

## 지형형태학적 순간단위도의 특성속도에 대한 고찰

### Investigation of the Characteristic Velocity of Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph

김 상 단\* / 유 철 상\*\* / 윤 용 남\*\*\*

Kim, Sangdan / Yoo, Chulsang / Yoon, Yong Nam

#### Abstract

The GIUH (Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph) is to be applied to the ungauged or insufficiently gauged basins. For this purpose, an accurate estimation of the characteristic velocity is one very important part, but any proper method for this has not been developed yet. In case that we have enough rainfall and runoff data, the estimation of the characteristic velocity may be an easy job, but it is out of the purpose of the GIUH. Reminding that the purpose of GIUH the characteristic velocity should be estimated based on the geomorphologic analysis and also be simple for easy application. In this research analysis and application of the GIUH was given to several sub-basins in Wi-stream river basin, Gono, Donggok and Hyoryung. After deriving the characteristic velocity through a optimization process with real data, it is compared with several velocities derived from geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph theory and several other concentration time formulae. The estimated characteristic velocities using Kerby, Kim, Kinematic Wave, and Brasby-Williams formulae found to give the appropriate results. However, as the Kerby, and the Kinematic Wave require user's decision of the Manning's n value, the Kim and the Braby-Williams seem to be more applicable and recommended as characteristic velocity formula.

*Keywords* : geomorphologic instantaneous unit hydrograph, characteristic velocity, concentration time

#### 요 지

지형형태학적 순간단위도(GIUH)는 미계측유역이나 관측자료가 충분하지 않은 유역의 적용을 목적으로 한다. 이를 위해서는 GIUH의 동역학적 매개변수인 특성속도의 정도 있는 추정인 가장 중요한 요소이나 아직까지 그에 대한 정확한 산정방법은 개발되어 있지 못한 실정이다. 실측된 강우 유출자료가 존재할 경우, 특성속도의 추정은 상대적으로 용이하나, GIUH의 목적에 맞지 않는다. 이 미계측 유역에 대한 유출 해석임을 상기한다면 특성속도 역시 지형형태학적인 해석을 바탕으로 산정되어야 하고, 그와 더불어 실제 적용에 합리적이며 간편한 식의 구조로 표현되어야 한다. 이에 본 연구에서는 GIUH 이론을 위천의 고노, 동곡, 효령 유역에 적용하고, 실측 자료를 근거로 한 최적화 과정을 통하여 특성속도를 산정하였다. 그렇게 구한 특성속도는 GIUH 및 기타 집중시간에 관한 경험공식과의 비교를 통해 가장 적절한 방법을 선정할 수 있도록 하였다. 비교 결과 Kerby, 김남원, Kinematic Wave, Brasby-Williams 공식 등이 비교적 실측치와 근사한 값을 주는 것으로 조사되었으나, Kerby, Kinematic Wave 공식 등의 경우 조도계수 n값이 다소 주관적으로 추정될 수 있으며, 또한 특성속도가 이들 계수에 따라 크게 변화하는 단점이 있는 것으로 나타났다. 따라서, 비교적 정확하고도 객관적인 값을 주는 김남원 및 Brasby-Williams 공식을 유역의 특성속도 산정공식으로 제시할 수 있을 것으로 보인다.

**핵심용어** : 지형형태학적 순간단위도, 특성속도, 집중시간

\* 고려대학교 대학원 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

\*\* 고려대학교 환경공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea

\*\*\* 고려대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

## 1. 서론

많은 수문학자들이 유역의 지형형태학적 특징과 유역반응에 대해 연구해 왔다. 합성단위도의 개념이나 지역화 절차 등도 이러한 연구의 성과물들 일 것이다. 이들은 모두 통계학적 접근에 바탕을 둔 특정 유역에 대한 특정 유역반응을 찾기 위한 도구로서, 일반적으로 이들 모형들은 대상유역의 관측자료를 이용하여 유역반응을 규명하고 있다. 그러나, 많은 경우 미세측유역을 대상으로 하므로 기존의 방법을 미세측유역에 적용하는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서, 1970년 이후로는 지형형태학과 수문학의 이론적인 연결점에 관심을 기울여 주어진 지형형태학적 특징을 가지고 있는 유역의 가장 조화로운 평균 유역반응을 발견하려는 관점에서의 연구가 진행되어 왔다. 대표적인 연구로서 Rodriguez-Itube 등(1979)과 국내에서는 김태균(1987), 김남원(1998) 등의 연구를 찾아볼 수 있다.

본 연구에서는 지형도에서 구할 수 있는 하상지형인자를 이용하여 지형형태학적 순간단위도(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 유도하고 관측된 유역단위도(HEC-1이용)와 비교함으로써 미세측유역이나 자료가 결핍된 유역에 그 적용성 여부를 판단하였다. 이 때, GIUH는 하천 및 사면에 대한 응답함수를 얼마나 정확하게 구하느냐에 따라 그 적용성이 좌우된다. 이를 위해서는 응답함수의 주된 매개변수인 특성속도(Characteristic Velocity)를 가능한 한 정확도 높게 구하여야 하지만 미세측유역에서 특성속도를 높은 정도로 추정할 수 있는 방법은 아직까지 개발되어있지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 특성속도가 유역출구에 도달할 때까지의 전체 평균유속을 의미하며 현재 추정하고자 하는 유속이 유역 공간평균이라는 점을 감안하여 이와 비슷한 개념의 유역 반응시간인 집중시간(Concentration Time)과 유로연장을 이용할 경우 쉽게 특성속도를 추정할 수 있으리라고 판단되며 특성속도를 관측된 값과의 최적화 과정을 통하여 유도한 후, 추정된 특성속도와 비교함으로써 더 좋은 결과를 도출할 수 있으리라고 본다.

## 2. GIUH의 기본이론

### 2.1 유역의 구성

유역은 다음과 같은 Horton 및 Strahler의 치수

법칙을 따른다고 가정한다; 1) 더 이상의 지류를 가지지 않는 하천을 1차하천이라 한다. 2)  $i$ 차하천 2개가 만나면  $i+1$ 차하천이 된다. 3) 서로 다른 치수의 하천이 만나면 2개의 하천치수 중 큰 치수를 유지한다. 아울러, 유역의 지형형태학적 인자들은 다음과 같은 관계를 만족한다고 가정한다.

(1) 하천수 법칙

Horton은 임의의 유역에 있어서 각 치수의 하도 수는 치수의 증대에 수반하여 역기하급수적으로 감소하는 것을 암시하였다.  $N_\omega$ 의  $N_{\omega+1}$ 에 대한 비율을 하천분기비  $R_B$ 라하며 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

(2) 하천길이 법칙

$$\text{길이비 } R_L = \frac{\bar{L}_\omega}{L_{\omega-1}} \quad (2)$$

(3) 하천면적의 법칙

$$\text{면적비 } R_A = \frac{\bar{A}_\omega}{A_{\omega-1}} \quad (3)$$

(4) 하천경사 법칙

$$\text{경사비 } R_S = \frac{\bar{S}_{\omega-1}}{S_\omega} \quad (4)$$

(5) 수계밀도

$$\text{수계밀도 } D = \frac{L_T}{A_\Omega} = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \frac{N_\omega \bar{L}_\omega}{A_\Omega} \quad (5)$$

(6) 하천주기

$$\text{하천주기 } F = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} N_\omega}{A_\Omega} = 0.694D^2 \quad (6)$$

위의 식 (1)~(6)에서  $N_\omega$ ,  $\bar{A}_\omega$ ,  $\bar{L}_\omega$ ,  $\bar{S}_\omega$ 는 각각 각 치수 $\omega$ 에 해당하는 하천의 수, 면적, 하도 평균연장, 평균경사를 의미하며,  $\Omega$ 는 최고치수를 의미한다.

(7) Leopold와 Maddock의 연구

Leopold와 Maddock(1953)은 하천의 유량, 유속, 경사 등 여러 가지 지형형태학적 인자들을 연구한 결과 유역 내에서 각기 다른 재현기간의 경우에 따른 유속의 변화는 매우 민감한 것으로 나타났으나, 같은 재현기간의 경우에는 유역 내 여러 지점간의 유속은 대체로 비슷하다는 결론을 얻을 수 있었다. 이는 어떤 경우에 대한 유역 내 임의의 장소에서의 유속은 일정하다고 가정할 수 있는 근거를 제공해 준다고 할 수 있다.

## 2.2 GIUH의 유도

하천은 가장 효율적으로 유입량을 배수시키는 방향으로 성장해왔다. 유역반응과 지형형태학적 특징의 이론적 연결은 선형성가정과 순간단위도 이론에 기초를 둔다. Shreve(1967)과 Gupta와 Waymire(1983)는 지형형태학적 특징과 그로부터 유도된 수문학적 반응을 연구하기 위하여 다음 두 가지를 가정하였다; 1) 인위적인 통제가 없다면, 하천망에서 유원점과 접합점은 서로 독립적으로 발생하며, 각각의 발생확률은 0.5 이므로 지형학적으로 무작위이다. 이는 주어진 크기의 모든 하천망은 서로 비슷하다는 것을 나타낸다. 2) 유원점에서 시작되는 하천과 내부 접합점을 연결하는 하천, 그리고 그와 관련된 유역은 무작위적인 변수들로서, 그 발생위치나 확률밀도함수에 있어서 서로 독립이다.

순간단위도를 얻기 위하여 무한히 많은 수의 물분자를 전체 유역에 순간균등입력으로 취한 후, 무작위로 선택된 물분자의 이동경로를 생각한다. 예를 들어 3차유역이라 한다면 다음과 같은 이동 경로를 생각할 수 있다. 이 때, 경우는 하천에는 직접 떨어지지 않는다고 가정하며, 그 초기상태는 항상 지표면( $a_i$ )에서 시작된다고 가정한다.

경로 1 :  $a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로 2 :  $a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로 3 :  $a_2 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

경로 4 :  $a_3 \rightarrow r_3 \rightarrow$  출구

여기서  $r_i$ 는  $i$ 차 차수의 하천을 의미한다. 경로  $s$ 에 대한 물분자가 이동시간을  $T_s$ 라 할 때, 이는 물입자가 각 상태에서 소요하는 시간의 총합과 같으며, 물입자가 경로  $s$ 를 따라 시간  $t$  안에 출구까지 흐를 확률은

$P(T_s \leq t)$ 이다. Gupta 등(1980)에 의하면 물입자가 일정한 시간  $t$ 를 초과하지 않고 무작위 변량인  $T_B$ 시간 안에 출구까지 이동하는데 걸리는 시간의 누가확률밀도함수  $P(T_B \leq t)$ 는 식 (7)과 같이 각 경로에 대한 이동시간의 누가확률밀도함수  $P(T_s \leq t)$ 와 각 경로에 해당하는 유역으로 물입자가 떨어질 확률  $P(s)$ 를 곱한 것의 각 경로별 합으로 표현된다.

$$P(T_B \leq t) = \sum_{s \in S} P(T_s \leq t)P(s) \quad (7)$$

식 (7)에서  $S$ 는 유역의 가능한 모든 경로를 나타낸다. 유역에 주어진 각 차수의 지표면 및 하천에서의 이동 시간이 확률밀도함수  $f_{T_a}(t)$ ,  $f_{T_r}(t)$ 로 각각 표현된다면 유역의 어떤 경로를 통하여 물입자가 이동하는 시간  $T_s$ 과 그에 따른 확률밀도함수  $f_{T_s}(t)$ 는 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_s = T_a + T_{r_1} + T_{r_2} + \dots + T_{r_n} \quad (8)$$

$$f_{T_s}(t) = f_{T_a}(t) * f_{T_{r_1}}(t) * f_{T_{r_2}}(t) * \dots * f_{T_{r_n}}(t)$$

여기서 \*는 회선적분을 의미한다. 따라서,  $P(T_s \leq t)$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(T_s \leq t) = \int_0^t f_{T_s}(t) dt \quad (9)$$

다음으로 각각의 경로로 물 입자가 유입할 확률밀도함수  $P(s)$ 는 식 (10)과 같다

$$P(s) = \theta_i P_{ij} P_{jk} \dots P_{l\Omega} \quad (10)$$

여기서, 전체 유역면적과 해당차수 하도로 직접 배수되는 유역면적과의 비인 초기상태확률  $\theta_\omega$  및  $i$ 차에서  $j$ 차 하천으로 배수될 상태전이확률  $P_{ij}$ 는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\theta_\omega = \frac{N_\omega}{A_\Omega} \left[ \bar{A}_\omega - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{A}_j \left( \frac{N_j P_{j\omega}}{N_\omega} \right) \right],$$

$$\text{at } \omega = 2, \dots, \Omega$$

$$\theta_1 = \frac{N_1 \bar{A}_1}{A_\Omega}$$

$$P_{ij} = \frac{(N_i - 2N_{i+1})E(j, \Omega)}{\sum_{j=1}^{\omega} E(k, \Omega)N_i} + \frac{2N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1,j},$$

at  $1 \leq i \leq j \leq \Omega$  (11)

여기서,  $j = i + 1$ 이면  $\delta_{i+1,j} = 1$ ,  $j \neq i + 1$ 이면  $\delta_{i+1,j} = 0$ 이며,  $E(j, \Omega)$ 는 Smart(1972)에 의하면 식 (12)와 같이 쓸 수 있다

$$E(i, \Omega) = N_i \prod_{j=2}^i [(N_{j-1} - 1) / 2N_j - 1],$$

$i = 2, \dots, \Omega$  (12)

즉, 초기상태 및 상태전이 확률밀도함수는 모두 영역의 지형형태학적 인자들로 표현될 수 있음을 의미한다. 그러나, 특정 영역에 있어서의 초기상태확률과 상태전이확률은 지형도상에서 정확히 구할 수 있으므로 본 연구에서는 지형도를 이용하여 초기상태 및 상태전이확률을 직접 구하는 방법을 사용하였다. 따라서, 순간 단위도의 증거는 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$h_B(t) = dP(T_B \leq t) / dt$$

$$= \sum_{s=1}^{\omega} f_{T_s}(t) * f_{T_s}(t) * \dots * f_{T_s}(t) P(s)$$

(13)

이상의 과정을 정리하면, 순간단위도는 초기 유역전반에 입력된 물입자 중 유역내 특정차수에 입력될 확률, 작은 차수에서 큰 차수로의 이동확률, 특정차수 하천에서 이동시간분포확률 등으로 표현되는 함수로서 나타낼 수 있다.

이러한 일련의 작업에서 가장 중요한 사항 중 하나는 각 차수의 하천에 대하여 정의되어야 할 상태전이 확률밀도함수이며, Rodriguez-Itube와 Gonzalez-Sanabria(1982)는 다음과 같이 지수함수로서 정의하였다.

$$f_{T_s}(t) = \frac{1}{k_\omega} \exp(-t/k_\omega)$$

(14)

여기서  $k_\omega$ 는 각 차수하천의 평균이동시간이다.  $k_\omega$

는 특성속도  $V$ 를 통하여 정의될 수 있으며, 식 (15)에 의하여  $k_1$ 이 정의되면 그 이상 차수의  $k_\omega$ 는  $k_1$ 으로부터 계산 가능하다.

$$k_\omega = \frac{\bar{L}_\omega}{V} = k_1 R_L^{\omega-1}, \quad k_1 = \frac{\bar{L}_1}{V}$$

(15)

또한, 유역의 하천에서뿐만 아니라 지표면에서의 평균이동시간 또한 무시할 수 없으므로, 지표면에 대한 상태전이 확률밀도함수를 다음과 같이 정의할 수 있다. 유역의 지표면 형상을 편의상 직사각형으로 보면, 각 차수의 지표면에서 흐름길이  $D_\omega$ 는 식 (16)과 같다.

여기서,  $A_\omega^*$ 는  $\omega$ 차수하천으로 직접 배수되는 유역의 면적이다. 따라서, 지표면에서의 평균이동시간은 하천에서와 마찬가지로 유역의 하상지형학적 인자로부터 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$D_\omega = \frac{A_\omega^*}{2L_\omega}, \quad k_\omega = \frac{\bar{D}_\omega}{V}$$

(16)

이때, 특성속도  $V$ 는 Leopold와 Maddock(1953)의 연구에서 언급했듯이 유역 전반에 걸쳐서 일정한 값을 갖는 GIUH의 동역학적 매개변수로서 Valdes 등 (1979)은 특성속도의 적절한 추정 값으로 유역의 어떤 경우사상시 침투유량이 발생할 때의 속도를 사용할 것을 추천하고 있다. 그러나, 본 연구에서는 이후에 기존의 집중시간 경형공식 및 GcIUH에서의 특성속도와 비교하기 위하여 식 (17)과 같은 최적화 과정을 통하여 특성속도를 구하였다.

$$TEMP = \sum [OBS(T) - CMP(T)]^2$$

(17)

= A Minimum

여기서,  $OBS(T)$ 는 관측치를 사용하여 HEC-1모형의 매개변수 최적화과정을 통하여 구한 각 시간( $T$ )별 단위도 증거이며,  $CMP(T)$ 는 어떤 특정 특성속도를 사용하여 구한 각 시간( $T$ )별 단위도 증거이다 따라서, 상대적으로 작은 범위에서부터 큰 범위까지의 특성속도 중 식 (17)의  $TEMP$ 변수를 최소화하는 즉, 관측단위도와 계산단위도의 각 시간별 증거차의 지승을 최소로 하는 특성속도를 구한 후, 이 값을 유역의 특성속도로 사용하여 최종적인 단위도를 유도하였다.

순간단위도를 위한 회선연산은 다음과 같이 서로 크

기가 다른 선형저수지의 조합으로 보고 계산할 수 있다.

$$f_T^{\Omega}(t) = \frac{1}{k_{\omega}} e^{-t/k_{\omega}}$$

$$f_T^{\Omega}(t) * \dots * f_T^{\Omega}(t) = \sum_{j=1}^{\Omega} \frac{k_j^{\Omega-2} \exp(-t/k_j)}{\prod_{i=1, i \neq j}^{\Omega} (k_j - k_i)}$$

for  $\Omega \geq 2$  (18)

식 (18)에서 알 수 있듯이, 만약 각 치수 소유역의 하천길이와 그 지베면적이 모두 같은 경우 유역은 n개의 동일 크기 선형저수지의 조합으로 볼 수 있으며, 이에 대한 유역응답은 Nash모형에서의 그것과 완전히 동일하다 할 수 있다. 따라서, Nash모형은 GIUH의 특수한 형태임을 알 수 있다.

### 3. 자료조사

GIUH의 적용성을 검토하기 위하여 낙동강유역 IHP 대표유역인 위천유역내 고노, 동곡, 효령 유역을 선정하였다. 그림 1은 고노, 동곡, 효령 유역을 포함한 위천 전체유역을 나타내고 있다.

#### 3.1 수 문

96년 3월~8월, 97년 5월~8월 사이 강우 중에서 960304, 960616, 960624, 960704, 960826, 970512, 970624, 970705, 970715, 970803 강우사상을 단위도 유도를 위하여 선택하였으며, 각 소유역별 총강우량은 표 1과 같다. 표 1의 고노, 동곡, 효령 유역의 총강우량은 각 유역 내 강우관측자료를 바탕으로 Thiessen 망을 구성하여 계산한 유역의 평균강우량이다. 참고로 강우-유출 자료는 국제수문개발계획(건설교통부, 1996, 1997)에서 참조하였다

#### 3.2 유역의 하상지형인자

적용 유역의 하상지형인자는 1:50,000 지형도에서 구하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

### 4. 유역적용

#### 4.1 대상 소유역의 지형형태학적 특성

2장에서 설명한 방법으로 해당 유역의 지형형태학적 특성을 구한 결과가 그림 2 및 표 3과 4에 나타나 있다.

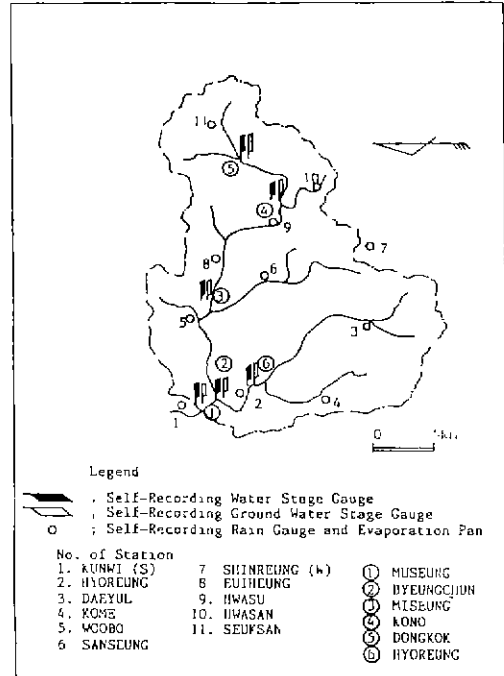


그림 1. 위천 유역도

#### 4.2 GIUH의 동역학적 매개변수 추정

##### 4.2.1 HEC-1 모형을 이용한 관측치의 1시간 단위도 유도

고노, 동곡, 효령 유역에 대한 자료로는 1996년 3

표 1. 위천유역 총강우량

(단위 : mm)

강 우	고 노	동 곡	효 령
960304	58.1	62.9	63.9
960616	132.9	159.5	118.1
960624	163.3	154.9	153.8
960704	52.0	70.3	66.7
960826	91.4	100.0	65.7
970512	37.8	43.9	31.0
970624	91.6	118.0	124.3
970705	149.9	176.0	204.1
970715	59.4	76.4	49.1
970803	92.9	126.7	97.9

표 2. 위천유역의 하상지형인자

(단위 : 길이(km), 면적(km<sup>2</sup>))

지점	차 수	개 수	길 이	면 적	경 사
고 노	1	83	0.764	62.463	0.147
	2	16	1.390	86.202	0.065
	3	6	2.389	99.735	0.026
	4	1	14.160	109.730	0.007
동 곡	1	27	0.708	16.238	0.170
	2	7	1.616	27.002	0.072
	3	2	2.410	30.985	0.036
	4	1	3.051	33.630	0.012
효 령	1	146	0.860	85.801	0.124
	2	42	1.404	120.705	0.055
	3	7	4.189	138.950	0.024
	4	1	15.740	151.050	0.009

월~8월 및 1997년 5월~8월 사이의 주요유출기록으로 30mm~205mm정도의 누가강우량이 사용되었으며, 유효우량의 결정 및 기저유출의 분리는 각각 SCS방법과 수평직선분리법을 사용하였다. 유역의 단위도는 HEC-1모형을 이용하여 구하였으며 그 계산 결과로 구한 단위도를 유역의 관측된 단위도로 보고, GIUH로

표 3. 위천유역의 지형형태학적 특성

	A(km)	RB	RL	RA	RS	L <sub>2</sub> (km)	L <sub>1</sub> (km)
고노	109.73	4.153	2.535	4.989	2.732	13.990	0.764
동곡	33.63	3.047	1.613	3.884	2.374	3.090	0.708
효령	151.05	5.335	2.668	6.410	2.745	12.466	0.860

표 4. 위천유역의 상태전이확률

	P12	P13	P14	P23	P24	P34
고노	0.7364	0.1364	0.1273	0.7826	0.2174	1.0000
동곡	0.7778	0.1481	0.0741	0.7143	0.2857	1.0000
효령	0.8219	0.1164	0.0616	0.7619	0.2381	1.0000

부터 계산된 단위도와 비교하였다. HEC-1모형을 이용한 소유역별 호우사상에 대한 단위도는 그림 3와 같으며 침투유량 및 침투시간은 표 5와 같다.

#### 4.2.2 유역의 최적 특성속도 추정

관측된 단위도를 기준으로 앞서 언급한 편차 최소화방법을 이용하여 추정된 특성속도 및 유효강우량의 특성은 표 6과 같다. 표 6에서 지속기간 및 최대강우강도,

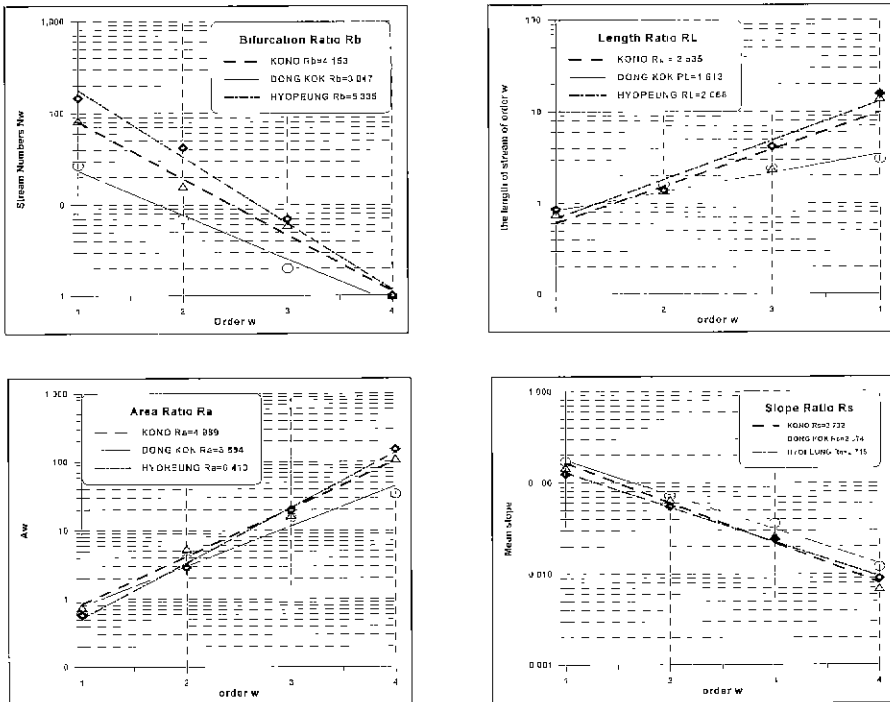
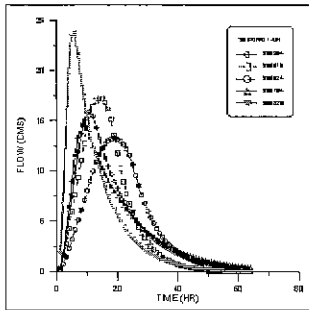
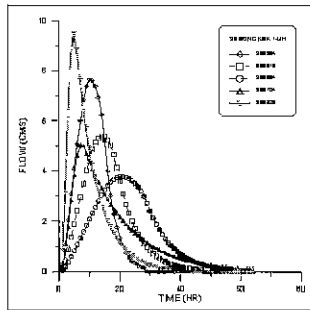


그림 2. 위천유역의 지형형태학적 특성

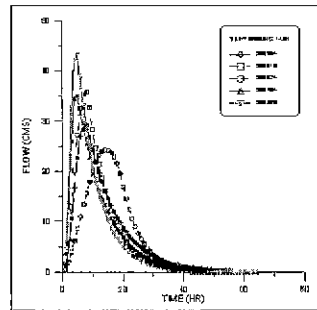
(a) 96년 고노



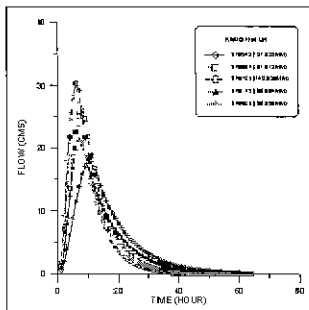
(b) 96년 동곡



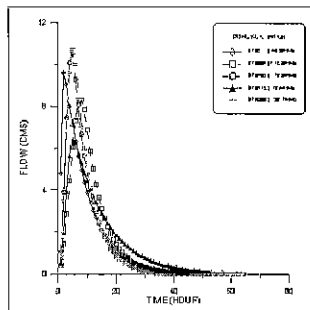
(c) 96년 효령



(d) 97년 고노



(e) 97년 동곡



(f) 97년 효령

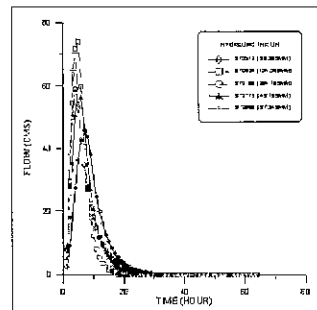


그림 3. 96-97년 각 소유역별 각 호우별 1시간 단위도 (HEC-1모형)

평균강우강도는 모두 유효강우량에 대한 특성을 나타내며, 지속시간, 유효강우의 최대강우강도, 평균유효강우강도 내고 있다. 그림 4는 유역의 총유효우량, 유효강우의 지속시간, 유효강우의 최대강우강도, 평균유효강우강도와 특성속도와의 관계를 나타낸 것이다.

표 5. HEC-1 1시간 단위도

(단위 : 유효강우량 mm, 첨두유량  $m^3/s$ , 첨두시간 hr)

	고 노			동 곡			효 령		
	유효강우량	첨두유량	첨두시간	유효강우량	첨두유량	첨두시간	유효강우량	첨두유량	첨두시간
960304	47.9	16.00	11	62.9	7.65	10	9.0	29.46	7
960616	92.5	17.25	14	83.6	5.37	14	15.3	35.75	8
960624	115.9	13.22	19	94.9	3.76	21	17.3	24.30	14
960704	49.7	14.80	9	46.9	5.04	7	9.9	35.16	5
960826	69.9	23.69	6	53.1	9.50	5	8.1	43.34	5
970512	20.8	17.83	10	20.6	9.59	2	27.9	45.02	7
970624	50.0	25.91	8	105.9	8.33	8	72.5	73.95	5
970705	84.6	30.32	6	119.1	10.50	5	129.1	58.97	4
970715	32.4	21.28	7	42.4	6.41	5	45.0	58.49	5
970803	53.2	28.70	5	105.5	10.76	5	76.0	70.11	4

표 6. 유역의 유효강우량의 특성 및 특성속도

(단위 : 특성속도(m/s), 유효강우량(mm), 지속시간(hr), 강우강도(mm/hr))

유역	강우사상	특성속도	유효강우량	지속시간	최대강우강도	평균강우강도
고 노	960304	0.265	47.88	9	7.85	5.32
	960616	0.255	92.51	15	13.16	6.17
	960624	0.195	115.91	25	11.39	4.64
	960704	0.265	49.71	13	11.92	3.82
	960826	0.435	69.91	7	14.04	9.99
	970512	0.290	20.82	9	5.98	2.31
	970624	0.410	50.00	29	14.61	1.72
	970705	0.495	84.64	36	20.94	2.35
	970715	0.370	32.38	12	16.41	2.70
중 북	960304	0.180	62.90	8	14.00	7.86
	960616	0.125	83.57	16	15.81	5.22
	960624	0.085	94.87	21	11.03	4.52
	960704	0.145	46.92	8	7.75	5.87
	960826	0.260	53.07	15	10.27	3.54
	970512	0.295	20.56	5	8.47	4.11
	970624	0.205	105.93	28	26.36	3.78
	970705	0.290	119.08	34	25.85	3.50
	970715	0.185	42.44	11	20.98	3.86
효 양	960304	0.430	8.96	6	4.02	1.49
	960616	0.490	15.29	12	4.33	1.27
	960624	0.305	17.31	17	2.60	1.02
	960704	0.570	9.90	7	2.10	1.41
	960826	0.665	8.13	11	1.62	0.74
	970512	0.585	27.91	9	8.69	3.10
	970624	0.985	72.53	37	13.93	1.96
	970705	0.880	129.09	38	25.11	3.40
	970715	0.785	45.03	14	23.91	3.22
970803	1.040	76.02	17	20.16	4.47	

5. 결과 및 분석

5.1 GIUH로 유도된 1시간 단위도

최적화된 특성속도로 유도된 1시간 단위도의 침투유량과 침투시간은 표 7과 같으며, 이에 대한 단위도는 그림 5~7과 같다. 표 7에서 침투유량 아래의 괄호는

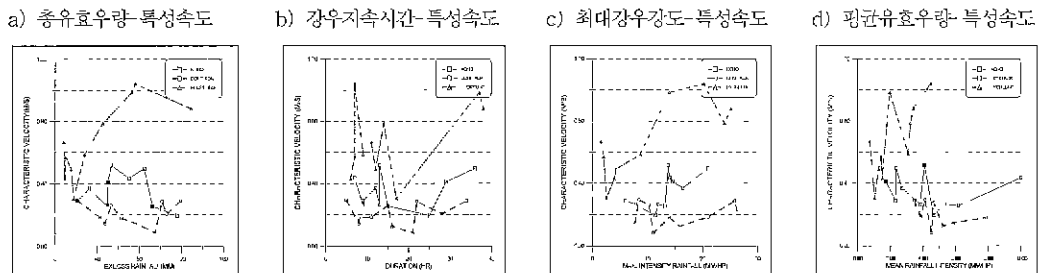
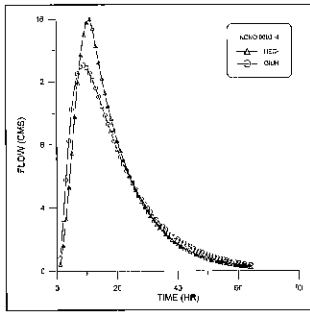


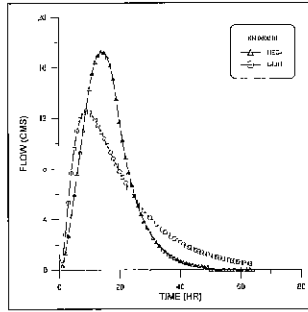
그림 4. 유역의 유효강우특성과 특성속도의 관계



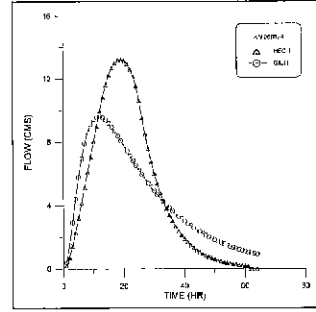
(a) 960304



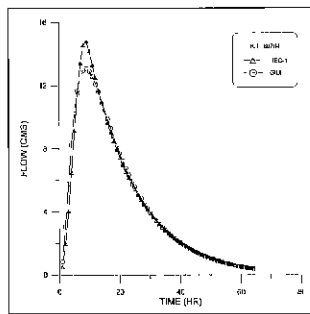
(b) 960616



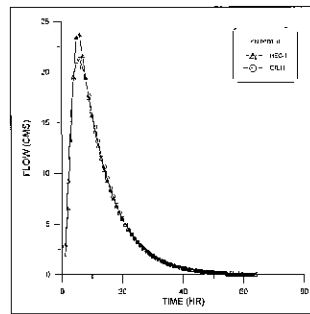
(c) 960624



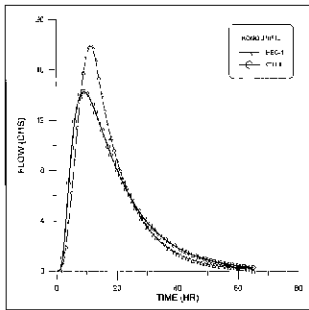
(d) 960704



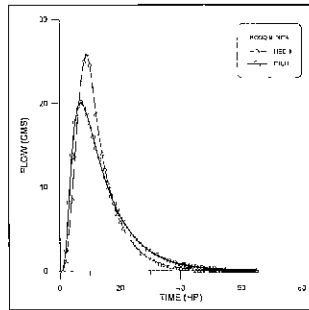
(e) 960826



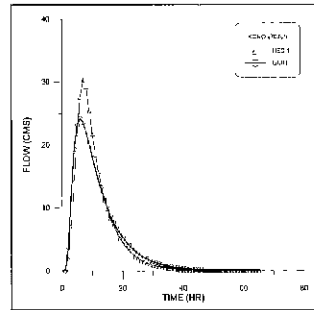
(f) 970512



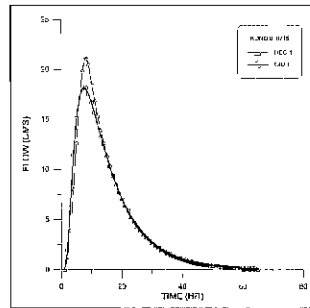
(g) 970624



(h) 970705



(i) 970715



(j) 970803

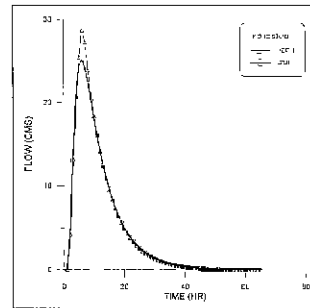
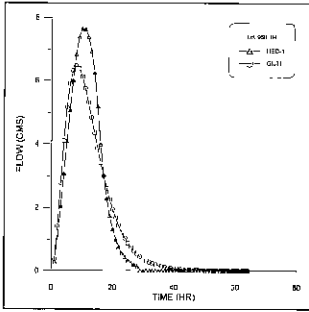
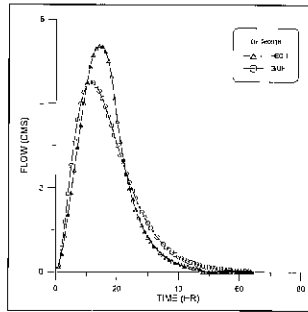


그림 5. 고노유역 관측치(HEC-1) 및 계산치(GIUH) 1시간단위도 비교

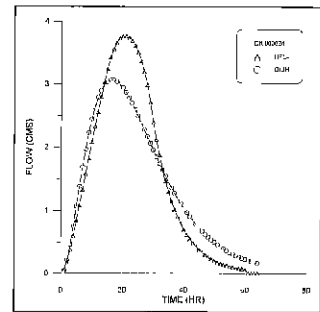
(a) 960304



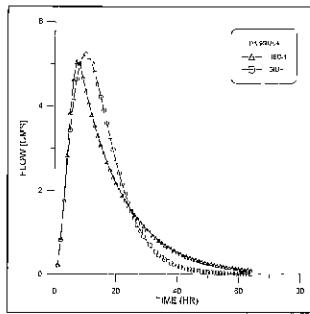
(b) 960616



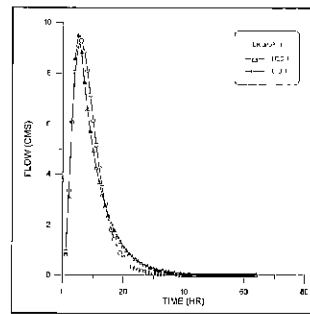
(c) 960624



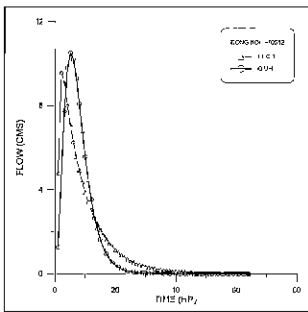
(d) 960704



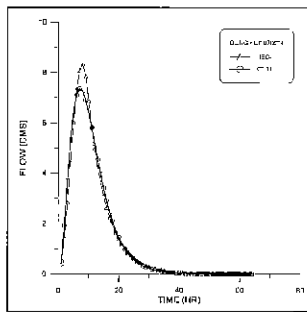
(e) 960826



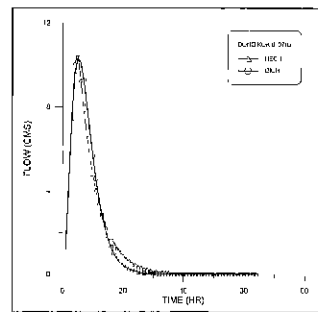
(f) 970512



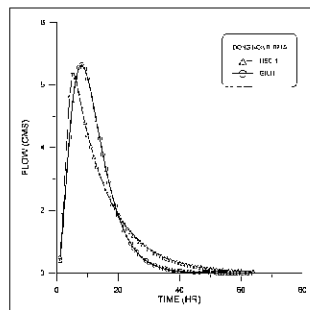
(g) 970624



(h) 970705



(i) 970715



(j) 970803

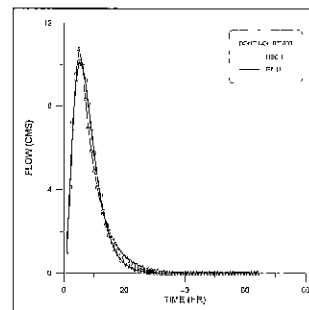
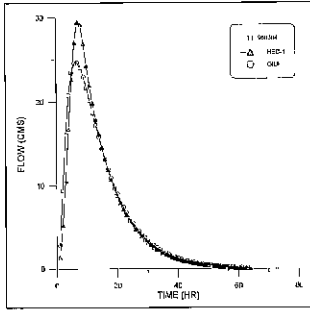
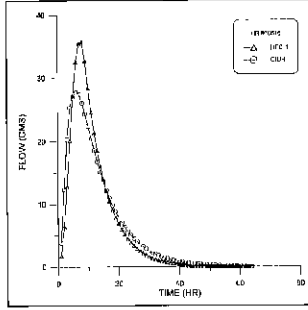


그림 6. 동곡유역 관측치(HEC-1) 및 계산치(GIUH) 1시간단위도 비교

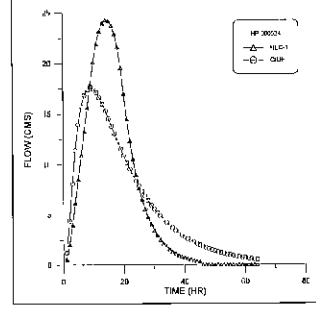
(a) 960304



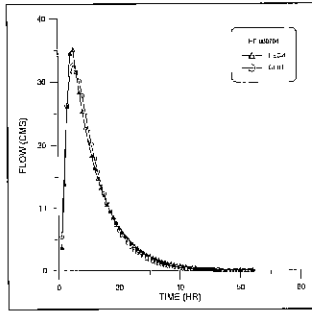
(b) 960616



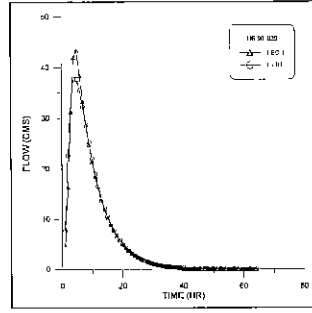
(c) 960624



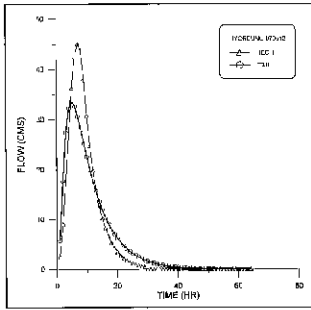
(d) 960704



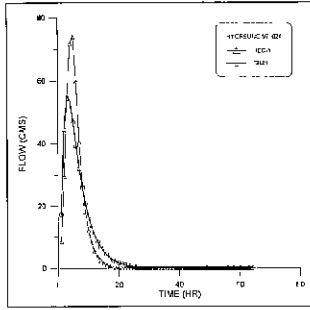
(e) 960826



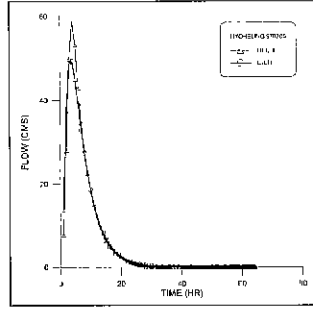
(f) 970512



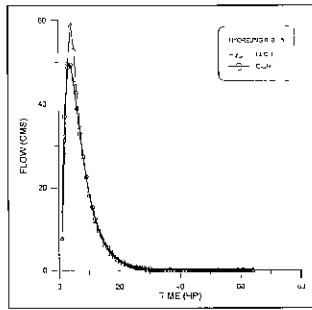
(g) 970624



(h) 970705



(i) 970715



(j) 970803

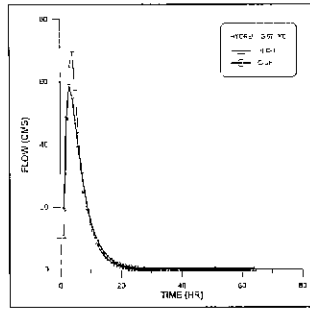


그림 7. 효령유역 관측치(HEC-1) 및 계산치(GIUH) 1시간단위도 비교

표 7. 특성속도 및 침투유량, 침투시간 계산결과

(단위 · 특성속도 m/s, 침투유량 m<sup>3</sup>/s, 침투시간 hr)

	고 노			동 곡			효 령		
	특성속도	침투유량	침투시간	특성속도	침투유량	침투시간	특성속도	침투유량	침투시간
960304	0.265	13.1 (82%)	8.8 (-2)	0.180	6.5 (85%)	8.1 (-2)	0.430	24.8 (84%)	6.6 ( 0)
960616	0.255	12.6 (73%)	9.2 (-5)	0.125	4.5 (84%)	11.4 (-3)	0.490	28.2 (79%)	5.8 (-2)
960624	0.195	9.6 (73%)	11.8 (-7)	0.085	3.1 (82%)	16.5 (-5)	0.305	17.6 (72%)	9.0 (-5)
960704	0.265	13.1 (88%)	8.8 ( 0)	0.145	5.2 (104%)	9.9 (+2)	0.570	32.7 (93%)	5.1 ( 0)
960826	0.435	21.3 (90%)	5.6 ( 0)	0.260	9.3 (98%)	5.8 (+1)	0.665	38.1 (88%)	4.5 (-1)
970512	0.290	14.3 (80%)	8.1 (-2)	0.295	10.5 (110%)	5.2 (+3)	0.585	33.6 (75%)	5.0 (-2)
970624	0.410	20.1 (77%)	5.9 (-2)	0.205	7.4 (88%)	7.2 (-1)	0.985	55.7 (75%)	3.3 (-2)
970705	0.495	24.2 (80%)	5.0 (-1)	0.290	10.4 (99%)	5.2 ( 0)	0.880	50.0 (85%)	3.6 ( 0)
970715	0.370	18.2 (85%)	6.5 (-1)	0.185	6.7 (104%)	7.9 (+3)	0.785	44.7 (76%)	3.9 (-1)
970803	0.515	25.2 (88%)	4.8 ( 0)	0.285	10.2 (95%)	5.3 ( 0)	1.040	58.7 (84%)	3.1 (-1)

관측 침투유량과의 비를 백분율로 나타낸 것이고 침투 시간 아래의 괄호는 관측 침투시간과의 차이를 표시한 것이다. 즉, 고노 970512호우의 경우 특성속도 0.290 m/s일 때 관측단위도와 계산단위도간의 종거 편차 자승이 가장 적었으며, 이때의 계산된 침투유량은 관측된 침투유량의 80%정도였으며, 침투시간은 약 2시간 정도 빠른 것을 나타내는 것이다.

### 5.2 기타 경험공식과 GIUH의 특성속도 비교

기존의 집중시간 산정공식과 GcIUH에서 유도된 평균유속을 위천유역에 적용하여 이들 값과의 비교를 통하여 최적화된 특성속도의 객관성 여부를 파악해 보았다. 그런데, 기존의 집중시간 산정식은 집중시간의 정의를 고려할 때 사실상 홍수파의 최대점에서의 평균유속이라고 말할 수 있으며 이것은 운동파 이론에 따른 파속(wave celerity)이 된다. 따라서 유역의 평균유속을 구하기 위해서 수로의 단면을 구형으로 가정할 경우 표 8의 집중시간 산정식과 유로 연장으로 구한 파속에 3/5를 곱하면 평균유속이 되며 표 8에 기존의 집중시간 산정식을 정리하였다.

표 8에서  $t_c$ ,  $L$ ,  $I$ ,  $t_g$ 는 각각 집중시간(hr), 유로 연장(km), 강우강도(mm/hr), 침투유량의 지체시간

(hr)를 각각 나타낸다 참고로, 표 8에서 Kerby의 경우 해당 유역을 삼림지역으로 보고 n값으로 0.8을 사용(윤용남, 1994)하였으며, Kinematic Wave의 경우 n값은 Manning의 조도계수이므로 자연하천수로 중산간하천수로 보고 n값으로 0.04를 사용(윤용남, 1993)하였다.

Rdoriguez-Iturbe와 Gonzalez-Sanabria(1982)는 GIUH의 동역학적 매개변수인 특성속도를 강우강도와 수로의 운동파 변수로 표현한 지형기후학적 순간단위도(GcIUH)를 유도하였다. 특정 강우사상에 대한 GcIUH의 유속은 식 (19)과 같다

$$v = 0.665 a_{\Omega}^{0.6} (i, A_{\Omega})^{0.4}, \quad (19)$$

$$a_{\Omega} = \frac{s_{\Omega}^{1/2}}{n b_{\Omega}^{2/3}}$$

여기서  $a_{\Omega}$ ,  $i$ ,  $A_{\Omega}$ ,  $s_{\Omega}$ ,  $n$ ,  $b_{\Omega}$ 는 Sorman(1995)에 의하면 각각 최고차 수로의 운동파 변수 ( $s^{-1} m^{-1/3}$ ), 강우강도(cm/hr), 최고차 유역면적(km<sup>2</sup>), 최고차 수로의 유로경사, Manning의 n값, 최고차 수로의 폭(m)을 나타낸다. 그러나, 적용유역의 수로 폭

표 8. 기존 집중시간 산정식

방 법	공 식	비 고
Kerby	$t_c = 0.6044(\text{Ln})^{0.467}/S^{0.2533}$	n=0.80
김남원	$t_c = 0.76A^{0.38}$	
Kirpich	$t_c = 0.0663L^{0.77}/S^{0.385}$	
Rziha	$t_c = 0.0139L/S^{0.6}$	
Kinematic Wave	$t_c = 7.355(nL)^{0.6}I^{-0.1}S^{-0.3}$	n=0.04
Carter	$t_c = 0.0978L^{0.6}S^{-0.3}$	
ARS	$t_c = 2.329L^{0.56}I^{-0.72}S^{-0.2}$	
Brasby-Williams	$t_c = 0.241L/(A^{0.1}S^{0.2})$	
Johnstone-Corss	$t_c = 0.0542(L/S)^{0.5}$	

에 대한 자료를 구할 수 없었던 관계로 인하여 구형수로로 가정한 후 유역의 출구에서 실측된 유속, 유량, 수위 등의 관계를 고려하여 산정하였다. 참고로, 이러한 구형수로의 가정은 Rodriguez-Itrube와 Gonzalez-Sanabria(1982)에서도 적용된 바 있다. 또한, 위에서 구한 유속은 천두유출이 발생하는 시점에서의 유속이므로 앞에서 언급한 대로 3/5를 곱하여 특성속도를 산정하였다. 이와 같은 방법으로 기존의 집중시간 산정공식과 GcIUH로 구한 특성속도는 표 9와 같다. 단, 표에서 GcIUH 이론 및 Kinematic Wave, ARS 공식

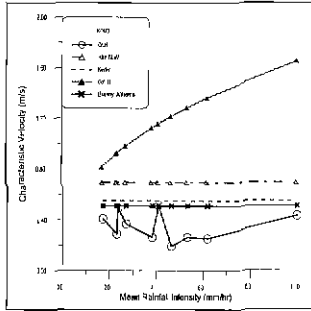
을 이용한 특성속도는 적용강우이상으로 구한 특성속도의 평균값이다.

위에서 유도한 GIUH 및 GcIUH, 기타 집중시간 산정공식에서 구한 유역특성속도를 도시하면 그림 8과 같다. 참고로, 그림 8은 최대유효강우강도를 횡축으로 하여 도시한 것으로 각 공식별로 유역의 평균속도가 크게 차이가 나는 것으로 나타나고 있다. 그 중 Kerby, Brasby - Williams, 김남원, Kinematic Wave 공식 등이 비교적 실측값과 근사한 값을 주는 것을 알 수 있다.

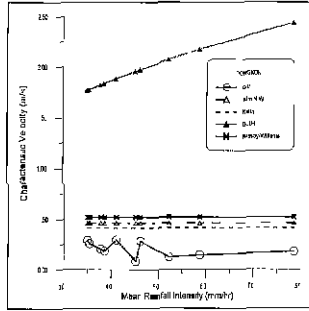
표 9. GIUH의 특성속도 산정

유역명	고 노	동 곡	효 령	비 고	
GIUH	최소치	0.195	0.085	0.305	
	최대치	0.515	0.290	1.040	
	평균치	0.350	0.206	0.674	
GcIUH (평균치)	1.143	1.970	1.509		
Kerby	0.551	0.413	0.651	n=0.80	
김남원	0.695	0.461	0.710		
Kirpich	1.182	1.766	1.464		
Rziha	3.080	4.347	3.701		
Kinematic Wave (평균치)	0.093	0.095	0.119	n=0.04	
Carter	1.733	1.502	2.042		
ARS (평균치)	0.046	0.048	0.061		
Brasby-Williams	0.511	0.519	0.566		
Johnstone-Cross	1.937	1.761	2.487		

(a) 고노구역



(b) 동곡구역



(c) 효령구역

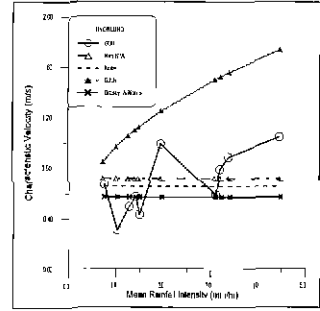


그림 8. 유역 특성속도의 비교

### 5.3 분석

실제 유역에 GIUH를 적용해 본 결과 그림 4~6에서와 같이 매우 왜곡된 결과를 주는 강우사상(960616, 960624)을 제외한다면, 순간단위도를 통하여 유도된 유역응답은 입력에 대하여 실제보다 1~2시간 정도 빠르게 반응하는 것으로 나타났다. 또한, 순간단위도의 분포양상을 보면, 전반적으로 첨두유량은 80%~90% 정도 작게 계산되는 것을 비롯하여 관측치에 비해 상대적으로 분산도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

첨두시간, 첨두유량, 분포양상의 분산도 등 유역응답 중요인자들의 실제와의 편차는 적용유역의 치수선정 혹은 상태전이 확률밀도함수의 결정에 있어 몇 가지 사실을 암시하고 있는 것으로 볼 수 있다. GIUH의 특수한 경우인 Nash모형의 유역응답함수를 살펴보면, 응답함수의 크기매개변수인 유역의 저류상수  $K$ 가 일정한 상태에서 모양매개변수인 선형저수지의 수를 증가시킬 경우 유역응답이 지체되어 나타남은 자명하다. 또한, 저수지 수의 증가에 따른 분산도의 증가 및 첨두유량의 감소가 염려되나, 저류상수  $K$ 와 저수지 수  $n$ 의 곱은 유역의 평균 지체시간과 같음을 증명할 수 있으므로  $K \cdot n$ 을 상수로 놓고  $n$ 의 변화에 따른 유역응답을 살펴볼 경우 저수지 수가 증가할수록 분포함수의 분산도가 작아짐에 따라 첨두유량이 증가함을 알 수 있다. 따라서, GIUH의 유도시 저수지 수를 증가시키기 위해 지형도의 해상도를 높여 유역의 치수를 적절히 증가시키거나, 각 치수 하천에서의 상태전이 확률밀도함수를 1개 이상으로 정의, 예를 들어 기존의 지수 분포 저수지에 균등분포 저수지를 추가하는 방법(김태균, 1987) 등을 취한다면, 더 좋은 결과를 얻을 수 있

을 것으로 기대된다.

특성속도는 유역별 강우사상별로 0.180m/s~1.040 m/s사이에서 다양하게 나타났고, 특성속도와 여러 가지 강우인자들과의 상관관계는 그림 4에 나타난 바와 같이 명확하게 어떤 관계가 있는 것으로 나타나지 않았다. 이는 단지 10개의 강우사상에 대한 특성속도이므로 그 일반성을 파악하기에는 자료수가 너무 작지 않으나 하는 생각이 들며, 또한 다른 이유로는 특성속도를 유도하는 과정인 최적화 과정에서의 오류로 판단된다. 즉, 유역반응을 모의하기 위한 최적화 과정을 명확하게 규정할 수 없음을 따라 관측단위도와 계산단위도의 증거차 최소화방법을 사용하는데서 나타나는 오차로서, 단위도간의 증거차뿐만 아니라 첨두시간 및 첨두유량을 최적화 과정에서 고려할 수 있는 새로운 방법이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

한가지 특이한 발견사항은 특성속도를 일반유속과 같은 개념으로 생각할 때, 사면경사가 큰 산악지형일수록 특성속도가 증가할 것이므로 동곡, 고노, 효령 순으로 순위가 기려질 것으로 예상되었으나, 결과는 완전히 바뀌어 그림3에서 알 수 있듯이 효령, 고노, 동곡 순으로 특성속도의 순위가 결정되는 현상을 나타내었다. 이에 대한 명확한 이유를 단정하기는 어려우나 유역의 수계밀도(1차하천의 밀도)가 효령, 고노, 동곡 순으로 발달이 되어있으므로 수계밀도가 유역의 경사보다 특성속도의 크기를 결정하는데 더 많은 영향을 미치고 있음을 추측할 수 있다.

### 6. 결론

강우에 대한 유역응답을 지형도에서 실측가능한 하상지형인자를 이용하여 Rodriguez-Iturbe와 Valdes

(1979)에 의하여 제안된 GIUH 이론으로부터 구하여 고노, 등곡, 효령 유역의 여러 가지 지형형태학적 요소들의 수문학적 연결가능성을 고찰하고, 관측자료에 근거한 실제 유역 단위도(HEC-1모형 이용)와 비교함으로써 미계측 유역이나 자료가 결핍된 유역에 그 적용성 여부를 판단하였다. 또한, GIUH의 특성속도를 실제 유역에서 관측된 값과의 최적화과정을 통하여 유도한 후, 이를 GcIUH 및 기존의 집중시간 산정식을 통하여 구한 특성속도와 비교하였다.

유도된 단위도의 결과를 보면, 특성속도에 대한 변화에 따라 크게 다른 단위도가 유도됨을 볼 수 있었으나 관측자료와의 최적화과정을 통하여 구한 특성속도를 기준으로 유도된 단위도는 실제보다 1~2시간 정도 빠르게 반응하는 것으로 나타났으며, 반응의 분포양상을 보면, 침투유량이 80%~90%정도 작게 계산되는 것을 비롯하여 관측치에 비해 상대적으로 분산도가 크게 나타남을 알 수 있었다.

GIUH의 매개변수인 특성속도는 실측된 경우와 유출자료가 존재할 경우 그 추정이 용이하다 할 수 있겠지만, GIUH의 유도 목적이 미계측 유역에 대한 유출 해석임을 상기한다면, 특성속도 역시 지형형태학적인 해석을 바탕으로 산정되어야 하며, 그와 더불어 합리적이며 간편한 식의 구조로 표현되어야 한다. 따라서, 특성속도의 산정방법으로 GcIUH 및 기타 기존의 집중시간 공식 등을 적용하여 산정하였고, 그 중 Kerby, Brasby-Williams, 김남원, Kinematic Wave 공식 등이 비교적 실측값과 근사한 값을 주는 것으로 나타났다. 그러나, 위 공식들 중 Kerby, Kinematic Wave 공식 등은  $n$ 값의 다소 주관적인 추정치에 따라 특성속도가 변한다는 단점이 있으므로 비교적 정확한 값을 주는 김남원 공식 및 Brasby-Williams 공식이 유역의 객관적인 특성속도로 사용될 수 있음을 제시할 수 있다.

아울러, 특성속도에 대한 더 객관적이고 정확한 추정방법의 개발과 적절한 해상도의 지형도 선택, 상태전이 확률밀도함수의 확장 등이 보완된다면 미계측유역이나 자료가 충분하지 않은 유역의 적용에 좋은 결과를 줄 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (1996), 국제수문개발계획(IHP)  
 건설교통부 (1997), 국제수문개발계획(IHP)  
 김남원 (1998), 미계측 유역의 확률홍수량 추정을

- 위한 동역학적 홍수빈도모형개발, 박사학위 논문, 강원대학교  
 김태균 (1987), 지형태학적 순간단위도 이론을 이용한 하천유량의 강우유출해석, 석사학위논문, 고려대학교  
 윤용남 (1994), 공업수문학, 청문각, pp. 224~290.  
 윤용남 (1993), 수리학, 청문각, pp. 253~274.  
 Gupta, V. K., E. Waymire (1983). "On the Formulation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at the Basin Scale.", *J. Hydrol.*, Vol 65, pp 95~123.  
 Gupta, V. K., Waymire, E., and Wang, C. T. (1980), "A Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph From Geomorphology.", *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 5, pp. 855~862.  
 Horton, R. E. (1945). "Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology.", *Bulletin, Geol. Soc. of Am.*, Vol. 56, pp. 275~370.  
 Leopold, L. B., and T. Maddock, Jr. (1953), "The Hydraulic Geometry of Stream Channels Some Physiographic Implications." *U. S. Geological Survey professional paper* No. 252. Washington, D.C.  
 Rodriguez-Iturbe, I. and Marcelo Gonzalez-Sanabria (1982). A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph, *Water Resour. Res.*, Vol 15, No 6, pp. 1409~1420  
 Rodriguez-Iturbe, I., Gustavo Devoto, and J. B. Valdes(1979), "Discharge Response Analysis and Hydrologic Similarity - The Interrelation Between the Geomorphologic IUH and the Storm Characteristics", *Water Resour. Res.*, Vol 15, No. 6, pp. 1435~1444  
 Shreve, R. L. (1967). "Infinite Topologically Random Channel Networks.", *J. Geol.*, Vol 75, pp. 178~186.  
 Smart, J. S. (1972), "Quantitative Characterization of Channel Network Structure."

- Water Resour. Res.*, Vol 8, No. 6, pp. 1487~1496.
- Sorman, A. U. (1995), "Estimation of Peak Discharge Using GIUH Model in Saudi Arabia.", *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 121(4), pp. 281~291.
- Valdes, J. B., Y. Fiallo, and I. Rodriguez-Iturbe (1979), "A Rainfall Runoff Analysis of the Geomorphologic IUH.", *Water Resour. Res.*, Vol 15, No 6, pp. 1421~1434.
- (논문번호:99-079/집수:1999.09.17/심사완료:2000.03.21)