

# 하천분기 특성인자를 고려한 지형학적 순간단위도 모형의 해석

안승섭<sup>1\*</sup> · 김대형<sup>1</sup> · 허창환<sup>2</sup> · 박종권<sup>3</sup>

## Analysis of GIUH Model using River Branching Characteristic Factors

Seung-Seop AHN<sup>1\*</sup> · Dae-Hyeung KIM<sup>1</sup> ·  
Chang-Hwan HEO<sup>2</sup> · Jong-Kwon PARK<sup>3</sup>

### 요 약

본 연구에서는 홍수유출해석시 사용되는 지형특성인자와 수문기상학적 특성인자 추출에 소요되는 시간적 경제적 노력을 최소화함은 물론, 가능한 한 최소한의 인자를 사용하여 강우-유출예측이 가능하도록 모형을 구축하는데 목적을 두었다. 즉, 강우-유출해석시 일반적으로 사용되던 지형·지질특성, 토지피복상태 등의 인자를 고려하지 않고 단순히 유역의 하천 분기특성만을 고려한 유출해석방법 제안하고자 하였다. 연구대상유역은 금호강 상류에 위치한 영천댐유역을 대상으로 하여 주요 호우시 강우-유출량 관측자료와 DEM자료를 이용한 공간특성자료 추출결과를 이용하여 모형 매개변수를 추출하였다. 분석결과 실측 침투치에 대한 추정 침투 유출량의 상대오차가 Clark 및 GIUH 모형에서 각각 1.9~23.9% 및 0.8~11.3%로 나타내고 있었으며, 전체적으로 볼 때 GIUH모형에 의한 수문곡선의 침투치가 크게 나타나고 있는 것으로 검토되었다. 그리고, 계산된 침투 유출량의 발생시각에 대한 검토결과 Clark 모형과 GIUH 모형을 이용한 경우에 대하여 각각 0.5~1시간 및 0~1시간의 상대오차를 나타내고 있었으며, 전체적으로 볼 때 GIUH 모형을 이용할 경우 기존에 사용되던 Clark 모형에 비해 홍수 침투 발생시각이 늦은 것으로 검토되었다.

주요어: 하천분기특성, 지형학적 순간단위도 모형, 강우-유출

### ABSTRACT

The purpose of this research was to develop a model that minimizes time and money for deriving topographical property factors and hydro-meteorological property factors, which are used in interpreting flood flow, and that makes it possible to forecast rainfall-runoff using a least number of factors. That is, the research aimed at suggesting a runoff interpretation method that considers the river branching characteristics but not the topographical and geological properties and the land cover

2002년 9월 12일 접수 Received on September 12, 2002 / 2002년 11월 22일 심사완료 Accepted on November 22, 2002

<sup>1</sup> 경일대학교 도시정보지적공학과 Department of Urban Information & Cadastral Engineering, Kyungil University

<sup>2</sup> 충주대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Chungju National University

<sup>3</sup> 안동과학대학 토목과 Department of Civil Engineering, Andong Science College

\* 연락처 E-mail: ahnss0@bear.kyungil.ac.kr

conditions, which had been referred in general. The subject basin of the research was the basin of Yeongcheon Dam located in the upper reaches of the Kumho River. The parameters of the model were derived from the results of abstracting topological properties out of rainfall-runoff observation data about heavy rains and Digital Elevation Modeling(DEM). According to the result of examining calculated peak runoff, the Clark Model and the GIUH Model showed relative errors of 1.9~23.9% and 0.8~11.3%, respectively and as a whole, the peak values of hydrograph appeared high. In addition, according to the result of examining the time when peak runoff took place, the relative errors of the Clark Model and the GIUH Model were 0.5~1 and 0~1 hour respectively, and as a whole, peak flood time calculated by the GIUH Model appeared later than that calculated by the traditional Clark Model.

**KEYWORDS:** River Branching Characteristic, GIUH Model, Rainfall-Runoff

## 서 론

자연하천유역 내에서 발생하는 강우와 유출관계는 수문학적 특성인자들이 시·공간적으로 다변성을 가지고 있어 매우 복잡한 시스템을 거쳐서 나타내게되므로 복잡한 수문현상을 수학적 모형이나 알고리즘을 이용하여 가능한 한 실제현상에 접근시키고 단순화 시켜서 예측오차를 최소화할 필요성이 있다.

실제현상에 가장 근접한 하천유역의 강우-유출해석 모형의 개선과 개발을 위해서는 유역의 지형공간특성자료와 수문특성 자료가 사용되며, 이들 자료의 정확한 추출과 모델 매개변수의 다양한 정보를 활용하기 위한 노력이 계속되고 있는 실정이다. 특히, 최근까지 유역의 수문학적 분석을 위하여 사용되어온 자료 추출방법들은 유역의 시간적·공간적 변화를 강우-유출해석모형 구축에 효과적으로 이용하는데 많은 문제점이 있다.

강우-유출과정을 해석하기 위한 모형은 확정론적 모형(deterministic model)과 추계학적 모형(stochastic model)으로 대별된다. 확정론적 모형은 물의 순환을 지배하는 자연계의 물리적인 과정을 수학적으로 서술하여 유역에서 발생하는 일련의 강우사상으로부터 유출수문곡선을 해석하는 실제 수문사상의 모의를 실행하는 모형이다. 추계학적 모형은 실제의 수

문사상에 관계없이 어떤 유역에서 실측된 수문계열의 확률통계학적 거동을 재현함으로써 장래에 발생할 수 있는 수문사상을 예측하는 모형이다.

지금까지 유출해석을 위한 국내외의 많은 연구가 진행된 바 있으나 최근에는 GIS(geographical information system)의 발달로 하천유역의 공간적 특성자료를 이용한 유출해석이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

유역의 공간특성자료를 이용한 강우-유출해석에 관한 국외의 연구사례로는 Rodriguez-Iturbe 등(1979)에 의한 순간단위도와 지형학적특성을 결합시켜 지형학적 순간단위도(GIUH: geomorphologic instantaneous unit hydrograph)를 제안한 연구와 Gupta 등(1980)과 Rosso(1984)에 의한 지형특성인자로부터 순간단위도의 유도 등에 관한 연구가 진행된 바 있고, 일본에서는 近森秀高 등(1998)에 의해 유출모델 구축을 위한 GIS의 응용에 관한 연구가 수행된 바 있으며, 최근에는 Hormadka와 Whitley(1999)에 의한 연구가 진행된 바 있다.

국내에서는 김대식(1995)에 의한 소유역 지표유출의 공간적 해석을 위한 지리정보시스템의 응용, 정하우 등(1995)에 의한 지표유출의 시·공간적 재현을 위한 GIS응용모형에 관한 연구, 안승섭과 조명희(1999)에 의해 하천유역의 수문학적 유출분석에 필요한 유역특성인자

추출을 위한 지리정보 시스템의 응용과 김경탁 등(1998)에 의한 GIS를 이용한 강우-유출 모의모형 및 유출응답에 관한 연구가 있었으며, 최근에는 최철웅(1999)에 의한 지형공간정보체계를 이용한 수문지형인자 결정에 관한 연구와 허창환(2001), 안승섭 등(2002)에 의한 GIS를 이용한 강우-유출해석에 관한 연구가 진행된 바 있다.

특히, 유역내에 분포된 하천의 형태학적 특성인자를 고려한 강우-유출해석과 유사한 연구로는 중소하천유역의 강우-유출해석모형 구축을 위해서는 유역의 지형특성인자와 수문기상학적 특성인자를 이용하고 있으므로 이들 인자간의 상호 관련성에 대한 규명이 필요하다. 그러나 수문기상학적 특성인자는 시·공간적으로 변화가 심하여 이용하는데 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 전국에 걸쳐서 구축된 수문용 수치고도자료를 이용하여 강우-유출해석시 일반적으로 사용되던 지형·지질 특성, 토지피복상태 등의 인자를 고려하지 않고 단순히 유역의 하천 분기특성만을 고려한 유출해석방법의 적용가능성을 제안함으로써, 향후 미세측 소유역의 유출해석에 효과적으로 이용할 수 있도록 하고자 한다.

## 하천차수 및 강우-유출해석의 기본이론

일반적으로 하천유역의 강우-유출해석을 위한 시스템 개념은 그림 1과 같이 자료수집관리(data management) 영역, 지형해석(terrain analysis) 영역 및 수문학적 분석 및 모형화(hydrological analysis and distributed modelling) 영역으로 구축(진현호, 2000)할 수 있다.

본 연구에서는 DEM자료를 이용하여 유역에 대한 공간자료를 구축하고 이로부터 유역의 여러 가지 지형특성인자 중에서 하천 차수

별 지형특성만을 이용한 유출해석모형의 적용가능성을 제안함으로써 그림 1과 같은 강우-유출해석과정을 간략화하고자 한다.

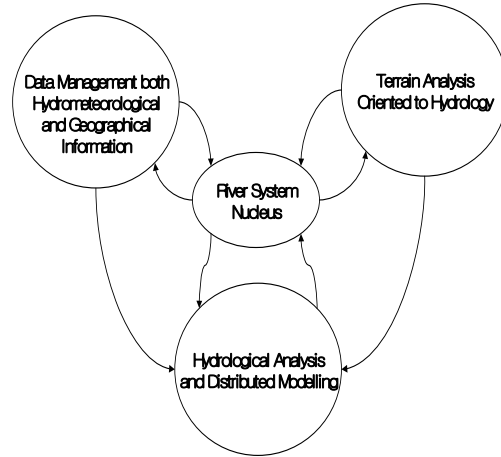


FIGURE 1. Schematic diagram of rainfall-runoff analysis

### 1. 하천차수법칙

유역내의 하천이 얼마나 많은 지천을 가지고 있는가를 나타내는 척도를 표시하는 방법으로 하천차수를 이용한다. 일반적으로 자연하천유역의 구성과 하도망의 형태에 관한 정량적인 연구는 Horton(1945)이 제시한 하천 차수법칙을 적용하여 하도의 개수, 하도길이 등에 관한 지형법칙을 제한한 것에서 시작되었다. 그 후 Strahler(1954)는 Horton의 차수법칙을 수정하여 체계화시켰으며, Melton(1959)은 이를 수학적으로 규명하였다. 또한 하천의 형태학에 관한 연구는 정성적으로 표시되어 오다가 Horton의 차수개념을 시점으로 정량적으로 분석이 가능해졌으며 Strahler에 의해 유역의 형태학적 성질을 분석할 수 있게 되었다.

하천의 차수를 부여하는 방법은 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 최상류 지천을 1차 하천으로 하여 하류로 내려가면서 하천차수를 부여하는 방법을 이용하였다.

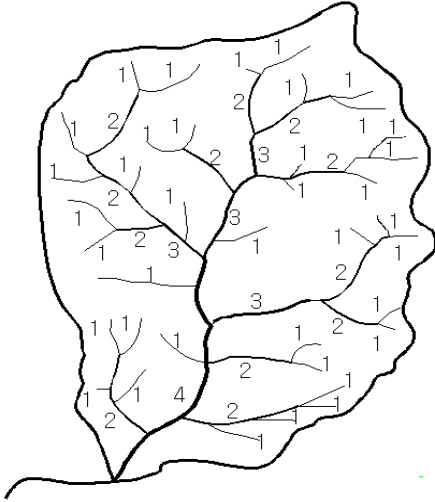


FIGURE 2. Definition of stream order(Horton-Strahler Method)

Horton(1945)은 한 유역내에 차수가 동일한 하천의 개수를 다음 식 (1)과 같이 표현한 바 있다.

$$N_{\omega} = R_B^{\Omega - \omega} \quad (1)$$

여기서,  $\omega$ 는 하천의 차수,  $N_{\omega}$ 는  $\omega$ 차 하천의 개수이며,  $\Omega$ 는 유역의 차수이다. 또한  $R_B$ 는 하천 분기비로서, 하천 차수별 하천의 개수를 산정하고 각각에 대수를 취하여 구한 직선의 기울기가  $\log R_B$ 로 나타낸다.

식 (1)을 이용한 유역내 총 하천의 개수는 식 (2)와 같이 분기비의 등비수열 형태로 나타낼 수 있으며, 유역내에서 임의의 차수에 대한 하천의 평균길이와 평균면적은 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{\omega=1}^{\Omega} N_{\omega} = 1 + R_B + R_B^2 + \dots + R_B^{\Omega-1} = \frac{R_B^{\Omega} - 1}{R_B - 1} \quad (2)$$

$$\bar{L}_{\omega} = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{i=1}^{N_{\omega}} L_{\omega i} \quad (3)$$

$$\bar{A}_{\omega} = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{i=1}^{N_{\omega}} A_{\omega i} \quad (4)$$

여기서,  $L_{\omega i}$ 는  $\omega$ 차 하천의 길이,  $\bar{L}_{\omega}$ 는  $\omega$ 차 하천의 평균길이,  $A_{\omega i}$ 는  $\omega$ 차 하천의 유역면적,  $\bar{A}_{\omega}$ 는  $\omega$ 차 하천의 평균 유역면적이다.

따라서, Horton의 하천차수법칙은 하천분기비 ( $R_B$ ), 하천길이비 ( $R_L$ ) 및 하천면적비 ( $R_A$ )에 대하여 식 (5)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}} \quad (5)$$

$$R_L = \frac{\bar{L}_{\omega}}{\bar{L}_{\omega-1}} \quad (6)$$

$$R_A = \frac{\bar{A}_{\omega}}{\bar{A}_{\omega-1}} \quad (7)$$

경험적으로 보아 자연하천 유역에서 분기비는 3.0~5.0, 길이비는 1.5~3.5, 면적비는 3.0~6.0의 값을 지며, 특히 분기비의 경우 이론적인 최소값은 2.0 이나 자연하천 유역에서는 거의 나타나지 않는 것으로 연구된 바 있다.

## 2. 강우-유출 해석 모형의 기본이론

따라서, 본 연구에서는 하천 유역의 호우-유출 해석을 위하여 하천차수법칙을 이용한 지형학적 순간단위도 모델(GIUH)을 이용하였으며, 기존의 유출해석 방법과 비교하기 위하여 기왕에 많이 이용되고 있는 Clark 모델을 이용하였으며, 기본이론은 다음과 같다.

### 1) GIUH 모형

GIUH 모형은 강우-유출과정의 물리적인 특성에 영향을 미치는 유역의 지형학적 특성과 수문학적 응답을 접목시킨 모형으로 규칙성을 가지고 있는 유역의 하천 및 하도망의 구조적인 특성을 잘 나타내는 Horton의 하천차수법칙을 이용하여 IUH를 유도하는 것이다.

이 모형은 Rodriguez-Iturbe 등(1979)에 의해 제안되었는데, Markov process를 기본형태로 하여 유역의 수문학적 응답인 IUH와 지형학

적 특성을 결합시켰으며, 유역에 내린 강우 입자들의 유역출구에서의 도달시간 분포를 체계적으로 정의하여 GIUH를 제안하였다. GIUH는 하도망에서 강우입자의 움직임을 다음과 같이 시·공간적으로 해석함으로써 구할 수 있는데 유역의 하천차수를  $\Omega$ 라 할 때, Strahler의 차수  $i$ 에 따른 수로의 상태를  $C_i$ ,  $1 \leq i \leq \Omega$ ,  $i$ 차의 하도로 배수되는 사면을  $O_i$ ,  $1 \leq i \leq \Omega$ 라하고, 수로 위로 떨어지는 강우입자를 무시한다면, 처음에 강우입자는 사면에만 위치하게 된다. 초기에 임의의 사면  $O_i$ 에 위치한 강우입자는 유역의 차수가 3차인 하천의 경우 그림 3과 같이 다음과 같은 경로를 따라

서 유역출구까지 이동하게 된다.

① 상태  $O_i$  에서 가능한 이동경로 :

$$O_i \rightarrow C_i, \quad 1 \leq i \leq \Omega$$

② 상태  $C_i$  에서 가능한 이동경로 :

$$C_i \rightarrow C_j, \quad j > i, \quad i = 1, 2, \dots, \Omega$$

③ 상태  $C_{\Omega+1}$ 는 유역 출구이다.

이와 같은 규칙에 의하여 강우입자가 이동 가능한 모든 경로는 다음과 같이 4가지 경우로 나눌 수 있다.

① 경로 1 :  $O_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$ (유역출구)

② 경로 2 :  $O_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$ (유역출구)

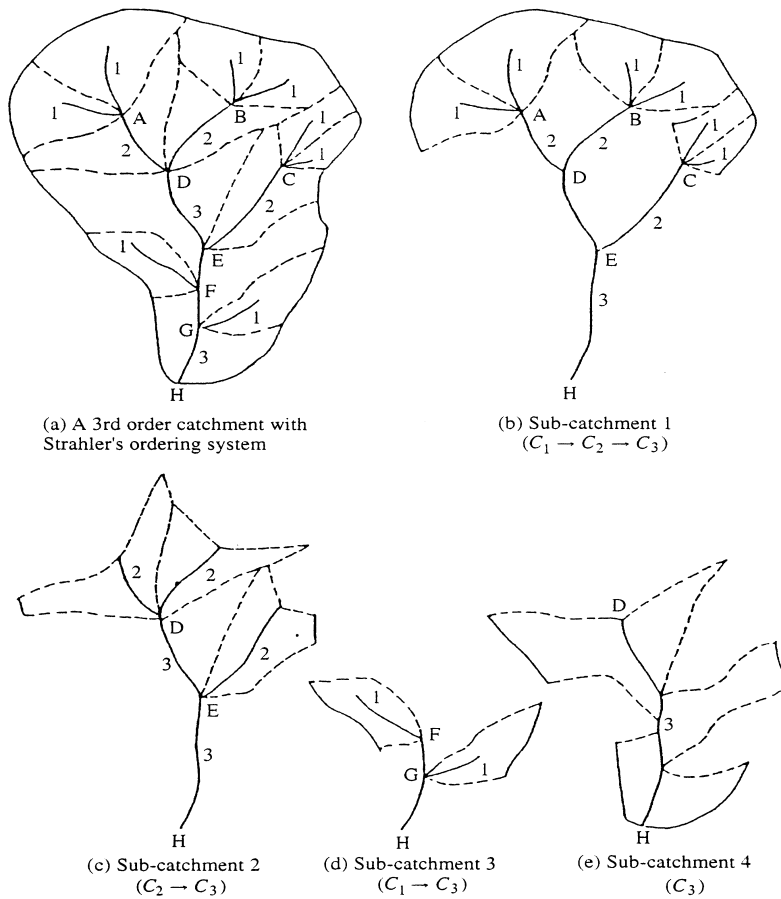


FIGURE 3. Schematic diagram of 3rd order watershed with GIUH model

③ 경로 3 :  $O_2 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$  (유역출구)

④ 경로 4 :  $O_3 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$  (유역출구)

유역에서 강우 입자가 이동하는 임의의 경로를  $\Gamma$ 라 할 때 ( $\gamma \in \Gamma$ ), 유역출구까지 강우 입자의 도달시간  $T_\gamma$ 는 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_\gamma = T_{x_1} + \dots + T_{x_K} \quad (8)$$

여기서,  $\gamma$ 는 임의의 강우입자 이동경로 ( $\gamma = \langle x_1, \dots, x_K \rangle$ ),  $x_K$ 는 사면과 수로를 통하여 이동 경로,  $x_1, \dots, x_K \in (O_1, \dots, O_\Omega, C_1, \dots, C_\Omega)$  이다. 유역전반에 내린 강우입자가 유역출구까지 도달하는 시간의 분포  $f(t)$ 는 식 (9)와 같이 발생한 가능한 모든 경로에 대해서 일반화하였다.

$$f(t) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} p(\gamma) f_{x_0} * \dots * f_{x_\Omega}(t) \quad (9)$$

여기서, \*는 회선적분을 나타내는 것이며  $\gamma$ 는 임의의 강우입자가 이동하는 경로이다. 또한  $\Gamma$ 는 유역 내에서 강우입자가 출구로 이동할 수 있는 모든 경로이며,  $p(\gamma)$ 는 강우입자가 임의의 경로  $\gamma$ 를 따라서 이동할 확률로서 식 (10)과 같다.

$$p(\gamma) = \pi_{x_\Omega} P_{x_\Omega, x_{\Omega+1}} \dots P_{x_{\omega+1}, x_{\omega+\gamma}} \dots P_{x_{\Omega-1}, x_\Omega} \quad (10)$$

여기서,  $\pi_{x_\Omega}$ 는 사면에 내린 강우 입자가  $\omega$ 차 하천으로 유입되는 초기상태확률로서  $\omega$ 차 하천으로 유입되는 면적에 대한 전체 유역면적의 비를 나타낸다. 그리고  $P_{x_\omega, x_{\omega+1}}$ 는  $x_\omega$ 의 상태에서  $x_{\omega+1}$ 의 상태로 이동하는 천이확률을 의미하는 것으로서  $\omega+1$ 차 하천으로 유입되는 전체  $\omega$ 차 하천 중에서  $\omega+1$ 차 하천으로 유입되는 하천의 개수에 대한 비를 나타낸다. 초기상태확률  $\pi_i$ 와 천이확률  $p_{i,j}$ 는 유역의 지형학적인 인자의 함수로 식 (11)~(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi_i =$$

$$\frac{(i \text{ 차 하천으로 직접 유입되는 } i \text{ 차 하천의 유역면적})}{(\text{전체유역면적})} \quad (11)$$

$$p_{i,j} = \frac{(j \text{ 차 하천과 합류하는 } i \text{ 차 하천의 개수})}{(i \text{ 차 하천의 총개수})} \quad (12)$$

또한, Gupta 등(1980)은 천이확률을 Strahler의  $i$ 차 하천의 개수를 이용하여 식 (13)과 같이 나타낼 수 있음을 입증한 바 있다.

$$p_{i,j} = \frac{(N_i - 2N_{i+1}) E(i, \Omega)}{\sum_{K=i+1}^{\Omega} E(K, \Omega) N_K} + \frac{2N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1,j} \quad (13)$$

여기서,  $E(i, \Omega)$ 는  $\Omega$  차수 유역에서  $i$  차수 하천의 평균개수를 나타내고,  $\delta$ 는 Kronecker의 delta 분포 ( $j=i+1$ 이면  $\delta_{i+1,j}=1$  이고,  $j \neq i+1$  이면  $\delta_{i+1,j}=0$ )이다.

$$E(i, \Omega) = N_i \prod_{j=2}^i \frac{(N_{j-1} - 1)}{2N_j - 1}, \quad i = 2, \dots, \Omega \quad (14)$$

1차 하천의 유역에 강우가 발생할 확률은 식 (15)와 같으며, 임의의  $\omega$ 차 유역에서의 초기상태확률은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\pi_1 = \frac{N_1 \bar{A}_1}{A(\Omega)} \quad (15)$$

$$\pi_\omega = \frac{N_\omega}{A(\Omega)} \left( \bar{A}_\omega - \sum_{j=1}^{\omega-1} \bar{A}_j \frac{N_j p_{j,\omega}}{N_\omega} \right), \quad \omega = 2, \dots, \Omega \quad (16)$$

여기서,  $\bar{A}_i$ 는  $i$ 차 하천으로 유입되는  $i$ 차 하천의 평균 유역면적이다.

차수가  $\Omega$ 인 하천유역에서의 GIUH는 Rodriguez-Iturbe 등(1979)에 의하면 식 (17)과 같이 유도된다.

$$g(t) = (a_\Omega t + b_\Omega) \exp(-2vL \bar{\Omega}^{-1} t) + \sum_{i=1}^{\Omega-1} b_i \exp(-2vL \bar{\Omega}^{-1} t R_L^{\Omega-1}) \quad (17)$$

여기서,  $g(t)$ 는 GIUH,  $v$ 는 평균유속을  $L_{\Omega}$ 는 최고차수 하천의 평균길이,  $a_{\Omega}$ ,  $b_{\Omega}$ 는  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_L$ 의 함수를 나타낸다.

또한, Rosso(1984)는 일반적으로 IUH에 대해서 보편적이고 널리 이용되는 해석적인 형태로 식 (18)과 같이 침투유량과 침투시간을 가진 지형학적 순간단위도를 2변수 Gamma 분포형 함수로서 나타낸 바 있다.

$$h(t) = \frac{1}{K\Gamma(N)} \frac{t^{N-1}}{K} e^{-\frac{t}{K}} \quad (18)$$

여기서,  $h(t)$ 는 IUH의 종거 ( $T^{-1}$ ),  $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수,  $N$ 은 저수지 개수,  $K$ 는 저수지 상수를 나타낸다.

식 (18)은 유역이  $N$ 개의 선형저수지가 직렬로 연결되어 있다고 가정한 Nash(1958)의 유출모형과 같은 개념으로서, 유역전반에 걸쳐 순간적으로 내린 단위유효우량( $1 \text{ mm/hr}$ )을 유역출구에서  $N$ 개의 가상 저수지를 통해서 선형추적하여 순간단위도(IUH)의 종거치를 계산하는 식으로서  $h(t)$ 에 유역면적( $\text{km}^2$ )을 곱한 후 단위를  $\text{m}^3/\text{s}$ 가 되도록 환산하면 유역의 순간단위도가 된다.

## 2) Clark Method

자연하천 유역에 내리는 순간 단위유효우량으로 인한 유역 출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간단위유량도를 유도하는 방법으로서, 강우로 인한 유수의 전이뿐만 아니라 유역의 저류 효과를 고려하는 자연유역에의 적용에 적합한 방법으로 Clark에 의해 처음으로 제안되었다.

Clark 방법에서 매개변수인 도달시간 ( $T_c$ )은 유효우량의 종료시간으로부터 직접유출 수문곡선 하강부의 변곡점까지의 시간 간격을 의미하며, 시간 단위를 갖는 매개변수인 저류상수( $K$ )는 자연 하도 내의 저류량이 홍수에 미치는 저류효과를 표시하는 것으로서 이는 직접유출 수문곡선의 하강부 변곡점에서의 유량

$Q$ 를 그 점(시간)에서의 유량 변화율 ( $\frac{dQ}{dt}$ )로 나누어서 산정할 수 있으며, 식 (19)와 같다.

$$K = \frac{-Q}{\left(\frac{dQ}{dt}\right)} \quad (19)$$

또한, 도달시간-누가면적 간의 관계 규명을 위한 등시간선간의 시간 간격은 일반적으로 호우에 의한 유출의 공간적 분포를 적절히 표시할 수 있을 정도로 짧아야 하며, 우량상도의 시간 간격보다 작아야 정확한 계산이 가능하므로, 본 연구에서는 도달시간-누가면적간의 관계는 식 (20)을 이용하였다.

$$AI = 1.414 T^{1.5} \quad 0. \leq T < 0.5$$

$$1 - AI = 1.414(1 - T)^{1.5} \quad 0.5 \leq T \leq 1.0 \quad (20)$$

여기서, AI는 등유하 시간선으로 구분된 소유역의 누가 집수면적( $\text{km}^2$ ), T는 등유하 시간선으로 구분된 소유역의 도달시간( $\text{hrs}$ )을 나타낸다.

등시간선간의 면적으로부터 다음 구간으로 흘러내리는 유출용적의 단위는 ( $\text{mm} \cdot \text{km}^2$ )이므로 등시간선간의 시간간격으로 나누면 유출량을 식 (21)과 같이 구할 수 있다.

$$I_i = 0.2778 \frac{A_i}{\Delta t} \quad (21)$$

여기서,  $I_i$ ,  $A_i$ 는 임의 시간 간격  $i$ 의 종점 시간에 있어서의 수문곡선의 종거( $\text{m}^3/\text{s}$ )와 면적에 유효강우 깊이를 곱한 값 ( $\text{mm} \cdot \text{km}^2$ )을 표시하며,  $\Delta t$ 는 계산에 사용되는 시간간격( $\text{hrs}$ )을 나타낸다.

유출수문곡선을 각 소구간을 통해 추적하는 방정식은 식 (22)와 같다.

$$O_i = C I_i + (1 - C) O_{i-1} \quad (22)$$

여기서,  $O_i$ 는  $i$ 번째 시간구간의 유역출구의 유출량( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $I_i$ 는 각 소유역에 대한 유입량 혹은 유출량( $\text{m}^3/\text{s}$ ), C는 무차원 추적상수로서 식 (23)과 같이 추정할 수 있다.

$$C = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (23)$$

여기서,  $\Delta t$ 는 계산에 사용되는 수문곡선 중거의 시간간격(*hrs*),  $K$ 는 저류 상수를 나타낸다.

따라서, 시간우량 자료와 도달시간-누가면적 관계자료를 사용하여 식 (22)에 의해 추적하여 얻은 수문곡선이 순간단위유량도이며 이 순간단위유량도로부터 지속시간이  $\Delta t$ 인 단위유량도를 얻기 위해서는 식 (24)와 같이  $\Delta t$ 시간만큼 지체시켜 두 시간 단위유량도를 평균하면 된다.

$$O_i = (O_i + O_{i-1})/2 \quad (24)$$

마지막으로, 순간단위유량도로부터 임의 지속시간의 단위유량도는 다음 식 (25)와 같이 유도할 수 있다.

$$O_i = \frac{1}{n} \left[ \frac{1}{2} O_{i-n} + O_{i-n+1} + \dots + O_{i-1} + \frac{1}{2} O_i \right] \quad (25)$$

$$n = d / \Delta t$$

여기서,  $O_i$ 는 계산에 사용한 시간구간이  $\Delta t$  이고 지속시간이  $D$ 인 단위유량도에서 시간  $i$  에 있어서의 중거( $m^3/s$ )를 나타낸다.

## 강우-유출해석 모형의 적용 및 비교 검토

### 1. 연구대상유역 및 수문기상학적 자료수집

본 연구에서는 하천 분기특성을 고려한 GIUH 모형을 이용한 강우-유출 해석을 위하여 금호강 최상류부에 건설되어 유역내·외의 생활용수, 공업용수 및 하천유지용수를 공급하고 있는 영천댐 유역을 대상으로 하였다.

영천댐유역의 지형자료의 구축을 위해서 그림 4에서 나타낸 바와 같이 영천댐 유역이 포함된 5도엽의 1/25,000 수치지도를 기본으로 하여 RiverTools 4.0 패키지를 이용하였으며, 강우-유출의 해석을 위한 수문기상학적자료는 한국수자원공사 영천댐관리사무소의 실측강우량과 유출입량의 자료를 수집하여 이용하였다.

### 2. 유역의 지형공간자료 구축 및 특성인자 추출

본 연구에서는 대상유역인 영천댐을 기준으로 상류유역에 해당하는 국립지리원발행의 1/25,000 수치지도를 이용하여 DEM자료를 추출한 다음 ArcView와 Rivertools 패키지를 이용하여 수치표고모형을 제작하였으며, 본 연구

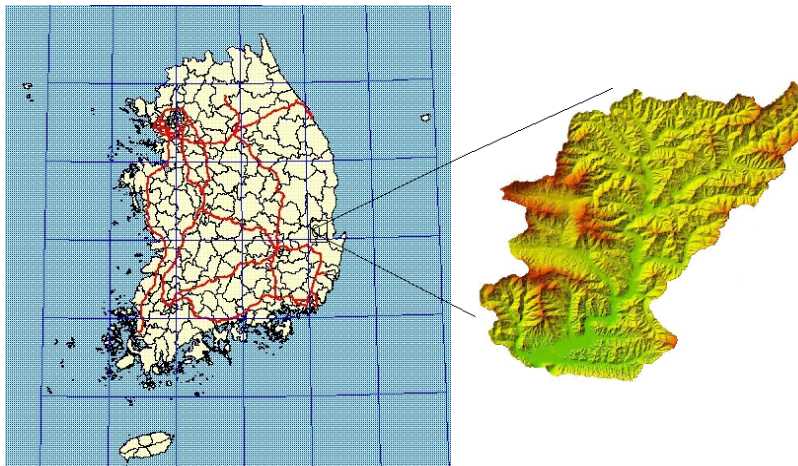


FIGURE 4. Location map of study area



대상구역의 DEM 자료로부터 3D를 구현하면 그림 5와 같았다. 다음으로 제작된 수치표고모형을 이용하여 소구역의 분할, 구역의 수계망, 하천의 차수, 구역의 경사, 하도의 경사, 하도의 연장 등 공간자료를 수집하였다.

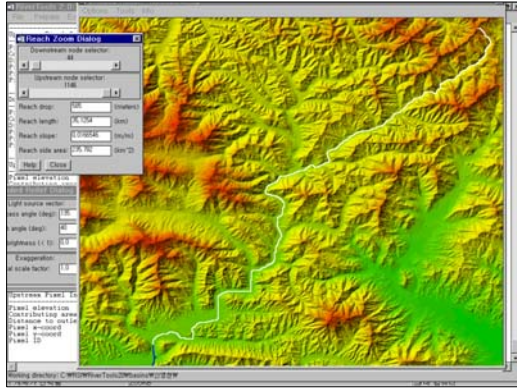


FIGURE 5. 3D model of study area

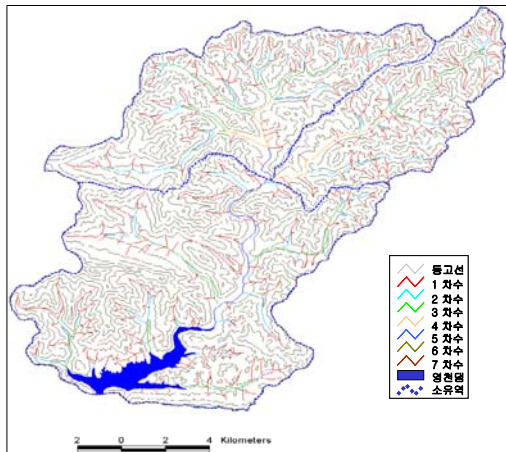


FIGURE 6. Stream order diagram

RiverTools는 기본적으로 DEM(digital elevation model) 데이터를 processing하여 하천의 네트

워크 분석이나 digital terrain 분석을 위하여 개발된 소프트웨어이다. 특히 데이터의 압축 기능과 효과를 사용함으로써 file-based algorithm으로 21억 픽셀정도(4,600×4,600)의 매우 큰 DEM으로부터 배수 네트워크 패턴을 산출해 낼 수 있을 정도로 정밀하고 편리한 소프트웨어이다.

격자방식의 DEM 자료로부터 지표면에 대한 수문학적 특성을 추출하는 요소중에서 중요한 것은 흐름방향을 결정하는 것으로서, 하나의 격자에서 인접한 8개의 격자와 고도값을 비교하여 가장낮은 고도값을 갖는 방향으로 흐름의 방향을 정한다. 각 격자에 대한 흐름방향을 결정하고 유로를 결정하기 위해서는 최소흐름 누적수를 부여하여 유로를 결정한다. 본 연구에서는 그림 6과 같이 하도망을 구성하였으며, 각 하천 차수별로 산정한 하천의 개수, 구역면적 및 유로연장을 분석한 결과 표 1과 같았다.

### 3. 강우-유출해석 모형의 매개변수 추출

본 연구에서 이용된 강우-유출해석모형에 대한 모형 매개변수를 추정을 위하여 DEM을 이용한 3차원 지형분석을 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 유출해석에 필요한 모형매개변수를 추정한 결과 다음과 같았다.

#### 1) GIUH 모형의 매개변수 추정

본 연구에서 사용된 GIUH모형은 Rosso(1984)가 제안한 2변수 Gamma분포 함수를 이용하였다. 이 모형에서는 매개변수인 형상계수( $N$ )와 규모계수( $K$ )를 하천의 지형학적 특성으로 나타낸 것으로서, Nash(1958)가 제안한 2변수

TABLE 1. Geomorphologic characteristics by stream order

Stream order	1	2	3	4	5	6	7
Stream number	6,357	1,434	310	69	15	3	1
Stream length(km)	0.17	0.39	0.80	1.98	2.99	8.27	20.18
Average basin area(km <sup>2</sup> )	0.04	0.18	0.85	4.26	16.03	69.08	238.76

TABLE 2. Parameters of GIUH model

	Bifurcation characteristic factors			GIUH parameter		
	Areal ratio	Bifurcation ratio	Length ratio	Mean velocity	Shape factor	Scale factor
	$R_A$	$R_B$	$R_L$	V(m/s)	(N)	(K)
Values	4.29	4.36	2.26	1.982	3.524	4.788

Gamma분포 함수를 이용하여 GIUH를 해석하였다. 매개변수  $N$ 과  $K$ 는 IUH의 원점 ( $t=0$ )에 대한 1차 모멘트  $m_1$ 과 2차 모멘트  $m_2$ 에 의해서 식 (26)~(27)과 같이 나타낼 수 있으며, Nash(1958)는 자신의 모형을 미계측 유역에 적용할 수 있도록 하기 위해서 영국의 90개 유역에 대한 자료를 분석하여  $m_1$ 과  $m_2$ 를 유역의 지형학적 특성과 연관시켜 식 (28)~(29)와 같은 관계를 도출하였다.

$$m_1 = NK \quad (26)$$

$$m_2 = N(N+1) K^2 \quad (27)$$

$$m_1 = 27.6 A^{0.3} S_0^{-0.1} \quad (28)$$

$$m_2 = 0.41 L^{-0.1} \quad (29)$$

Rosso(1984)는 독립변수  $N$ 과 종속변수  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_L$ 의 관계는 다중회귀분석을 이용하여 식(30)과 같이 구할 수 있으며,  $K$ 에 대해서도 같은 방법으로 식 (31)과 같이 구할 수 있다.

$$N = 3.29 (R_B / R_A)^{0.78} R_L^{0.07} \quad (30)$$

$$K = 0.70 [R_A / R_B R_L]^{0.48} v^{-1} L_0 \quad (31)$$

여기서,  $N$ 은 Rosso에 의한 Nash 모형의 형상계수,  $K$ 는 Rosso에 의한 Nash 모형의 규모계수,  $L_0$ 은 최고차 하천의 유로연장을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 Nash가 제안한 2변수 Gamma분포 함수를 이용해서 Rosso는 GIUH를 산정하는 방법인 식 (30)과 (31)을 이용하여 GIUH 모형의 하천특성 매개변수인  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_L$ 과 유출매개변수  $N$ ,  $K$ 에 대하여 검토한 결과 표 2와 같이 나타났다.

표 2에서 유속  $V$ 는 GIUH 모형의 규모계수  $K$ 값 결정시에 사용되는 매개변수로서 본 연구

에서는 유역의 평균유속추정에 어려움이 있으므로 지표면유출 및 하도유출이 지배적인 유역에서의 홍수 도달시간 계산을 위한 경험 공식인 Kirpich 공식에 의한 추정치 표 4와 DEM자료로부터 추출한 유역의 주수로 연장을 이용하여 추정된 값이다.

## 2) Clark 모형의 매개변수

본 연구에서 하천차수법칙을 이용한 강우-유출해석모형인 GIUH모형에 의한 해석결과의 적용성 검토를 위하여 비교대상으로 사용된 유출해석 모형인 Clark 모형의 인자는 유역의 지형학적 인자와 수문학적 인자의 영향으로 대별할 수 있다. 지형학적 인자로는 유역특성과 유로특성 등이 있으며, 수문학적 인자로는 홍수도달시간, 저류상수, 유역평균 유출수 등이 있다.

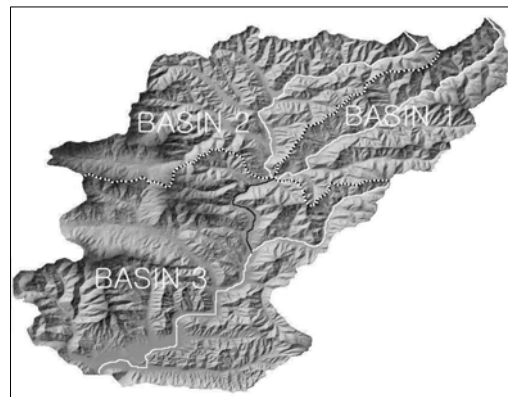


FIGURE 7. Study basin

본 연구에서는 영천댐 유역의 유출특성분석에 이용할 수 있도록 전체 하천유역을 본류 주요 수위표지점 및 합류점을 기준으로 하여 그림 7과 같이 3개 소유역으로 구분하였다.

TABLE 3. Geomorphological characteristics

Basin No.	Area (km <sup>2</sup> )	Perimeta (km)	Length (km)	Length of center (km)	Mean slope(m/m)			Basin		Stream order
					Surface	Total stream	Main stream	Mean wide	Shape factor	
1	44.019	33.301	16.075	8.445	0.363	0.162	0.031	2.898	0.190	6
2	68.170	47.108	14.220	5.560	0.334	0.116	0.039	5.045	0.275	7
3	123.591	57.409	21.820	11.620	0.321	0.102	0.027	6.326	0.326	7
Total	235.780	81.350	35.240	19.190	0.331	0.114	0.017	7.172	0.219	7

TABLE 4. Parameter of Clark model

	Basin 1	Basin 2	Basin 3	Total	Remarks
$T_c$ (hrs)	2.1219	1.7720	2.8539	4.9398	
$R$ (hrs)	1.2115	1.18903	1.9525	3.205	

먼저, 분석에 이용된 유역특성자료는 Rivertools 4.0 패키지를 이용하여 유역의 면적과 고도에 관련된 자료 및 하천차수와 같은 수계에 관한 자료 등으로 구분하여 분석하였으며 그 결과 표 3과 같았다.

다음으로, 홍수도달시간은 본 연구에서 사용된 GIUH모형과 Clark 모형해석에서 동시에 사용되는 중요한 인자로서 일반적으로 유로에 색소(dye)를 주입하여 실측하거나 동위원소의 측정 등에 의하여 실측할 수도 있다. 그러나 대부분의 경우 유역의 지형인자와 도달시간 사이의 경험식을 사용하여 산정하는 것이 보통이다.

본 연구에서는 홍수도달시간 및 저류상수 추정을 위하여 기존의 자연하천유역의 홍수도달시간 해석에서 지형특성 인자를 이용하여 널리 사용되고 있는 Kirpich식, Rizha식, Kraven식 및  $T_c$  &  $R$  식을 이용하여 검토한 결과 표 4와 같이 검토되었다.

마지막으로, 유출곡선지수(CN)는 소유역별 토지이용, 지표면처리상태 등에 따라서 상이하게 나타나므로 인자 추출이 매우 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 평균유출수산정을 위하여 위성영상자료와 SCS토양 분류기준을 적용하여 분석 검토된 기존의 연구결과(안승섭과 조

명희, 1999)를 이용하였다.

#### 4. 강우-유출 모형의 적용 및 분석

본 연구에서는 하천차수 법칙을 이용한 강우-유출해석을 위하여 해석에 필요한 공간특성자료를 DEM 자료를 이용하여 분석하였으며, 계산의 결과를 기존에 하천유역의 유출해석에 많이 이용되고 있는 Clark 모형에 의한 추정결과와 비교 검토하였다.

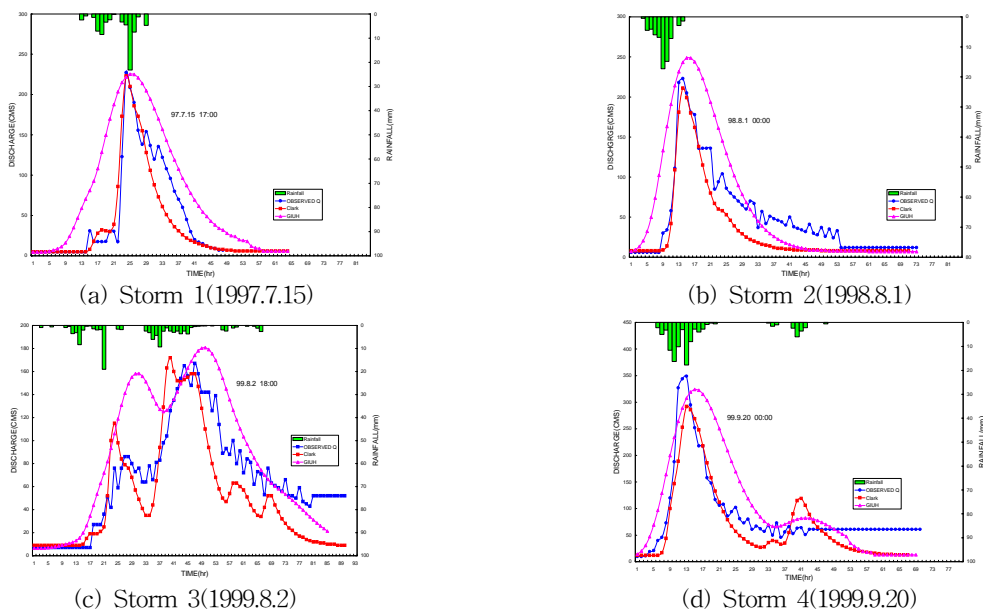
연구에 사용된 대상 호우 자료는 한국 수자원공사 영천댐 관리사무소에서 수집된 1997년에서 1999년 사이의 주요호우사상을 대상으로 하여 유출량의 실측치와 모형에 의한 유출량을 비교한 결과 표 5 및 그림 8과 같이 검토되었다.

표 5 및 그림 8에서 나타낸 바와 같이 첨두홍수량은 특이사상을 나타내고 있는 1998년 7월 25일과 8월 16일 호우 사상을 제외하고, Clark 모형과 GIUH 모형을 이용한 경우에 대하여 각각 1.9~23.9% 및 0.8~11.3%의 오차를 나타내고 있으며, 첨두시간오차는 Clark 모형과 GIUH 모형에서 각각 0.5~1시간 및 0~1시간으로 나타나고 있어 첨두발생시간은 거의 같은 것으로 검토되었다.

**TABLE 5.** Comparison of peak discharge and peak time

Storm	Method	$Q_p$		$t_p$ (hrs)		ME	MSE
		m <sup>3</sup> /s	R. E.(%)	hrs	R. E.(hrs)		
1997. 7. 15 07:00	observed	227.1	·	7.16. 16:00	·		
	Clark	222.8	-1.9	7.16. 16:00	0	0.837	41.725
	GIUH	225.3	-0.8	7.16. 17:00	1	0.863	25.468
1997. 8. 04 07:00	observed	200.4	·	8. 5. 04:00	·		
	Clark	152.5	-23.9	8. 5. 00:00	-4	0.768	27.130
	GIUH	202.1	8.5	8. 5. 07:00	3	0.668	30.598
1998. 7. 25 10:00	observed	181.0	·	7.27. 01:00	·		
	Clark	78.7	-56.5	7.27. 01:00	0	0.701	62.114
	GIUH	111.5	-38.4	7.26. 14:00	-10	0.811	53.023
1998. 8. 1 00:00	observed	223.3	·	8. 1. 13:00	·		
	Clark	210.8	-5.6	8. 1. 13:00	0	0.841	41.600
	GIUH	248.7	11.3	8. 2. 07:00	7	0.803	52.713
1998. 8. 16 00:00	observed	564.0	·	8.16. 14:00	·		
	Clark	408.1	-27.6	8.16. 22:00	8	0.711	98.457
	GIUH	418.6	-25.8	8.17. 02:00	12	0.628	171.124
1999. 8. 2 18:00	observed	167.5	·	8. 4. 16:00	·		
	Clark	158.0	-5.7	8. 4. 15:30	-0.5	0.613	62.434
	GIUH	180.7	7.5	8. 4. 19:00	3	0.929	27.961
1999. 9. 20 00:00	observed	348.8	·	9.20. 12:00	·		
	Clark	292.3	-16.2	9.20. 12:00	0	0.874	73.501
	GIUH	324.0	-7.1	9.20. 19:00	0	0.900	55.595

Notes : R.E. : Relative error, ME : Model efficiency, MSE : Mean square error

**FIGURE 8.** Comparison of hydrograph by the GIUH and Clark model

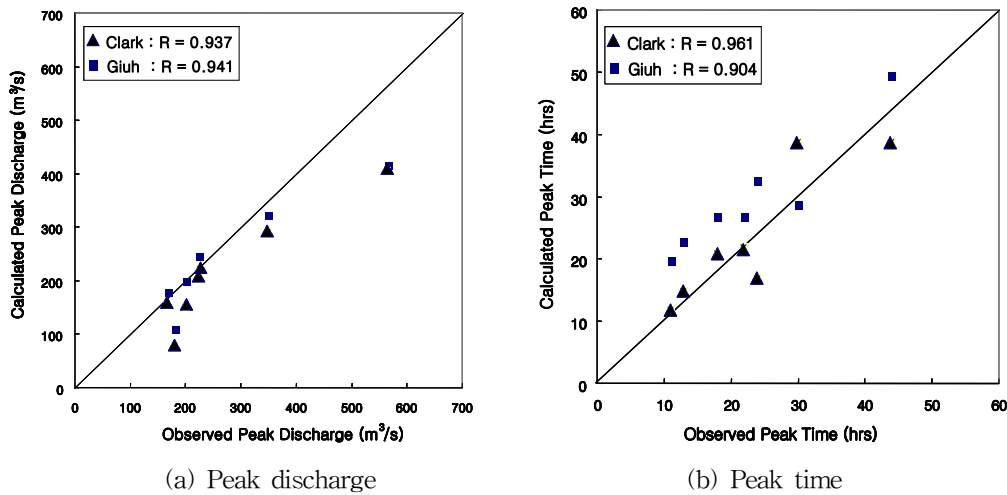


FIGURE 9. Comparison of observed and calculated value

또한, 홍수발생시 자연하천유역에서는 침두 홍수 발생시각과 홍수량이 매우 중요함으로 이들 추정치에 대한 관측치와의 상관관계를 검토한 결과 그림 9와 같았다.

먼저, 침두홍수량은 그림 9(a)에서 나타낸 바와 같이 이상치 호우로 분석된 1998년 8월 16일 호우를 제외하고는 발생패턴이 거의 유사한 것으로 검토되었으나 관측치 대비 계산치의 통계특성으로 볼 때 GIUH 모형이 R=0.941, 기존에 널리 사용되어 오고 있는 모형인 Clark 모형이 R=0.937로서 GIUH Model 이 침두 유출량 측면에서는 우수한 것으로 검토되었다.

다음으로, 침두발생시각은 그림 9(b)에서 나타낸 바와 같이 GIUH 모형에 의한 분석치가 침두발생시각이 관측 및 Clark 모형보다 늦게 발생함을 알 수 있었으며, 관측치 대비 계산치의 통계특성으로 볼 때 GIUH 모형이 R=0.904, 기존에 널리 사용되어 오고 있는 모형인 Clark 모형이 R=0.961로서 Clark 모형이 침두 유출 발생시각 측면에서는 우수한 것으로 검토되었다.

이상의 결과로 볼 때 강우-유출해석시에 GIUH 모형을 이용할 경우 기존에 사용되던

Clark 모형에 비해 홍수 침두 발생시각이 늦고, 수문곡선의 침두치가 크게 나타나고 있는 것으로 검토되었다.

그러나, 수문곡선에서 나타낸 바와 같이 홍수 수문곡선의 체적 즉, 총홍수량은 관측치 및 기존의 Clark 모형에 비하여 큰 차이가 있음을 알 수 있었으므로 좀더 신뢰성 있는 분석을 위해서는 보다 장기간의 호우사상을 대상으로 분석, 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 결 론

본 연구에서는 홍수유출해석시 사용되는 지형특성인자와 수문기상학적 특성인자 추출에 소요되는 시간적 경제적 노력을 최소화 함은 물론, 가능한 한 최소한의 인자를 사용하여 강우-유출예측이 가능하도록 모형을 구축하는데 목적을 두었다.

분석에 있어서는 기존의 지형 및 지질, 토지피복상태 등의 인자를 고려하지 않고 단순히 유역의 하천 분기특성만을 고려한 유출해석방법을 찾기 위하여, 기 구축되어 운용중인 수치지도자료를 이용하여 지형특성인자를 추출하여 강우-유출해석을 실시함으로써, 향후

미계측 소유역의 유출해석에 효과적으로 이용할 수 있도록 하고자 하였다.

연구대상유역은 금호강 상류에 위치한 영천댐유역을 대상으로 하여 주요호우시 강우-유출량 관측자료와 DEM자료를 이용한 공간 특성자료 추출결과를 이용하여 모형 매개변수를 추출하였다.

계산된 침투 유출량에 대한 검토결과 Clark 모형과 GIUH 모형을 이용한 경우에 대하여 각각 1.9~23.9% 및 0.8~11.3%의 상대오차를 나타내고 있고, 전체적으로, 수문곡선의 침투치가 크게 나타나고 있는 것으로 검토되었다. 즉, 관측치 대비 계산치의 통계특성으로 볼 때 GIUH 모형이  $R=0.941$ , 기존에 널리 사용되어 오고 있는 모형인 Clark 모형이  $R=0.937$ 로서 GIUH 모형이 침투 유출량 측면에서는 우수한 것으로 검토되었다.

그리고, 계산된 침투 유출량의 발생시각에 대한 검토결과 Clark 모형과 GIUH 모형을 이용한 경우에 대하여 각각 0.5~1시간 및 0~1시간의 상대오차를 나타내고 있었으며, 전체적으로 볼 때 GIUH 모형을 이용할 경우 기존에 사용되던 Clark 모형에 비해 홍수 침투 발생시각이 늦은 것으로 검토되었다. 관측치 대비 계산치의 통계특성으로 볼 때 GIUH 모형이  $R=0.904$ , 기존에 널리 사용되어 오고 있는 모형인 Clark 모형이  $R=0.961$ 로서 Clark 모형이 침투 유출 발생시각 측면에서는 우수한 것으로 검토되었다.

그러나, 수문곡선에서 나타낸 바와 같이 홍수수문곡선의 체적 즉, 총 홍수량은 관측치 및 기존의 Clark 모델에 비하여 큰 차이가 있음을 알 수 있었으므로 좀더 신뢰성 있는 분석을 위해서는 보다 장기간의 호우사상을 대상으로 분석, 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서, 강우-유출의 과정을 해석하기 위한 본 연구에서 제안된 하천차수법칙을 이용한 GIUH 모형을 적용하여 분석한 결과, 저류시설이 아닌 경우의 홍수발생시에는 침투발생시각

과 침투홍수량이 매우 중요하므로 모형의 적용에 대한 편리성과 자료취득의 용이성 등을 고려할 때 하천유출예측에 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 하천유역의 강우-유출해석의 알고리즘으로서 적합하다고 사료된다. **KAGIS**

## 참고문헌

- 김경탁, 최윤석, 심명필. 1998. GIS기초자료에 따른 유출모의의 영향분석. 한국수자원학회 학술발표회 발표논문집. 684쪽.
- 김대식. 1995. 지표배수량 산정을 위한 지리정보시스템의 응용모형개발. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 안승섭, 이증석, 신성일, 김대형, 정순돌. 2002. 하천지형특성을 이용한 홍수유출해석. 한국지리정보학회 추계학술발표회 발표논문집. 85-91쪽.
- 안승섭, 조명희. 1999. 지리정보시스템을 이용한 하천유역의 지상학적 특성분석. 한국지리정보학회지 2(3):23-34.
- 정하우, 김성준, 최진용, 김대식. 1995. 소유역 지표유출의 시간적·공간적 재현을 위한 GIS 응용모형. 한국GIS학회지 3(2):136-146.
- 진현호. 2000. 지리정보시스템을 이용한 하천유역의 강우-유출해석에 관한 연구. 경일대학교 대학원 석사학위논문.
- 최철웅. 1999. 지형공간정보체계를 이용한 수문지형인자 결정에 관한 연구. 부산대학교 대학원 박사학위논문.
- 허창환. 2001. GIS를 이용한 강우-유출해석에 관한 연구. 영남대학교 대학원 박사학위논문.
- 近森秀高, 岡 太郎 外. 1998. 流出モデルの構築におけるGISの応用に關する研究. Theory and Application of GIS 6(1):19-28.
- Gupta, V.K., E. Waymire and C.T. Wang. 1980. Representation of an Instantaneous unit hydrograph from Geomorphology. Water Resources Research 16(5):855-862.

- Hormadka, T.V. and R.J. Whitley. 1999. On formalization of unit hydrograph and link-node hydrograph-routing systems. *Journal of Hydrology* 223:66-84.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of stream and their drainage basins : hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. of Amer.* 56:275-375.
- Melton, M.A. 1959. A derivation of Strahler's channel ordering system. *J. Geol.* :67.
- Nash, J.E. 1958. The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association for Scientific Hydrology. Publication No. 42*, pp.114-118.
- Rodriguez-Iturbe, I., G. Devoto and J.B. Valdes. 1979. Discharge response analysis and hydrologic similarity: The geomorphological structure of hydrologic response. *WRR* 150:1409-1420.
- Rosso, R. 1984. Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resources Research* 20(7):914-920.
- Strahler, A.N. 1954. Statistical analysis in geomorphic research. *Journal of Geology* 61:1-25. **KAGIS**