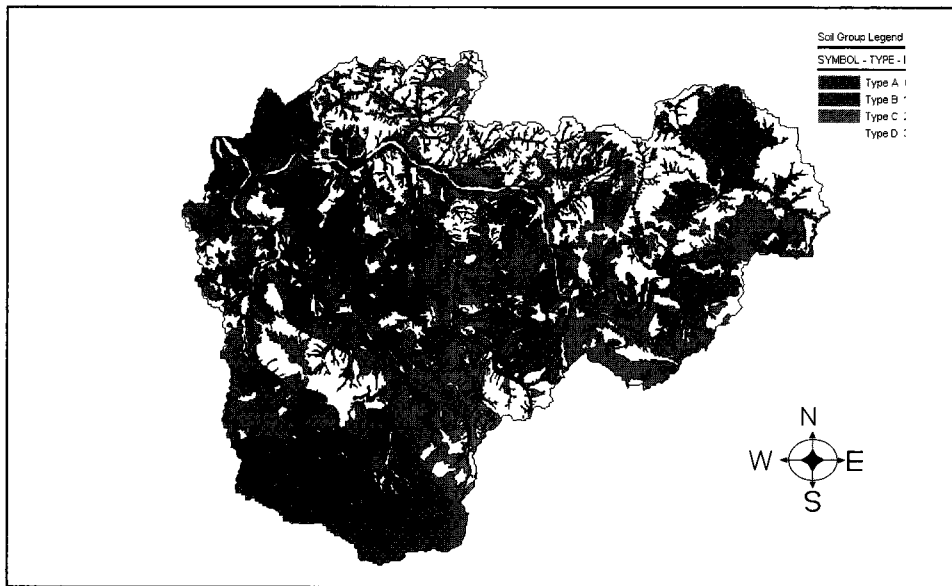


그림 8. 유역의 정밀토양도

이상과 같이 모형의 민감도 분석에 의해서 기왕의 호우사상으로 부터 분석한 결과 개념적 모형에 의한 모형매개변수의 초기치는 표 2과 같았으며, 지표면과 부탱크의 유출계수  $\alpha_1$  및  $\alpha_{11}$ 은 각각 0.257~0.300 및 0.495~0.585이고 지표하의 유출계수와 지표면의 침투계수인  $\alpha_2$  및  $\beta$ 는 각각 API의 지수식으로 나타낼 수 있었다. 한편 지표면과 지표하의 초기저류고  $H_{10}$  및  $H_{20}$ 은 각각 0.0 및 50.0 mm로 하였으며, 수문사상의 선행시간은 적용유역이 비교적 중소유역에 해당하므로 선행사상의 영향을 충분히 반영할 수 있는 3일(72hr) 동안 발생한 호우사상을 취하였다.

따라서 개념적 모형의 매개변수인 지표면유출, 부탱크의 유출, 지표하유출 및 지표하로의 침투에 대한 각 유출 및 유출계수는 표 2에 제시된 매개변수의 초기치를 사용하여 결정토록 하였다. 유출수문곡선의 수치 filter에 의한 성분을 분리하여 민감도 분석에 의해서

얻은 매개변수( $\alpha_1$  및  $\alpha_{11}$ )는 고정을 시키고 지표하로의 침투계수( $\beta$ ) 및 지표하 유출계수( $\alpha_2$ )를 추정하였다. 선행강우에 따라 토양의 함수조건을 나타내는 유출곡선지수(Curve Number : CN)는 GIS 기법을 이용하여 추정하였으며, 그림 8과 같이 토양의 분류는 유출을 발생시킬 수 있는 능력에 따라 토양을 A, B, C, D로 구분하고 AMC-II 조건의 최적 매개변수를 추정한 결과는 표 3과 같았다.

#### 4.4 모형의 적용결과 비교고찰

지금까지 유역유출모형의 구조와 이론을 전개하고 이를 수행할 수 있는 알고리즘과 프로그램을 개발하여 유역을 종합적으로 해석하고 예측할 수 있도록 IHP 대 표유역인 위천유역을 대상으로 개념적 모형의 매개변수를 실제호우에 적용시킨 결과에 대하여 적합성을 분석 하였다.

표 4. 첨두유량과 첨두발생시간

Storm	Peak Discharge(cms)						Peak Time(hr)					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
1988.7.13	782.1 (618.1) *20.9%	459.6 (360.9) *21.4%	281.0 (344.4) *22.5%	182.2 (192.5) *5.6%	43.3 (47.8) *10.4%	278.1 (303.8) *9.2%	14 (18)	15 (16)	15 (15)	14 (14)	14 (14)	14 (15)
1989.7.11	192.7 (174.1) *9.6%	111.1 (113.1) *1.8%	59.2 (66.3) *12.0%	40.9 (36.5) *10.8%	10.9 (15.0) *37.6%	52.2 (58.4) *11.8%	29 (32)	29 (29)	29 (29)	7 (7)	8 (8)	29 (29)
1989.8.21	396.2 (411.6) *3.9%	253.3 (265.9) *5.0%	145.1 (175.3) *20.8%	91.7 (113.6) *23.8%	23.2 (31.4) *35.3%	117.4 (131.8) *12.2%	34 (33)	31 (32)	31 (31)	34 (27)	29 (28)	31 (31)
1997.5.12	256.1 (263.1) *2.7%	240.3 (254.2) *5.8%	128.6 (131.9) *2.6%	123.9 (116.8) *5.7%	56.0 (58.4) *4.3%	92.9 (84.8) *8.7%	13 (13)	11 (10)	10 (11)	8 (8)	9 (9)	12 (12)

( ) : Observed Value, \* Residual

표 5. 분석지점별 적합성분석 결과

Station	Storm	RMS(cms)	Bias(cms)	ME
No. 1	1988. 7. 13	107.254	21.329	0.799
	1989. 7. 11	30.577	-3.918	0.792
	1989. 8. 21	34.156	-2.798	0.915
	1997. 5. 12	15.891	-2.237	0.970
No. 2	1988. 7. 13	44.564	-9.799	0.801
	1989. 7. 11	10.361	0.858	0.894
	1989. 8. 21	22.459	-7.232	0.908
	1997. 5. 12	12.028	0.523	0.980
No. 3	1988. 7. 13	33.532	-6.974	0.861
	1989. 7. 11	5.320	0.563	0.929
	1989. 8. 21	16.450	-5.704	0.887
	1997. 5. 12	6.981	-2.405	0.975
No. 4	1988. 7. 13	10.771	2.298	0.955
	1989. 7. 11	3.778	1.211	0.896
	1989. 8. 21	10.108	0.649	0.904
	1997. 5. 12	4.566	0.423	0.985
No. 5	1988. 7. 13	3.181	-0.460	0.917
	1989. 7. 11	1.521	0.381	0.847
	1989. 8. 21	2.363	-0.111	0.908
	1997. 5. 12	1.428	-0.154	0.947
No. 6	1988. 7. 13	14.329	-3.391	0.964
	1989. 7. 11	4.213	0.877	0.925
	1989. 8. 21	5.176	-2.173	0.981
	1997. 5. 12	8.323	0.351	0.917

RMS : Root Mean Square, Bias : Bias, ME : Model Efficiency

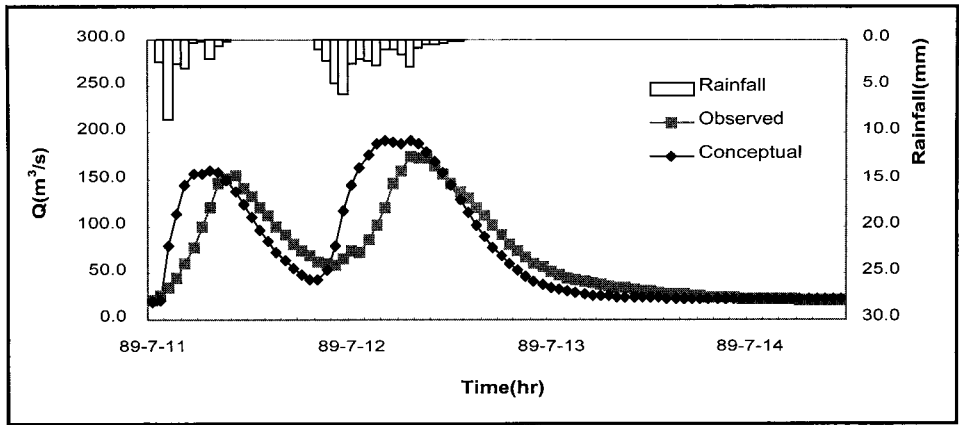


그림 9. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.1 : 1989. 7. 11)

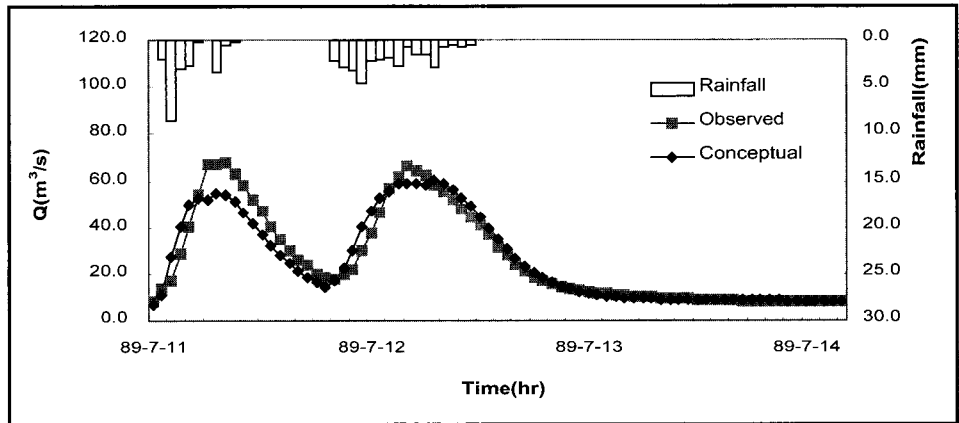


그림 10. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.2 : 1989. 7. 11)

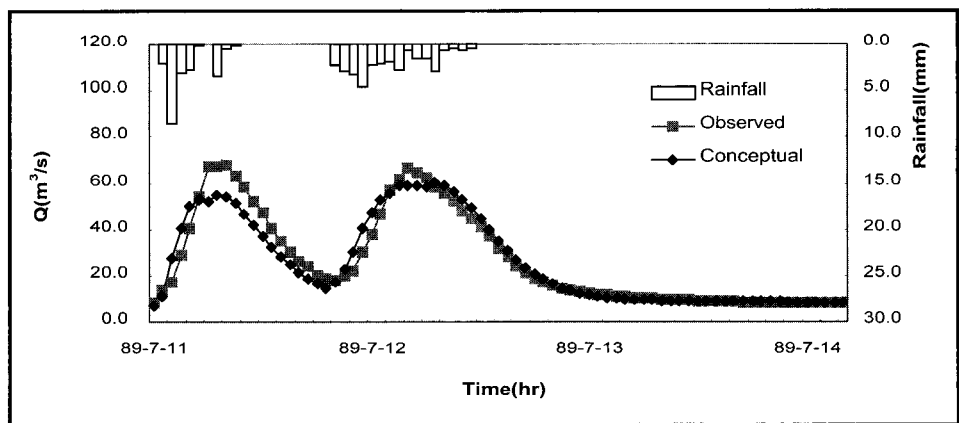


그림 11. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.3 : 1989. 7. 11)

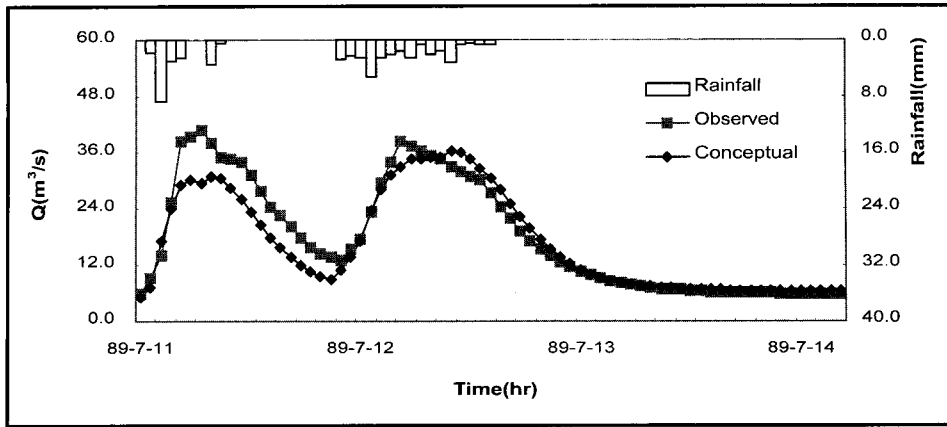


그림 12. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.4 : 1989. 7. 11)

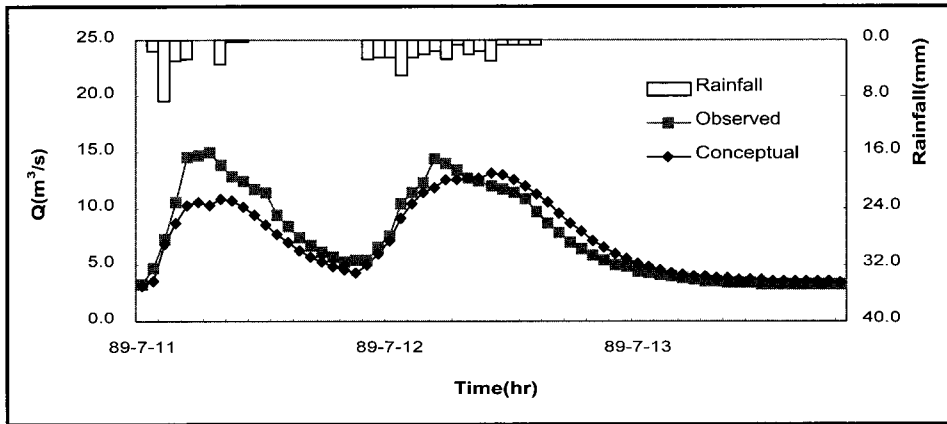


그림 13. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.5 : 1989. 7. 11)

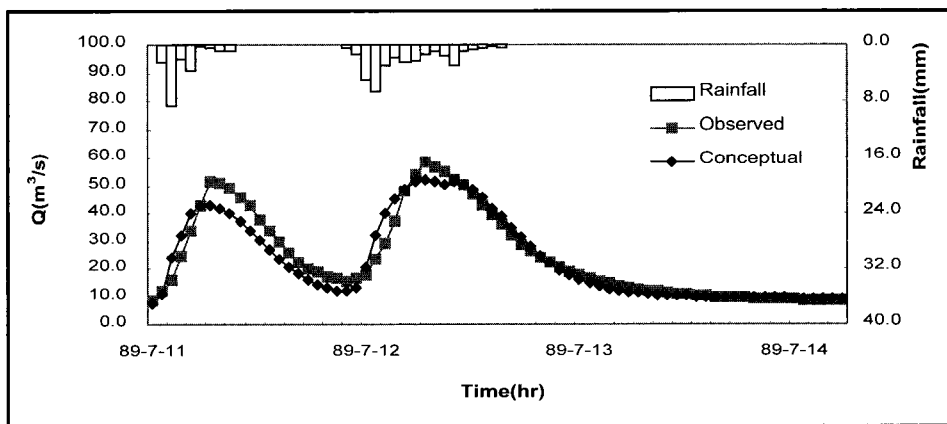


그림 14. 개념적 모형에 의한 홍수유출수문곡선 비교(No.6 : 1989. 7. 11)

적용지점은 본 연구의 분석유역 중에서 수위관측소 지점인 무성(No.1), 병천(No.2), 미성(No.3), 고노(No.4), 동곡(No.5) 및 효령(No.6) 지점에 대하여 1988. 7. 13, 1989. 7. 11, 1989. 8. 21 및 1997. 5. 12의 4개의 호우를 대상으로 홍수유출수문곡선을 계산하고 이를 실측 홍수유출수문곡선과 비교하였다.

첫째, 홍수유출수문곡선의 비교에서 개념적 모형에 의하여 계산된 홍수유출수문곡선은 대체로 실측홍수유출수문곡선의 상승부, 첨두부 및 감소부에서 수문곡선의 형상을 잘 나타내고 있었다.

둘째, 홍수유출수문곡선의 첨두부의 적합성을 판정할 수 첨두유량과 첨두발생시간은 표 3과 같았다. 여기서, 계산된 첨두유량은 대체로 실측치에 접근되어 있으며, 첨두발생시간 역시 대체로 1시간 이내의 차이를 나타내고 있으므로 개념적 모형에 의한 홍수유출해석이 비교적 잘 수행되고 있음을 알 수 있었다.

셋째, 적합성 판단에 있어서는 각 수위표 지점에 대하여 기왕의 호우를 대상으로 개념적 모형에 의한 계산치와 실측치를 대상으로 전체적인 적합성을 판정하는데는 절대오차의 평균을 나타내는 RMS(Root Mean Square), 상대오차의 평균을 나타내는 Bias 및 모형의 효용도를 나타내는 ME(Model Efficiency) 등이 많이 이용되고 있으며, 본 연구에서의 적합성 분석결과는 표 5와 같다.

본 연구에서 적용대상유역인 낙동강 IHP 위천대표 유역의 수위표 지점인 무성(No.1), 병천(No.2), 미성(No.3), 고노(No.4), 동곡(No.5) 및 효령(No.6)지점에서 계산된 홍수유출수문곡선과 실측 홍수수문곡선을 비교한 결과는 그림 9~그림 14와 같았다. 여기서, 계산된 첨두유량은 실측치보다 다소 작게 나타나고 있었는데, 이는 본 분석에 적용한 유역이 중소하천유역인 하도의 경사가 비교적 급경사이기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 홍수예측을 위한 유출모형을 유도하기 위하여 강우-유출과정을 단순하게 표현할 수 있는 개념적 모형을 확정론적 관점에서 검토하여 모형화를 시도하였다. 복잡한 유역유출계의 유출과정을 개념화시켜 모형의 구조를 간단히 하고 모형의 매개변수 거동이 선형강우지수에 지배를 받게 된다는 가정하에서 유출모형의 매개변수를 선형강우지수의 함수로 표현함으로써 비교적 정도가 높은 유역유출모형을 유도하였으며, 그

결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유역의 유출과정에 있어서 복잡한 유출계의 물리과정을 지표면과 지표하로 구분하여 단순화시킨 개념적 모형을 제시하였으며, 유역의 토양습윤상태를 API의 함수로 표현함으로써 강우-유출과정을 정밀하게 해석할 수 있도록 모형화하였다.
- 2) 강우-유출과정에서 유역의 지체효과를 표현하기 위하여 개념적 모형에서 부탱크를 부착함으로써 유역지체에 대한 모형의 매개변수를 해석적으로 결정할 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 수행된 개념적 모형의 매개변수 추정은 실측 홍수수문곡선과 모형에 의해서 계산된 홍수수문곡선으로부터 RMS와 Bias를 계산하고 효용도를 기준으로 각각의 매개변수가 자동으로 추정될 수 있도록 하였다.

따라서 본 연구에서 제시된 개념적 모형은 토양습윤상태를 API의 함수로 표시하고 유역의 지체를 부탱크를 부착하여 모형화하였으며, 매개변수의 추정에 RMS와 Bias가 최소가 되도록 매개변수를 추정함으로써 이 모형은 우리나라 미계측 중소하천유역에서 간편하게 널리 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 건설부, **국제수문개발계획(IHP) (1982~1998). 대표유역 연구조사보고서.**
- 지흥기·남선우·이순탁 (1986). 하천유출예측을 위한 강우-유출모델, **한국수문학회 논문집**, 제19권, 제4호.
- 지흥기(1989). 개념적 모델에 의한 하천유출예측, HBV 모델 및 Tank 모델을 중심으로, **영남대학교 공업기술연구소 연구보고**, 제 17권, 제 1호.
- Bergstorm, S. & Forsman, (1973). Development of a Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model, *Nordic Hydrology*, Vol. 4, No. 3.
- Bergstrom, S. (1975). The Development of a Snow Routine for HBV-2 Model, *Nordic Hydrology*, Vol 6, pp.73~92.
- Bergstrom, S. and Forsman (1973). Development of a Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model, *Nordic Hydrology*, Vol.4, No.3.
- Cooper, D.M. and Wood, E.F. (1980). Identification of Multivariate Time Series and Multivariate Input-Output Models, *Water Resources Res.*,

- 18(4), pp.937~946.
- Cooper, D.M. and Wood, E.F. (1980). Parameter Estimation and Filtering of Partitioned Hydrologic Systems, Dept. of Civil Engrg.
- Dawdy, D. R., & O'Donnell, T., (1965). Mathematical Models of Catchment Behaviour, *J. of Hyd. Div.*, ASCE 91(HY4), pp. 123.
- Dawdy, D.R. and O'Donnell, T. (1965). Mathematical Models of Catchment Behaviour, *J. of Hyd. Div.*, ASCE, 91(HY4), pp.123.
- O'Donnell, T., (1960). Instantaneous Unit Hydrograph Derivation by Harmonic Analysis, IASH Pub., No. 51, pp. 546.
- Sugawara, M.(1967). The Flood Forecasting by a Series Type Tank, *International Symposium, Flood and Their Computation*, Leningrad.
- Wood, E. E.(ed.), (1980). Recent Developments in Real Time Forecasting, Control of Water Resource Systems, Oxford, Pergamon.

(논문번호:02-027/접수:2002.5.3/심사완료:2002.06.3)