

## 지형학적 분산을 고려한 특성유속이 순간단위도 형상에 미치는 영향

### The Impact of Characteristic Velocities Considering Geomorphological Dispersion on Shape of Instantaneous Unit Hydrograph

최 용 준\* / 김 주 철\*\* / 황 만 하\*\*\*

Choi, Yong Joon / Kim, Joo Cheol / Hwang, Man Ha

#### Abstract

The sensitivity of Nash model parameters is analyzed about characteristic velocities considering geomorphological dispersion in the present study. And changing shape of IUH compared and analyzed as variation of characteristic velocities through numerical experiment. Application watersheds are selected 4 subwatersheds which are located at main stream of Bocheong basin. The mean and variance of hillslope and stream path length are estimated in each watershed with GIS. And Nash model parameters are estimated with moments of path lengths and characteristic velocities. The changing trend about IUH which is derived Nash model parameters are compared as variation of characteristic velocities. The Major results of this study are summarized as follows. The Nash model parameters sensitively present changes about hillslope characteristic velocity. And the effect of the peak discharge and shape of recession in IUH dominate with hillslope's characteristic velocity, the effect of the peak time and shape of ascension in IUH dominate with channel's characteristic velocity.

**Keywords** : GIUH, nash model, characteristic velocity, geomorphological dispersion

#### 요 지

본 연구에서는 지형학적 분산을 고려한 특성유속에 따른 Nash 모형 매개변수의 민감도 분석을 실시하였다. 또한 이러한 특성유속의 변동에 따른 순간단위도의 형상의 변화를 수치실험을 통해 비교·분석하였다. 대상유역은 보청천 유역 중 분류에 위치하고 있는 4개의 소유역을 선정하였다. 각 대상유역에 대해 지리정보체계를 이용하여 지표면과 하천의 배수경로길이에 대한 평균과 분산을 산정하였다. 산정된 배수경로길이와 특성유속에 의한 Nash 모형 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수에 의해 순간단위도를 유도하여 형상의 변화를 비교하였다. 이러한 연구를 통해 도출된 주요 결과는 다음과 같다. Nash 모형 매개변수는 지표면 특성유속에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 또한 순간단위도의 감수부의 형상과 침투유량은 지표면 특성유속에 지배적인 영향을 받으며, 순간단위도의 상승부의 형상과 침투시간은 하천 특성유속에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 지형학적 순간단위도, Nash 모형, 특성유속, 지형학적 분산

\* 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Graduated student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea (e-mail: ace\_choi@hanmail.net)

\*\* 교신저자, 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

Corresponding author, Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Daejeon 305-730, Korea (e-mail: kjocheol@hanmail.net)

\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Daejeon 305-730, Korea (e-mail: hwangmh@kwwater.or.kr)

## 1. 서론

자연 유역에서 임의의 지점에 떨어진 물입자의 유동은 다른 자연현상과 마찬가지로 일정한 법칙에 따라 유역 출구까지 이동할 것이다. 이러한 물의 유동에 대한 일정한 법칙의 모의는 현재 인간의 수학적, 물리적 한계로는 완벽하게 재현하지 못하고 있는 실정이다. 이로 인해 선형성을 전제로 한 단위도 이론이 등장하게 되었으며 개발된 지 70여 년이 지난 현재까지도 강우-유출 해석에 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 단위도 이론은 강우-유출 현상 자체만을 재현할 뿐 강우로 인한 유출의 mechanism은 설명할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 개발된 이론이 개념적 순간단위도이다. 개념적 순간단위도는 유역의 유출현상을 이송과 저류효과로 구분하여 설명하였으며, 이를 위해 유역을 개념적인 선형저수지와 선형수로로 구성하였다. 이러한 순간단위도 이론 중 대표적인 모형이 Nash 모형 (Nash, 1957)이다. Nash 모형은 유역을 선형저수지군으로 구성하였다. 또한 비교적 간단한 방법에 의해 매개변수의 추정이 가능하며, 수학적으로 완벽한 해석적 구조를 가지고 있어 현재까지도 가장 널리 쓰이는 개념적 모형 중 하나이다. 그러나 이러한 개념적 순간단위도의 매개변수들은 유역의 응답특성을 설명할 수 있는 특성인자들과의 관계를 설명할 연결고리가 미흡하기 때문에 계측 유역에의 적용은 가능하나 미계측 유역에의 활용에는 한계가 있다. 즉, 매개변수들의 물리적 의미가 미흡하다는 것이다.

이후 이러한 단점을 극복하고 미계측 유역의 유출해석을 가능하게 한 지형학적 순간단위도 (GIUH) 이론이 등장하였다. Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)는 Strahler 차수분류법을 기반으로 이러한 GIUH 모형 (RV-GIUH 모형)을 개발하였다. RV-GIUH 모형은 하천망의 형태학적 특성인자와 유역의 동역학적 특성인자로 구성된다. 여기에서 하천망의 형태학적 특성인자는 장기간 동안 변하지 않는 변수로 지형도로부터 쉽게 추출할 수 있으며, 동역학적 특성인자는 유역의 수리학적 특성을 대표하는 변수로 홍수 유출이 발생하는 동안 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 특성유속 (characteristic velocity)으로 정의된다. 그러나 RV-GIUH 모형은 유역에서의 유출 mechanism 중 하천의 유동만을 고려하였다는 점에서 한계를 가지고 있다. van der Tak and Bras (1990)는 이러한 문제점을 지적하며, 지표면과 하천을 구분한 특성유속을 적용할 것을 제안하였다. 이후 GIUH 모형에서 두 개의 특성유속에 대한 연구는 D'odorico and Rigon (2003)에 의해 수행되었다. 이들은 Rinaldo et al. (1991)이 제시한 Strahler 차수분류법에 의한 GIUH 모형의 분산 (dispersion)효과를 지

표면과 하천의 특성유속으로 구분하여 격자 형태로 분할된 유역에 적용하였다. 여기에서 분산효과는 순간단위도의 통계적 분산 (variance)를 결정짓는 효과로 정의되며, 물입자의 동수역학적 효과에 기인하는 동수역학적 분산, 배수경로의 이질성에 의한 지형학적 분산 및 유역 내에서 특성유속의 공간적인 분포의 이질성에 기인하는 운동학적 분산으로 구분된다. 이 중 동수역학적 분산과 지형학적 분산은 Rinaldo et al. (1991)에 의해 정의되었으며 운동학적 분산은 Saco and Kumar (2002)에 의해 정의되었다. 이후 Botter and Rinaldo (2003)는 각각의 분산효과가 총 분산에 미치는 영향에 대한 연구를 통해 동수역학적 분산과 운동학적 분산의 효과가 무시할 수 있을 정도로 작음을 규명하였으며, Di Lazzaro (2009)는 이상의 D'odorico and Rigon (2003)과 Botter and Rinaldo (2003)의 연구결과를 바탕으로 격자 형태의 지형학적 분산을 이용해 수문사상자료의 모멘트 특성으로부터 두 특성유속을 산정하는 식을 유도하였다. 유도된 식은 수문사상자료로부터 직접 유역의 수리학적 특성을 대표하는 두 특성유속을 산정할 수 있다는 점에 의미를 둘 수 있으며, 특성유속이 호우사상에 따라 변동될 수 있음을 시사한다. 이후 최용준 등 (2010)은 모멘트법을 기반으로 Di Lazzaro (2009)의 관계식으로부터 Nash 모형의 두 매개변수를 추정하는 식을 유도하였다. 이러한 GIUH 모형과 Nash 모형과의 관계에 대한 이전의 대표적인 연구는 Rosso (1984)의 연구를 들 수 있다. 그러나 이상의 두 연구 결과에는 큰 차이점이 있다. Nash 모형의 규모 매개변수인 저류상수는 동일하게 유역의 지형인자와 특성유속의 함수로 유도되었지만, 형상 매개변수인 선형저수지의 개수에 대해 Rosso (1984)의 연구 결과에서는 지형인자만의 함수로 유도되었으며 최용준 등 (2010)의 연구결과에서는 지형인자와 특성유속의 함수로 유도되었다. 즉, Rosso (1984)는 순간단위도의 형상이 유역의 지형특성에 의해 결정되는 고유한 값으로 정의하였으나, 최용준 등 (2010)은 순간단위도의 형상 역시 규모 매개변수와 마찬가지로 유역의 수리학적 특성에 의해 변동될 수 있음을 제시한 점에서 차이가 있다. 이러한 최용준 등 (2010)에 의해 개발된 모형은 크게 다음의 두 가지 특성에 의미를 둘 수 있다. 첫째, 특성유속의 물리적 분포식에 의해 미계측 유역의 유출응답을 예측할 수 있다는 것이다. 즉, 물리적 의미를 가지는 매개변수인 특성유속에 의해 합성단위도를 유도할 수 있다는 점이다. 둘째, 이들의 모형은 호우에 따라 순간단위도의 형상과 규모가 변동될 수 있으며, 이러한 특성유속과 호우사상과의 관계는 유역의 순간응답함수 (Impulse Response Function)의 유도를 가능하게 할 수 있다는 점이다. 이를 통해 선형성을 전제로 한 단위도 이론에 비선형성을 고려할 수 있

는 유용한 도구가 될 것으로 기대되며, 이러한 IRF는 향후 기후변화에 따른 유역의 유출응답 해석에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

이상의 이론적 배경을 바탕으로 본 연구에서는 특성유속에 의한 합성단위도법과 IRF에 관한 연구에 있어 가장 중요한 매개변수인 지표면과 하천의 개별적인 특성유속이 순간단위도 형상에 미치는 영향을 분석하여 각각의 특성유속이 가지는 물리적 의미를 살펴보고자 하였다.

## 2. Nash 모형과 격자 기반 지형학적 분산

### 2.1 Nash 모형

Nash (1957)는 직렬로 연결된  $n$ 개의 동등한 선형 저수지로 구성된 배수유역을 제한함으로써 개념적 순간단위도 모형을 Eq. (1)과 같이 공식화 하였다.

$$f(t) = \frac{1}{K} \frac{1}{\Gamma(n)} \left( \frac{t}{K} \right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (1)$$

여기에서  $f(t)$ 은 순간단위도를,  $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수를 나타낸다. Eq. (1)은 배수유역의 순간단위도에 대한 일반식으로서  $n$ 과  $K$ 는 각각 순간단위도의 형상과 규모매개변수로 선형저수지의 개수와 저류상수로 정의되는 Gamma 분포 확률밀도함수와 일치한다.

또한 Eq. (1)의 평균 및 분산은 모멘트법에 의해 각각 다음과 같이 정의된다.

$$E[t] = nK \quad (2)$$

$$Var[t] = nK^2 \quad (3)$$

### 2.2 격자 기반 지형학적 분산

D'odorico and Rigon (2003)은 Rinaldo et al. (1991)에 의해 정의된 Strahler의 차수법칙을 이용한 GIUH 모형에서의 지형학적 분산의 개념을 다음과 같이 보다 일반적인 형태로 확장하였다. 만약 유역 내부에서 발생 가능한 모든 배수경로를 중에서 임의로 선택한  $i$ 번째 배수경로의 지표면 및 하천유하거리를 각각  $L_h$ ,  $L_c$ , 모든 배수경로의 개수를  $n$ 이라 할 경우 유역 전반에 걸친 유하시간 ( $T$ )의 평균 및 분산은 Eqs. (4) and (5)와 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$E[T] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{E[L_h]}{u_h} + \frac{E[L_c]}{u_c} \quad (4)$$

$$Var[T] = E[(T - E[T])^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - E[T])^2 = \frac{Var[L_h]}{u_h^2} + \frac{Var[L_c]}{u_c^2} + 2 \frac{Cov[L_h, L_c]}{u_h u_c} \quad (5)$$

여기서  $u_h$ ,  $u_c$ 는 각각 지표면 및 하천의 특성유속을,  $E[\cdot]$ ,  $Var[\cdot]$ ,  $Cov[\cdot, \cdot]$ 는 각각 기대치, 분산 및 공분산 연산자이다.

대상유역에 대한 강우-유출 관측자료 및 지형자료가 주어질 경우 유역의 수리학적 특성을 대표하는 지표면 및 하천 특성유속  $u_h$ ,  $u_c$ 는 Eqs. (4) and (5)를 연립하여 다음과 같이 산정된다 (Di Lazzaro, 2009).

$$u_{c1,2} = \frac{a \pm b}{c} \quad (6)$$

$$u_{h1,2} = \frac{u_{c1,2} E[L_h]}{u_{c1,2} E[T] - E[L_c]} \quad (7)$$

Eq. (6)의  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$a = E[L_c] \{-cov[L_h, L_c] E[L_h] E[T] + E[L_c] Var[L_h] E[T]\} \quad (8)$$

$$b = E[L_h] E[L_c] \left\{ E^2[T] (Cov^2[L_h, L_c] - Var[L_h] Var[L_c]) + Var[T] (-2Cov[L_h, L_c] E[L_h] E[L_c] + E^2[L_c] Var[L_h] + E^2[L_h] Var[L_c]) \right\}^{0.5} \quad (9)$$

$$c = E[L_c] \{ Var[L_h] E^2[T] - E^2[L_h] Var[T] \} \quad (10)$$

Eqs. (6) and (7)로부터 한 개의 유역에 대하여 두 쌍의 지표면 및 하천유속이 산정됨을 알 수 있다. Di Lazzaro (2009)는 이러한 두 쌍의 특성유속 중 음의 값을 갖거나 지표면과 하천유속이 미소한 차이를 갖는 경우에는 물리적인 이유로 산정값에서 제외 할 것을 제안하였다.

최종적으로 격자 기반 지형학적 분산의 모멘트특성인 Eqs. (4) and (5)와 Nash 모형의 모멘트특성인 Eqs. (2) and (3)를 연립하여 다음과 같이 Nash 모형의 두 매개변수를 표현 하게 된다 (최용준 등, 2010).

$$n = \frac{<L_h>^2 u_c^2 + 2 <L_c> <L_h> u_c u_h + <L_c>^2 u_h^2}{Var[L_h] u_c^2 + 2Cov(L_c, L_h) u_c u_h + Var[L_c] u_h^2} \quad (11)$$

$$K = \frac{Var[L_h] u_c^2 + 2Cov(L_c, L_h) u_c u_h + Var[L_c] u_h^2}{u_c u_h (<L_h> u_c + <L_c> u_h)} \quad (12)$$

## 3. 적용 및 고찰

### 3.1 대상유역의 선정 및 지형분석

본 연구의 대상유역은 국제수문개발계획 (IHP) 대표유역 중 금강 수계의 보청천 유역을 선정하였다 (건설교통부, 2002). 보청천 유역은 수위관측소를 기준으로 5개의 소유역으로 구성되어 있다. 이 중 유역규모에 따른 순간단위도의 변화에 대한 비교·분석을 위해 본류에 위치하고 있는 산성, 이평, 기대 및 산계유역을 선정하였다. Fig. 1은 대상유역의 배수유역도이다.

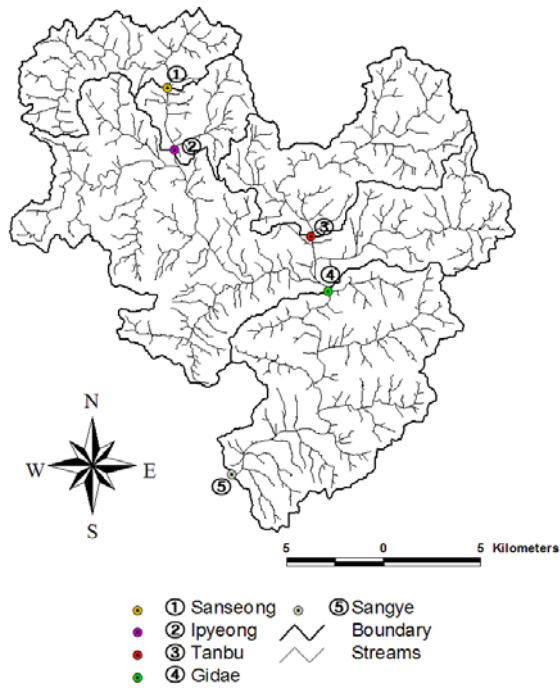


Fig. 1. Drainage Basin Map of Bocheong Basin

지리정보체계에서의 지형분석을 위해 가장 중요한 요소 중 하나인 수로망 선정에 대해 여러 가지 기법이 연구되어 왔지만 이러한 기법들은 아직 체계적인 기준의 정립이 부족한 실정이며 또한 하천망의 계절적 변동 등의 영향을 고려하지 못하는 한계를 가지고 있다 (Di Lazzaro, 2009). 따라서 본 연구에서는 하천망생성기법에 대한 오차를 줄이고 하천망에 대한 지형자료의 객관성이 부여될 수 있도록 1/25,000 수치지도의 하천선을 그대로 사용하였다. 유역경계는 대상 소유역의 수위관측소를 유출구로 하여 분할하였으며 각 유역은 20×20m의 격자망으로 구성하였다. 분할된 유역에 대해 Arc view의 Hydro extension을 이용하여 DEM 전처리 작업을 수행하였으며 흐름방향도와 흐름길이도를 생성하였다. 생성된 Grid를 연산하여 대상유역의 각 격자 중심에서 유역 출구점까지의 지표면 유하거리와 하천 유하거리를 산정하였다. Table 1은 추출된 지형인자들의 유하거리에 대한 평균, 분산 및 공

분산의 값들을 나타낸 것이다.

### 3.2 특성유속에 따른 Nash 모형 매개변수의 민감도 분석

특성유속의 변동에 따른 순간단위도의 형상 비교에 앞서 지표면과 하천 특성유속이 Nash 모형 매개변수에 미치는 영향을 알아보기 위해 특성유속에 따른 Eqs. (11) and (12)의 Nash 모형 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. Fig. 2는 Nash 모형 매개변수 중 선형저수지의 개수  $n$ 에 대한 민감도 분석 결과이며, Fig. 3은 저류상수  $K$ 의 민감도 분석결과이다. Fig. 3에서 내부의 그림은  $(K-K_0)/K_0$ 의 값을  $-0.6\sim 1.0$ 의 범위로 확대한 것이다. Eqs. (11) and (12)의 유하거리의 값은 Table 1의 자료를 사용하였다. D'odorico and Rigon (2003)은 지표면과 하천의 특성유속에 대해 각각  $0.5\sim 4.0$  m/s와  $0.001\sim 0.100$  m/s로 제시한 바 있다. 따라서 민감도 분석에 사용된 기준변수는 D'odorico and Rigon (2003)에 의해 제시된 범위를 모두 만족시킬 수 있도록 지표면과 하천 특성유속 각각  $0.05$  m/s와  $2.0$  m/s로 결정하였다. 결정된 기준변수에 대해 지표면 특성유속은  $-98\sim +100\%$ 의 범위로, 하천 특성유속은  $-75\sim +100\%$ 의 범위에서 민감도 분석을 수행하였다. 그림에서  $n_0$ 와  $K_0$ 는 기준변수에 의한 각각의 값이며,  $n$ 과  $K$ 는 변화된 변수에 의해 계산된 값이다. 민감도 분석 결과 Eqs. (11) and (12)에서 보여 지듯이 Nash 모형 매개변수는 특성유속들에 대해 비선형적인 관계를 가짐으로 정확한 민감도 분석의 결과를 얻을 수는 없었으나 지표면 특성유속과 하천 특성유속이 Nash 모형 매개변수의 미치는 영향의 경향성은 알 수 있었다. Fig. 2에서 보여 지듯이 Nash 모형의 선형저수지 개수  $n$ 은 지표면 특성유속에 비례하며 하천 특성유속에 반비례함을 알 수 있었으며, 민감도는 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 저류상수  $K$ 는 Fig. 3의 경우에서 보여 지듯이 지표면 특성유속에 대해서는 반비례하지만, 하천 특성유속의 경우 유속값이 커짐에 따라  $K$ 의 값이 작아지다가 어느 한계점을 지나면 다시 커지는 현상을 나타낸다. 이는 Eq. (12)에서 지표면과 하천 특성유속의 상대적인 크기의 차

Table 1. Geomorphological Factors of Stream Drainage

Watershed	Area (km <sup>2</sup> )	Channel		Hillslope		Co-variance (m <sup>2</sup> )
		Mean (m)	Variance (m <sup>2</sup> )	Mean (m)	Variance (m <sup>2</sup> )	
Sanseong	49.10	8,372	20,001,100	258	70,389	115,221
Ipyeong	76.30	9,314	30,567,600	288	95,789	-159,826
Gidae	354.14	17,104	62,831,300	375	152,181	-339,719
Sangye	485.21	30,027	158,953,000	373	148,836	-190,788

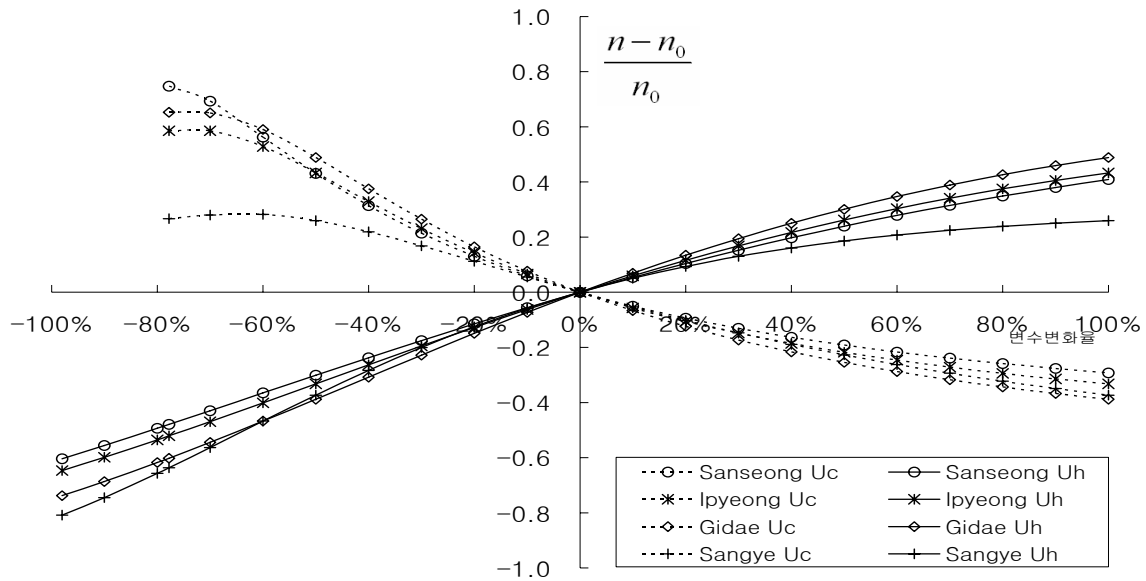


Fig. 2. Sensitivity of Nash Model Parameter  $n$

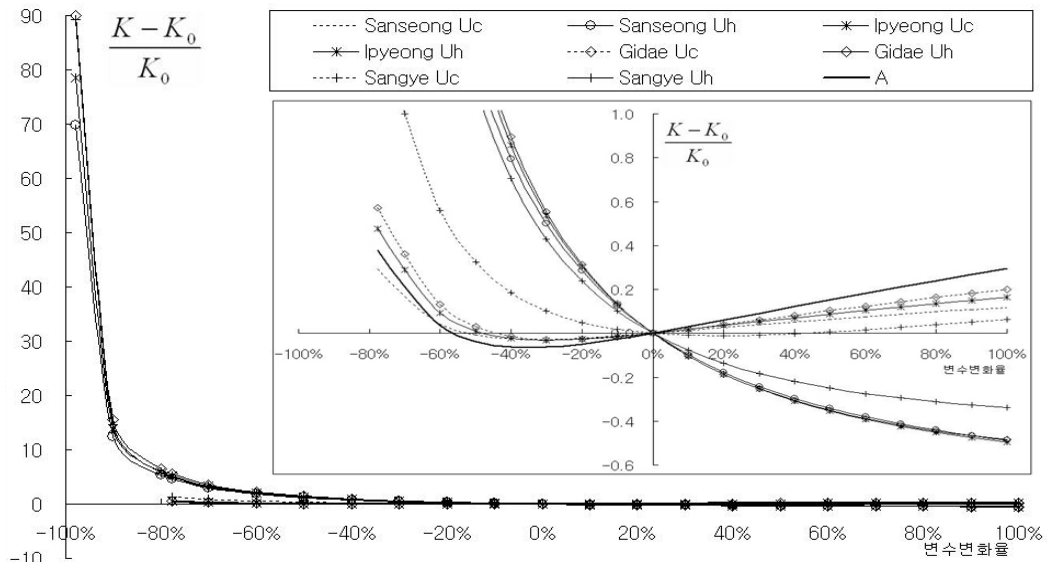


Fig. 3. Sensitivity of Nash Model Parameter  $K$

로 인해 발생하는 현상으로 판단된다. 즉, Eq. (12) 지표면 특성유속이 일정할 경우 낮은 하천 특성유속 구간에서는 지표면 특성유속의 영향으로  $K$ 값이 감소하며, 이러한 영향의 한계를 초과하면 지표면 특성유속의 영향이 작아져 하천특성유속의 영향에 의해  $K$ 값이 증가하는 것이다. 이러한 영향의 한계는 Table 1의 지형인자와 특성유속들에 의해 결정되게 된다. 이와 같은 현상은 선형저수지의 개수  $n$ 의 민감도 분석 범위에서는 뚜렷하게 나타나지 않았지만, Eqs. (11) and (12)는 특성유속들에 대해 비선형 관계를 나타내므로 지형인자와 특성유속값들에 따라  $n$ 에 대해서도 이러한 현상이 발생될 것으로 예상된다.

Figs. 2 and 3에서 산계유역의 경우 다른 세 유역의 분석결과와 경향성은 동일하게 나타나지만 변화 값들은 차이를 보이는데 이는 유하거리의 평균 및 분산의 값들의 차이로 발생하는 것으로 판단된다. 특히 하천 특성유속에 따른 저류상수  $K$ 의 변화의 경우에는 이러한 현상이 두드러지게 나타나는데, 이는 하천 유하거리의 분산이 다른 세 유역 보다 매우 크기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 기대유역의 하천 유하거리의 분산을 산계유역에 적용하였을 경우 Fig 3의 A와 같이 다른 세 유역과 비슷하게 나타나게 된다. 물론 이러한 현상은 Eqs. (11) and (12)의 모든 변수의 영향이 복합적으로 발생하기 때문에 나타나는 것

으로 모든 변수에 대한 민감도 분석이 필요하겠지만, 일반적으로 지형인자는 동일 유역에 대해 불변하는 것으로 가정되므로 본 연구에서는 호우사상에 따라 변동 가능한 특성유속들에 대한 분석만을 실시하였다.

### 3.3 특성유속의 변동에 따른 순간단위도의 변화 분석

특성유속의 변화에 따른 순간단위도의 형상 비교를 위해 D'odorico and Rigon (2003)이 제안한 특성유속 범위에 대하여 지표면 특성유속은 0.015 m/s씩 하천 특성유속은 0.5 m/s씩 변동하면서 순간단위도의 형상의 변화를 살펴보았다. 특성유속의 변화는 다음의 네 가지 경우로 적용하였다. 지표면과 하천 특성유속을 동시에 증가하였을

경우 (Case 1), 지표면 특성유속은 증가, 하천 특성유속은 감소로 변동시켰을 경우 (Case 2), 지표면 특성유속을 고정하고 하천 특성유속을 증가하였을 경우 (Case 3), 하천 특성유속을 고정하고 지표면 특성유속을 증가하였을 경우 (Case 4)로 구분하였다. Table 2는 각 Case별로 산정된 Nash 모형 매개변수의 값들이며, Table 3은 이에 대한 각 순간단위도의 침투유량 및 침투시간 값들이다. 여기에서 Case 3과 4의 고정 특성유속값은 D'odorico and Rigon (2003)이 제안한 지표면과 하천 특성유속 범위에 대한 중앙값인 0.050 m/s와 2.25 m/s를 적용하였다.

Table 3에서 “No data”는 Nash 모형의 선형저수지 개수  $n$ 의 값이 0보다 작게 산정된 값들을 나타내며 분석에

Table 2. Estimation of Nash Model Parameters

Case		uc	uh	Sanseong		Ipyeong		Gidae		Sangye	
				$n$	$K$	$n$	$K$	$n$	$K$	$n$	$K$
Case 1	①	0.500	0.001	1.06	71.71	0.99	86.31	1.11	102.55	1.26	95.39
	②	1.000	0.016	1.94	3.51	1.94	3.91	2.67	4.21	3.97	3.73
	③	1.500	0.031	2.22	1.74	2.26	1.91	3.22	2.03	4.73	1.88
	④	2.000	0.046	2.35	1.16	2.41	1.26	3.48	1.33	5.05	1.27
	⑤	2.500	0.061	2.43	0.87	2.50	0.94	3.63	0.99	5.22	0.96
	⑥	3.000	0.076	2.48	0.69	2.56	0.75	3.73	0.79	5.33	0.78
	⑦	3.500	0.091	2.52	0.58	2.60	0.62	3.80	0.66	5.40	0.65
	⑧	4.000	0.106	2.54	0.49	2.63	0.53	3.85	0.56	5.46	0.56
Case 2	①	0.500	0.106	4.06	1.31	3.65	1.62	5.65	1.85	6.30	2.80
	②	1.000	0.091	4.05	0.77	4.03	0.86	6.11	0.97	6.74	1.41
	③	1.500	0.076	3.49	0.71	3.65	0.76	5.52	0.82	6.68	1.04
	④	2.000	0.061	2.74	0.85	2.86	0.91	4.23	0.96	5.83	1.01
	⑤	2.500	0.046	2.09	1.19	2.10	1.32	2.96	1.41	4.38	1.28
	⑥	3.000	0.031	1.58	1.95	1.54	2.23	2.00	2.47	2.88	2.12
	⑦	3.500	0.016	1.22	4.21	1.15	4.99	1.37	5.76	1.73	5.12
	⑧	4.000	0.001	0.96	75.24	0.88	91.57	0.95	111.33	0.97	108.59
Case 3	①	0.500	0.050	4.09	1.49	4.02	1.68	6.10	1.90	6.70	2.80
	②	1.000	0.050	3.47	1.08	3.64	1.15	5.50	1.24	6.66	1.56
	③	1.500	0.050	2.88	1.04	3.01	1.11	4.48	1.17	6.04	1.26
	④	2.000	0.050	2.46	1.05	2.54	1.14	3.69	1.21	5.29	1.18
	⑤	2.500	0.050	2.18	1.08	2.21	1.19	3.14	1.27	4.63	1.17
	⑥	3.000	0.050	1.98	1.12	1.99	1.24	2.75	1.33	4.09	1.19
	⑦	3.500	0.050	1.83	1.14	1.82	1.29	2.47	1.39	3.66	1.22
	⑧	4.000	0.050	1.72	1.17	1.69	1.33	2.26	1.45	3.32	1.25
Case 4	①	2.250	0.001	0.97	74.82	0.89	90.95	0.96	110.28	1.00	106.91
	②	2.250	0.016	1.38	3.99	1.32	4.66	1.64	5.26	2.23	4.56
	③	2.250	0.031	1.80	1.86	1.78	2.09	2.41	2.27	3.56	1.98
	④	2.250	0.046	2.21	1.17	2.24	1.29	3.19	1.37	4.69	1.27
	⑤	2.250	0.061	2.58	0.86	2.67	0.92	3.91	0.98	5.52	0.98
	⑥	2.250	0.076	2.90	0.68	3.03	0.73	4.52	0.77	6.07	0.84
	⑦	2.250	0.091	3.17	0.58	3.33	0.61	5.00	0.65	6.41	0.76
	⑧	2.250	0.106	3.39	0.50	3.47	0.56	5.37	0.58	6.61	0.71

서 제외하였다. 또한 Case 1과 Case 4의 ①의 경우 다음의 Figs. 4 and 7과 같이 일반적인 순간단위도의 형상을 나타내지 못하므로 분석에서 제외하였다. Case 1의 경우 특성유속의 변동이 진행됨에 따라  $n$ 값은 커지고  $K$ 의 값은 작아지는 현상을 나타냈다. 이러한 결과는 지표면 특성유속은  $n$ 과 비례관계,  $K$ 와 반비례관계를 나타내며 하천 특성유속은  $n$ 과 반비례관계,  $K$ 와 비례관계를 나타낸다는 결과 중 지표면 특성유속의 특성을 따르는 결과로서 Fig. 2에서는 정확하게 나타나지 않았지만  $n$ 값 역시  $K$ 값과 마찬가지로 하천의 특성속도 보다 지표면의 특성속도의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다. Case 2의 경우 특성유속의 변화에 따라  $n$ 값은 작아지지만,  $K$ 값은 작아

지다가 어느 한계지점을 지나면 다시 커지는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 전술하였듯이 지표면과 하천 특성유속 규모의 상대적인 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 하천의 특성유속이 큰 초기의 변화에는 하천 특성유속의 특성을 따르며, 지표면 특성유속이 큰 후기의 변화에는 지표면 특성유속의 특성을 따르기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. Case 3과 Case 4의 경우에는 Figs. 2 and 3과 동일한 결과의 경향을 나타냈다. 결론적으로 특성유속에 대한 Eqs. (11) and (12)는 하천 특성유속 보다 지표면 특성유속에 민감하게 반응함을 알 수 있었으며, Nash 모형 매개변수  $n$ ,  $K$ 는 두 특성유속의 상대적인 크기에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

Table 3. Estimation of  $Q_p$  and  $t_p$

Case		$u_c$	$u_h$	Sanseong		Ipyeong		Gidae		Sangye	
				$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$	$Q_p$	$t_p$
Case 1	①	0.500	0.001	0.011	4.605	No data		0.007	11.118	0.006	24.905
	②	1.000	0.016	0.108	3.297	0.097	3.674	0.070	7.049	0.060	11.085
	③	1.500	0.031	0.194	2.122	0.175	2.399	0.127	4.498	0.107	7.019
	④	2.000	0.046	0.279	1.565	0.252	1.775	0.184	3.306	0.153	5.150
	⑤	2.500	0.061	0.364	1.239	0.329	1.408	0.240	2.614	0.197	4.070
	⑥	3.000	0.076	0.448	1.026	0.405	1.166	0.296	2.162	0.242	3.366
	⑦	3.500	0.091	0.532	0.875	0.481	0.996	0.351	1.843	0.286	2.870
	⑧	4.000	0.106	0.616	0.763	0.557	0.868	0.407	1.606	0.330	2.501
Case 2	①	0.500	0.106	0.169	4.015	0.146	4.306	0.098	8.630	0.061	14.855
	②	1.000	0.091	0.289	2.344	0.259	2.607	0.180	4.931	0.117	8.073
	③	1.500	0.076	0.342	1.779	0.312	2.017	0.224	3.717	0.159	5.887
	④	2.000	0.061	0.338	1.486	0.307	1.694	0.224	3.119	0.177	4.862
	⑤	2.500	0.046	0.298	1.295	0.268	1.456	0.194	2.756	0.166	4.312
	⑥	3.000	0.031	0.234	1.139	0.210	1.210	0.149	2.477	0.131	4.000
	⑦	3.500	0.016	0.149	0.933	0.139	0.752	0.094	2.107	0.082	3.741
	⑧	4.000	0.001	No data		No data		No data		No data	
Case 3	①	0.500	0.050	0.148	4.596	0.133	5.091	0.092	9.687	0.059	15.956
	②	1.000	0.050	0.227	2.676	0.207	3.036	0.149	5.591	0.106	8.851
	③	1.500	0.050	0.269	1.946	0.244	2.219	0.178	4.079	0.138	6.368
	④	2.000	0.050	0.296	1.542	0.267	1.753	0.195	3.251	0.160	5.063
	⑤	2.500	0.050	0.316	1.280	0.284	1.445	0.207	2.715	0.175	4.240
	⑥	3.000	0.050	0.333	1.094	0.298	1.222	0.216	2.335	0.186	3.665
	⑦	3.500	0.050	0.347	0.954	0.311	1.053	0.223	2.048	0.195	3.237
	⑧	4.000	0.050	0.359	0.844	0.322	0.920	0.230	1.823	0.202	2.904
Case 4	①	2.250	0.001	No data		No data		No data		0.009	0.406
	②	2.250	0.016	0.133	1.519	0.121	1.491	0.084	3.360	0.074	5.620
	③	2.250	0.031	0.217	1.489	0.195	1.639	0.140	3.201	0.122	5.070
	④	2.250	0.046	0.289	1.417	0.260	1.601	0.189	3.005	0.160	4.690
	⑤	2.250	0.061	0.352	1.351	0.319	1.538	0.233	2.842	0.188	4.426
	⑥	2.250	0.076	0.406	1.294	0.370	1.475	0.270	2.711	0.209	4.234
	⑦	2.250	0.091	0.454	1.246	0.414	1.419	0.300	2.605	0.223	4.089
	⑧	2.250	0.106	0.494	1.205	0.437	1.388	0.325	2.518	0.234	3.975

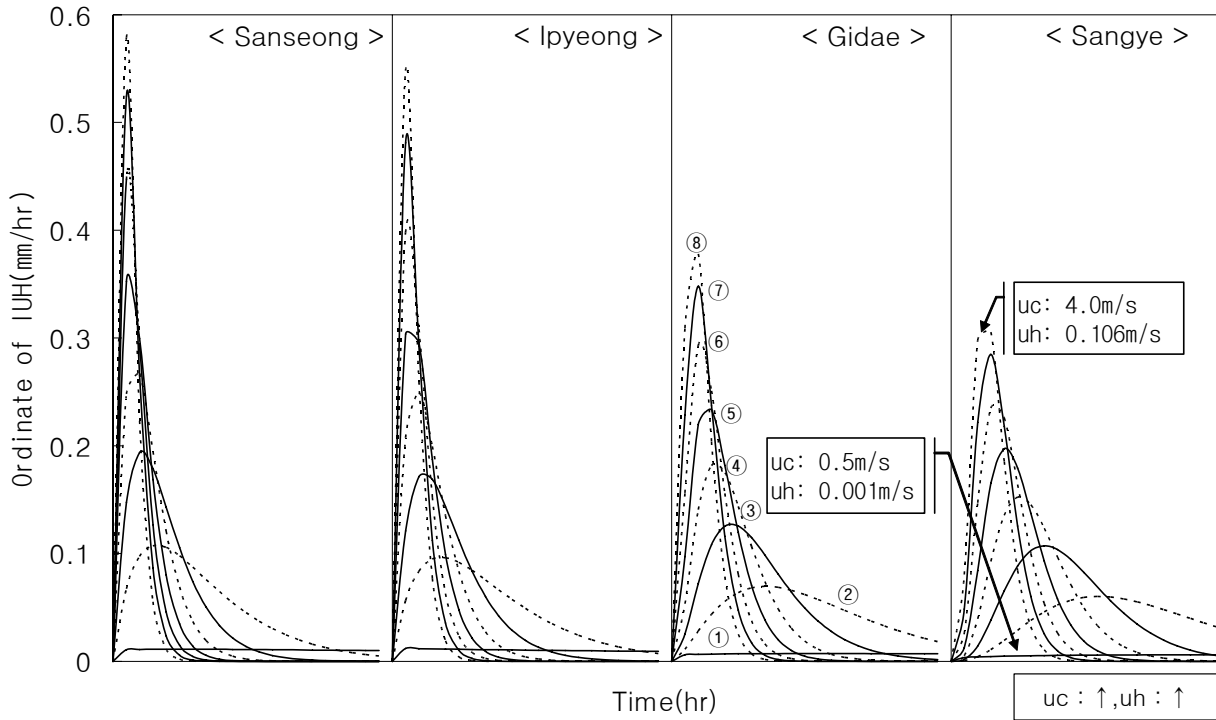


Fig. 4. Variation of IUH as Characteristic Velocities (Case 1)

Table 2의 Nash 모형 매개변수에 의해 각각의 Case에 대해 Figs. 4~7과 같이 순간단위도를 유도하였다. Figs. 4~7과 Table 3에서 보여 지듯이 동일한 Case에서는 유역 규모가 커짐에 따라 침투유량은 작아지고 침투시간은 길어지는 일관된 특성을 나타냄을 볼 수 있었다. 또한 유역 규모가 커짐에 따라 순간단위도 분산 (variance)이 크게 나타나는데, 이는 Eq. (5)의 두 번째 항인 하천에 대한 지형학적 분산에서 유역 규모에 따른 하천 특성유속의 변동범위 (0.5~4.0m/s)에 비해 Table 1의 하천 유하거리의 분산의 변동이 매우 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. Fig. 4의 Case 1의 경우 유역 규모가 다른 네 유역 모두에서 두 특성유속이 커짐에 따라 침투유량은 커지고 침투시간은 작아지며, 순간단위도의 형상이 높은 첨도를 나타냄을 알 수 있었다. 이는 두 특성유속이 증가함에 따라 Eq. (5)의 지형학적 분산이 작아지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 그러나 Fig. 5에서는 특성유속의 변동에 따라 이러한 일관된 현상이 나타나지 않으며, 침투유량은 증가하다가 어느 지점부터는 다시 작아지는 경향을 보였다. 이는 침투유량의 증가하는 지점까지는 하천 유동이 순간단위도의 형상을 결정짓게 되어 하천 특성유속이 커짐에 따라 지형학적 분산은 작아지고, 이로 인해 침투유량이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 이후의 구간에서는 지표면 유동이 지배적인 역할을 하므로 지표면 특성유속이 작아짐에 따라 지형학적 분산이 커지고, 이로 인해 침투유량이 작아지는 것으로 판단된다. 반면 침투시간은 하천 유동의 지배적인 영향에 의해 지속적으로 감소

하는 것으로 판단된다. 이를 통해 침투시간은 하천 지표면 특성유속보다는 하천 특성유속에 영향을 받음을 알 수 있었다. Case 4의 경우 산성, 기대, 산계 유역은 침투시간이 감소하는 결과를 보였으나, 이평 유역은 ②~③사이에서 침투시간이 증가하고 이후에는 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 Case 3, Case 4에서 고정된 특성유속이 크기에 따라 나타날 수 있는 현상으로, 순간단위도의 침투유량 및 침투시간은 Nash 모형의 두 매개변수와 마찬가지로 지표면과 하천 특성유속의 복합적인 영향에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 이를 통해 Nash 모형의 두 매개변수와 순간단위도의 침투유량과 침투시간의 결정에 있어서 지배적인 역할을 하는 각각의 특성유속의 범위는 Table 1의 지형인자의 규모에 따라서도 변동될 수 있다는 점을 쉽게 유추할 수 있다.

Fig. 6은 지표면 특성유속을 고정하고 하천 특성유속을 증가했을 경우 순간단위도의 변동을 나타낸 것으로 하천 특성유속이 커짐에 따라 침투시간이 급격하게 작아지는 것을 볼 수 있으며, Fig. 7은 반대로 하천 특성유속을 고정하고 지표면 특성유속을 증가하였을 경우 순간단위도의 변동을 나타낸 것으로 지표면 특성유속이 커지더라도 침투시간의 변동은 작음을 알 수 있다. 반면 침투유량의 경우에는 후자의 경우에 더욱 급격하게 변동됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 하천 특성유속이 변동함에도 순간단위도의 감수부의 경사는 거의 일정한 반면 Fig. 7의 경우 지표면 특성유속이 작아짐에 따라 감수부의 경사가 완만해 짐을 볼 수 있다. 결론적으로 순간단위도의 형상은 두



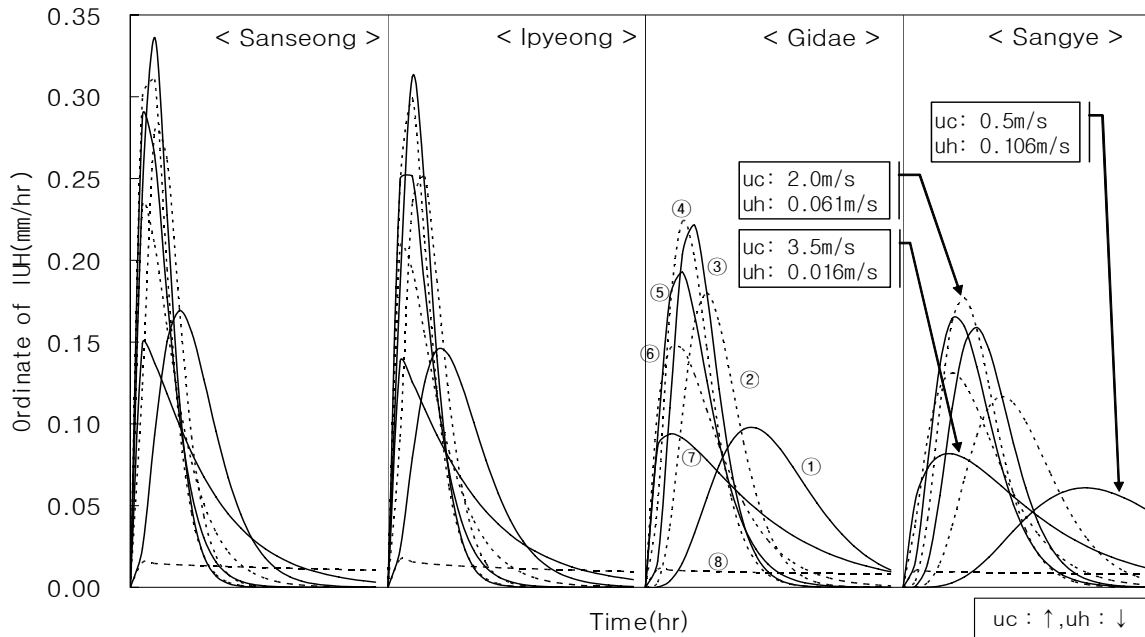


Fig. 5. Variation of IUH as Characteristic Velocities (Case 2)

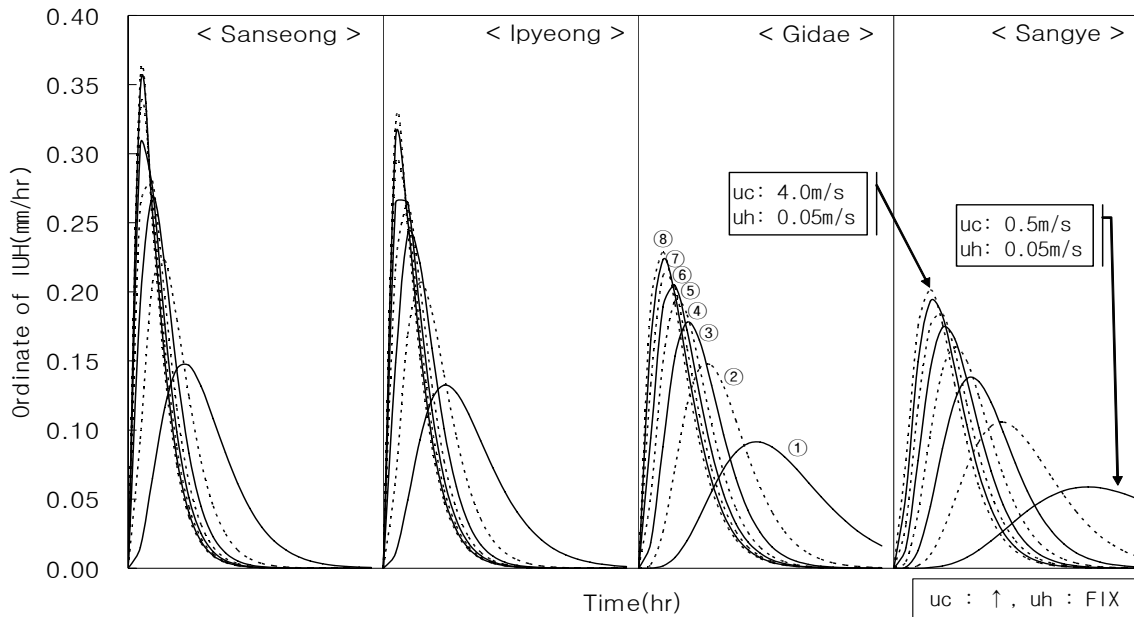


Fig. 6. Variation of IUH as Characteristic Velocities (Case 3)

특성유속의 복합적인 작용에 의해 결정되겠지만, 하천 특성유속은 순간단위도의 침투시간 및 상승부의 결정에 지배적인 역할을 하는 반면 지표면 특성유속은 순간단위도의 침투유량 및 감수부의 형상을 결정하는데 지배적인 역할을 함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지표면과 하천 특성유속이 Nash 모형의 두 매개변수와 순간단위도의 형상에 미치는 영향을 분석하

였다. 이상으로부터의 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Nash 모형의 두 매개변수는 지표면과 하천의 특성유속의 복합적인 영향에 의해 결정되지만, 하천 특성유속 보다 지표면 특성유속의 영향이 상대적으로 큼을 알 수 있었다.
- 2) 지형학적 분산을 고려한 특성유속에 의한 순간단위도는 유역 규모가 커짐에 따라 침투유량은 작아지고 침투시간은 길어지는 일관된 수문응답 특성을 나타냈다.
- 3) 순간단위도의 분산 (variance)은 지형학적 분산 (dispersion)효과에 의해 변동됨을 알 수 있었으며, 이를

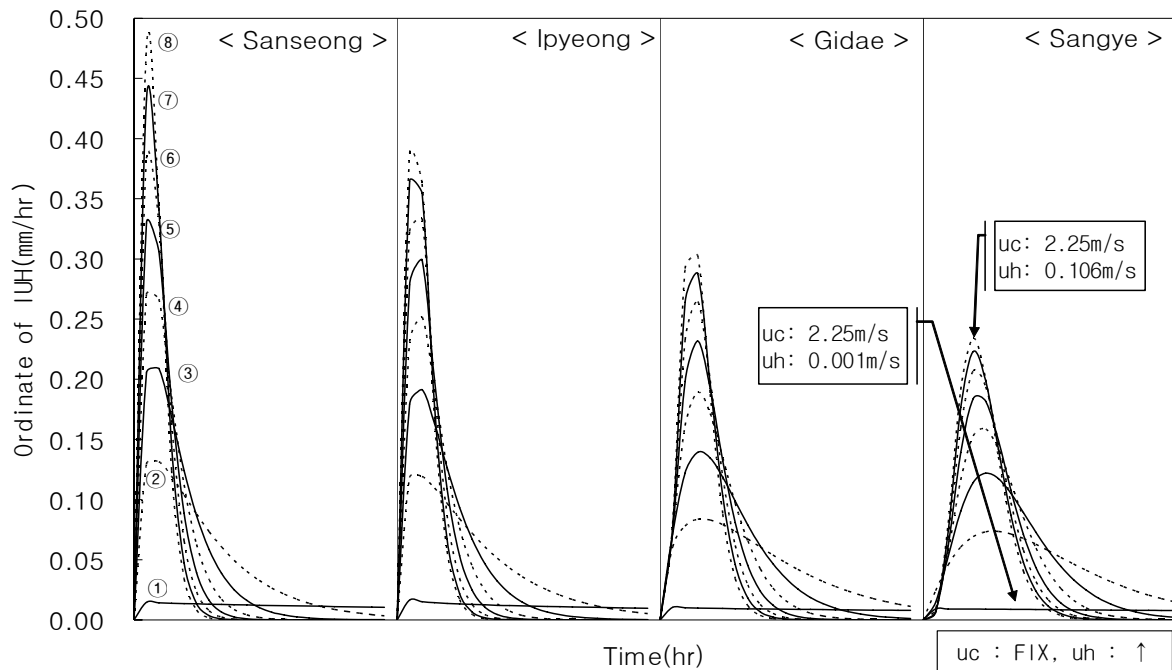


Fig. 7. Variation of IUH as Characteristic Velocities (Case 4)

통해 지형학적 분산이 순간단위도의 첨두유량 및 첨두시간이 결정에 지배적인 역할을 함을 알 수 있었다.

4) 순간단위도의 형상은 두 특성유속과 지형인자들의 복합적인 상호작용의 영향에 의해 결정되지만, 지표면 특성유속은 저류효과로 인한 순간단위도의 첨두유량 및 감수부의 형상 결정에 지배적인 역할을 하며 하천 특성유속은 이송효과로 인한 순간단위도의 첨두시간 및 상승부의 결정에 지배적인 역할을 함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

건설교통부 (2002). 2001년 국제수문개발계획 (IHP) 연구 보고서, 건설교통부, pp. 8.1-8.4

최용준, 김주철, 정관수 (2010). "배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형의 매개변수 동정", **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제1호, pp. 1-13.

Botter, G., and Rinaldo, A. (2003). "Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 39, No. 10, 1286. doi: 10.1029/2003WR002154.

Di Lazzaro, M. (2009). "Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework". *Journal of Hydrology, Elsevier*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.027.

D'odorico, P., and Rigon, R. (2003). "Hillslope and channel contributions to the hydrologic response". *Water*

*Resources Research*, AGU, Vol. 39, No. 5, 1113. doi: 10.1029/2002WR001708.

Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph". *IASH Assemblée Générale de Toronto*, IASH, Vol. 3, pp. 114-121.

Rinaldo, A., Rigon, R., and Marani, M. (1991). "Geomorphological dispersion". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 27, No. 4, pp. 513-525.

Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.

Rosso, R. (1984). "Nash model relation of Horton order ratios". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 20, No. 7, pp. 914-920.

Saco, P.M., and Kumar, P. (2002). "Kinematic dispersion in stream networks-1. Coupling hydraulics and network geometry". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 38, No. 11, pp. 26~1-26~14.

van der Tak, L.D., and Bras, R.L. (1990). "Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph". *Water Resources Research*, AGU, Vol. 26, No. 10, pp. 2393-2400.

논문번호: 10-011	접수: 2010.01.4
수정일자: 2010.13.02/.03.18	심사완료: 2010.03.18