

배수경로의 이질성을 기반으로 한 Nash 모형의 매개변수 동정**Identification of Nash Model Parameters Based on Heterogeneity of
Drainage Paths**

최 용 준* / 김 주 철** / 정 관 수***

Choi Yong Joon / Kim Joo Cheol / Jung Kwan Sue

Abstract

For the first time, this study identifies Nash model parameters by GIUH theory based on grid of GIS with heterogeneity of drainage path. Identified parameters have advantages to improve accuracy and usefulness with considering hillslope-flow, geomorphological dispersion and easily extracting geomorphological factors by GIS in the watershed. Calculated results by identified parameters compare with observation data for verification of this model. The comparison is well correspondence between observed data and calculated results. And the comparison results of changing trends about lag time and the variance as hillslope and channel characteristic velocities sensitively present changes about hillslope characteristic velocity. Thus this model justifies that estimation of hillslope characteristic velocity demands with the great caution.

Keywords : GIUH, Nash model, characteristic velocity

요 지

본 연구에서는 배수경로 이질성에 의한 격자 기반 지형학적 순간단위도 이론으로 부터 Nash 모형 매개변수를 최초로 동정하였다. 동정된 매개변수는 지표면 유동 및 지형학적 분산을 고려하며, 지리정보체계에 의해 영역의 지형 인자들을 손쉽게 추출함으로써 모형의 정확성 및 효용성을 높였다는 점에 의미를 둘 수 있다. 모형의 검증에 위해 동정된 매개변수에 의해 계산된 결과를 실제 관측치와 비교하였다. 계산유출수문곡선과 관측수문곡선의 비교 결과 비교적 잘 일치하는 경향을 보였다. 또한 지표면과 하천의 특성유속에 따른 지체시간 및 분산의 변화양상을 살펴본 결과, 지표면 특성유속에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 따라서 본 모형의 적용시 지표면 특성유속 산정에 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지형학적 순간단위도, Nash 모형, 특성유속

* 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

Graduated student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National University., Daejeon 305-764, Korea

** 교신저자, 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

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

*** 충남대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

1. 서론

강우-유출 현상에 있어서 배수유역은 유효우량을 입력으로, 직접유출을 출력으로 변환하는 계로 나타낼 수 있다. 그러나 실제 자연현상에서 이러한 계에 의한 변환은 매우 다양한 변수에 영향을 받으며 특히 시·공간적으로 비선형성의 특성을 갖는 복잡한 과정이다. 따라서 이러한 변환과정을 설명하기 위해서는 단순화된 가정을 사용하게 된다. 대표적인 비선형성 특성을 가지는 선형수문계(linear hydrological system)에서는 이러한 단순화된 가정 중 집중, 선형 및 시불변성의 가정을 사용한다. 마찬가지로 선형수문계의 개념적 모형에서도 이러한 가정을 적용한 핵함수를 사용하게 되는데 이를 순간단위도라 한다. 이러한 순간단위도는 이후 통계학적 접근법에 의해 자연 유역의 형태적 특성을 결합한 지형학적 순간단위도(GIUH)로 발달하게 된다. 본 연구에서는 이러한 순간단위도와 GIUH의 관계에 대해 주목하였다.

두 모형의 상관관계에 대한 연구를 위하여 순간단위도의 대표적 모형인 Nash 모형을 선정하였다. Nash 모형은 선형저수지의 개수와 저류상수를 매개변수로 하는 2매개변수 모형으로 구조가 단순하고 유연성이 뛰어나 적용성이 우수한 모형으로 알려져 있다. 또한 적률법에 의해 매개변수를 추정하는 수학적으로 완벽한 모형이라는 장점을 가지고 있다. 이러한 Nash 모형의 매개변수 추정을 위해 성기원(1997)은 유역의 자기상사성을 이용하였으며, 김주철 등(2004)은 Moussa (2003)가 제시한 신집수형상디스크립터와 유출응답특성과의 상관성을 이용해 Nash 모형의 매개변수의 대표치를 산정하는 연구를 수행하였다.

Nash 모형과 GIUH 모형의 상관관계에 대한 연구는 Rosso (1984)에 의해 최초로 연구되었다. 그는 개념적 순간단위도인 Nash 모형의 매개변수를 GIUH 이론을 이용하여 동정(identification)하였다. 동일한 유역에 대하여 두 모형은 서로 합동의 관계에 있음을 가정하고, 이를 순간단위도의 특성매개변수 해석에 적용하였다. 이러한 결과는 수학적으로 매우 복잡한 모형에 의한 적용 결과를 단순한 형태의 개념적 모형으로부터 기대할 수 있다는 것과 개념적 모형의 매개변수들에 대하여 정량적 해석수단을 제공할 수 있다는 이중적 관점에서 평가될 수 있다. 국내의 경우 조홍제(1987)는 이상의 Rosso (1984) 모형을 개선하는 방법을 제시하였으며, 홍일표와 고재용(1999)는 하천의 프랙탈 특성을 Rosso (1984)의 모형에 응용하여 프랙탈 GIUH를 제시하였다.

Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979)에 의해 개발된

GIUH 모형에서의 적률은 Rinaldo *et al.* (1991)에 의해 연구되었다. 그들은 유역전반에 걸쳐 하천망에서 일정한 특성유속(characteristic velocity)을 가정하여 확산유추를 통해 순간단위도를 유도하였고, 이러한 순간단위도의 형상을 결정짓는 분산(variance)이 물 입자에 의한 동역학적 영향과 배수경로의 이질성에 의한 지형학적 영향에 의존함을 밝혀내고 이를 정량화 하였다. 여기에서 설명하고 있는 특성유속은 GIUH 모형에서 홍수 유출이 발생하는 동안 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 유속으로 모형 내에서 유역의 수리학적 특성을 대표하게 된다.

D'odorico and Rigon (2003)과 Di Lazzaro (2009) 등은 지리정보체계(GIS)를 바탕으로 Strahler 차수 기반의 GIUH 모형을 격자 형태로 일반화 하였다. 이들은 Rinaldo *et al.* (1991)의 연구 결과를 바탕으로 Strahler 차수 기반 GIUH 모형에 대한 적률 특성을 격자 기반 GIUH에 대해 적용하였다. 이들의 연구에서 주목할 점은 유역규모의 응답함수에서 커다란 비중을 차지하는 지표면 유동을 고려하였다는 것이다(Van der Tak and Bras, 1990). 이전의 연구에서는 대부분 지표면 유하거리가 하천 유하거리에 비해 매우 짧기 때문에 이러한 지표면 유동의 효과를 무시하였다. 그러나 격자 기반 GIUH는 이러한 지표면 유동의 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 도구를 제공하였으며, 유역규모의 수문학적 응답에서 지표면 유동의 지배적 역할을 증명하였다(Di Lazzaro, 2009; 최용준 등, 2009). 또한 Di Lazzaro (2009)는 실제 수문자료의 적률을 통하여 수리학적 매개변수인 특성유속을 산정하는 기법을 제시하였다. 제시된 방법을 통해 산정된 지표면과 하천의 개별적인 특성유속은 기존의 Strahler 차수법칙에 기반을 둔 GIUH 모형에 비해 물리적으로 유역의 수리학적 특성을 잘 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 이러한 격자 기반 GIUH 모형을 이용해 Nash 모형 매개변수를 최초로 동정하였다는 점을 의미를 둘 수 있다. 유도된 동정식은 Nash 모형 매개변수를 지형인자와 특성유속만의 함수로 표현될 수 있다는 Rosso (1984)의 연구결과와 일치한다. 그러나 본 연구에서 동정된 식은 유역의 수문응답의 형상에 지배적인 역할을 하는 지표면 유동 및 지형학적 분산을 고려할 뿐 아니라 GIS에 의해 유역의 지형인자들을 손쉽게 추출함으로써 모형의 정확성 및 효율성을 높였다는 장점을 가지고 있다. 만약 유역특성인자들과 특성유속들에 대한 적합한 관계식이 도출된다면 동정된 식은 지형학적 분산을 고려한 유용한 합성단위도 기법이 될 것이다. 그러나 이러한 합성단위도 기법에 관한 연구는 향

후 연구과제로 수행할 예정이며, 본 연구에서는 배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형 매개변수 동정식의 실제 유역에의 적용성 검증을 목적으로 하였다.

2. Nash 모형과 격자 기반 GIUH 이론

Rinaldo *et al.* (2006)는 시간의 경과에 따른 물 입자의 운동궤적을 Lagrangian 좌표계를 이용하여 수식화하였고, 이를 통해 유하시간에 대한 확률밀도함수는 순간단위도와 합동의 관계에 있음을 명시적으로 공식화하였다(최용준 등, 2009). 따라서 본 장에서는 이러한 순간단위도 중 본 연구에서 주목한 Nash 모형과 격자 기반 GIUH 모형의 적률특성에 대한 이론적 고찰을 실시하였다.

2.1 확률밀도함수의 적률특성

순간단위도는 선형수문계에 의해 다음과 같이 convolution 연산의 형태로 나타낼 수 있다(Dooge, 1973; Singh, 1988).

$$q(t) = \int_0^t i(\tau)f(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

여기에서 $i(t)$, $q(t)$ 및 $f(t)$ 는 각각 유효강우, 직접유출 및 순간단위도를 나타낸다.

Eq. (1)을 구성하는 세 함수의 적률들 사이에는 특별한 상관성이 존재한다(Nash, 1959). 선형계(linear system)의 특성에 따라 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같이 특성함수(적률생성함수)의 형태로 변환될 수 있다.

$$Q(s) = I(s)F(s) \quad (2)$$

여기서 $Q(s)$, $I(s)$, $F(s)$ 는 각각 $q(t)$, $i(t)$, $f(t)$ 에 대한 bilateral Laplace 변환이다(Dooge, 1973).

또한 $q(t)$ 의 원점에 대한 R 차 적률 $U'_R[q(t)]$ 과 면적 중심에 대한 적률 $U_R[q(t)]$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U'_R[q(t)] = \sum_{k=0}^R \binom{R}{k} U'_k[i(t)] U'_{R-k}[f(t)] \quad (3)$$

$$U_R[q(t)] = \sum_{k=0}^R \binom{R}{k} U_k[i(t)] U_{R-k}[f(t)] \quad (4)$$

여기서 $\binom{\cdot}{\cdot}$ 는 조합(combination)을 나타내며, $U'_k[i(t)]$,

$U'_k[f(t)]$ 는 각각 $i(t)$, $f(t)$ 의 원점에 대한 k 차 적률, $U_k[i(t)]$, $U_k[f(t)]$ 는 각각 $i(t)$, $f(t)$ 의 면적중심에 대한 k 차 적률이다. 면적중심에 대한 1차 적률의 성질 ($U_1(\cdot) = 0$)을 이용할 경우 상기한 세 함수의 1, 2차 적률들 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$U'_1[f(t)] = U'_1[q(t)] - U'_1[i(t)] \quad (5)$$

$$U_2[f(t)] = U_2[q(t)] - U_2[i(t)] \quad (6)$$

Eqs. (5) and (6)은 각각 유하시간의 평균(mean)과 분산(variance)을 의미한다. 유하시간에 대한 이들 두 통계량은 호우사상에 대한 관측 자료가 주어질 경우 고려하는 모형의 종류에 관계없이 일정하게 결정될 수 있음이 주목된다(Dooge, 1973).

2.2 Nash 모형

Nash (1957)는 Eq. (1)에서의 핵함수인 $f(t)$ 에 대해 직렬로 연결된 n 개의 동등한 선형 지수지로 구성된 배수유역을 제안함으로써 개념적 순간단위도 모형을 Eq. (7)과 같이 공식화 하였다.

$$f_n(t) = \frac{1}{K} \frac{1}{\Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (7)$$

여기에서 $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma함수이다. Eq. (7)은 배수유역의 순간단위도에 대한 일반식으로서 n 과 K 가 각각 형상매개변수와 축척매개변수에 해당하는 2매개변수 Gamma분포 확률밀도함수와 일치한다.

주목할 것은 선형지수지의 개수 n 이 반드시 정수일 필요가 없다는 것이다. 이것은 선형지수지는 완전히 개념화된 성분으로서, 선형지수지의 개수 n 은 유역의 물리적 규모 뿐 만 아니라 형상, 면적 및 배수망의 효과 등을 통하여 대상 유역 순간단위도의 형상을 설명하는 복합적 매개변수이기 때문이다. 이후 Nash (1959, 1960)는 자신의 모형을 적률법을 이용하여 수학적으로 규명함으로써 순간단위도에 대한 개념적 접근법의 기초를 확립하였다.

Eq. (7)의 평균 및 분산은 적률에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$E[t] = nK \quad (8)$$

$$Var[t] = nK^2 \quad (9)$$

2.3 지형학적 분산을 고려한 격자 기반 GIUH 모형

D'odorico and Rigon (2003) 및 Di Lazzaro (2008, 2009)는 Rinaldo *et al.* (1991)에 의해 정의된 Strahler의 차수법칙을 이용한 GIUH 모형에서의 배수경로 이질성에 의한 지형학적 분산의 개념을 다음과 같이 보다 일반적인 형태로 확장하였다. 만약 유역 내부에서 발생 가능한 모든 배수경로들 중에서 임의로 선택한 i 번째 배수경로의 지표면 및 하천유하거리를 각각 L_{h_i} , L_c 라 할 경우 해당 경로를 통한 물 입자의 유하시간 T_i 는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$T_i = \frac{L_{h_i}}{u_h} + \frac{L_c}{u_c} \quad (10)$$

여기서 u_h , u_c 는 각각 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 지표면 및 하천의 특성유속이다. 만약 모든 배수경로의 개수를 n 이라 할 경우 유역 전반에 걸친 유하시간의 평균은 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$E[T] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{E[L_h]}{u_h} + \frac{E[L_c]}{u_c} \quad (11)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자이다. 유사한 방법으로 유하시간의 분산 역시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}[T] &= E[(T - E[T])^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - E[T])^2 \quad (12) \\ &= \frac{\text{Var}[L_h]}{u_h^2} + \frac{\text{Var}[L_c]}{u_c^2} + 2 \frac{\text{Cov}[L_h, L_c]}{u_h u_c} \end{aligned}$$

여기서 $\text{Var}[\cdot]$, $\text{Cov}[\cdot, \cdot]$ 는 각각 분산 및 공분산 연산자이다. Eqs. (11) and (12)는 Eqs. (5) and (6) 및 Eqs. (8) and (9)와 합동의 관계로서 순간단위도의 평균 및 분산에 대한 물리적 해석의 근거를 제공하고 있다.

만약 대상유역에 대한 강우-유출 관측자료 및 지형자료가 주어질 경우 물 입자의 운동을 정의하는 지표면 및 하천유속 u_h , u_c 는 Eqs. (11) and (12)를 연립하여 다음과 같이 산정할 수 있게 된다.

$$u_{c1,2} = \frac{a \pm b}{c} \quad (13)$$

$$u_{h1,2} = \frac{u_{c1,2} E[L_h]}{u_{c1,2} E[T] - E[L_c]} \quad (14)$$

여기서 Eq. (13)의 a , b , c 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$a = E[L_c] \left\{ \begin{array}{l} -\text{cov}[L_h, L_c] E[L_h] E[T] \\ + E[L_c] \text{Var}[L_h] E[T] \end{array} \right\} \quad (15)$$

$$b = E[L_h] E[L_c] \left\{ \begin{array}{l} E^2[T] \left(\begin{array}{l} \text{Cov}^2[L_h, L_c] \\ - \text{Var}[L_h] \text{Var}[L_c] \end{array} \right) \\ + \text{Var}[T] \left(\begin{array}{l} -2 \text{Cov}[L_h, L_c] E[L_h] E[L_c] \\ + E^2[L_c] \text{Var}[L_h] \\ + E^2[L_h] \text{Var}[L_c] \end{array} \right) \end{array} \right\}^{0.5} \quad (16)$$

$$c = E[L_c] \{ \text{Var}[L_h] E^2[T] - E^2[L_h] \text{Var}[T] \} \quad (17)$$

여기에서 실제 강우-유출 사상에 의해 계산된 $E[T]$ 와 $\text{Var}[T]$ 는 특성유속에 의해 계산된 $E[T_c]$, $E[T_h]$ 및 $\text{Var}[T_c]$, $\text{Var}[T_h]$ 와의 혼돈을 막기 위하여 T_{LAG} 및 Var_{OBS} 로 표시하였다.

Eqs. (13) and (14)로부터 한 개의 유역에 대하여 두 쌍의 지표면 및 하천유속이 산정됨을 알 수 있다. Di Lazzaro (2009)는 음의 부호를 갖는 유속을 포함하거나 혹은 지표면과 하천유속이 미소한 차이를 갖는 경우에는 물리적인 이유로 추정 값에서 제외하였다. 전자의 경우 자연유역에서는 발생할 수 없는 경우이며 후자의 경우는 지표면과 하천의 구별이 의미가 없기 때문이다.

3. 배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형 매개변수 동정

이상의 이론적 배경을 바탕으로 본 연구에서는 Nash 모형의 매개변수를 격자 기반 GIUH의 개념을 이용하여 다음과 같이 동정하였다.

전절에서 실제 호우사상에 대한 T_{LAG} 와 Var_{OBS} 를 구함으로서 수문자료의 통계특성을 고려한 유역의 하천 및 지표면의 특성유속을 추정하였으며, 추정된 유속들로부터 수문곡선의 지형학적 분산을 고려한 GIUH를 유도할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 이러한 격자 기반 GIUH 이론의 적률특성인 Eqs. (11) and (12)와 Nash 모형의 적률특성인 Eqs. (8) and (9)를 연립하여 Eqs. (18) and (19)와 같이 Nash 모형의 두 매개변수를 동정하였다.

Eqs. (18) and (19)에서 보여 지듯이 Nash 모형의 매개변수는 유역의 지형인자와 특성유속만의 함수로 표현되며, 이러한 점은 Strahler 차수 기반 GIUH에 의한 Rosso(1984)의 연구결과와 일치하게 된다.

$$n = \frac{<L_h>^2 u_c^2 + 2 <L_c> <L_h> u_c u_h + <L_c>^2 u_h^2}{\text{Var}[L_h] u_c^2 + 2 \text{Cov}(L_c, L_h) u_c u_h + \text{Var}[L_c] u_h^2} \quad (18)$$

$$K = \frac{\text{Var}[L_h] u_c^2 + 2 \text{Cov}(L_c, L_h) u_c u_h + \text{Var}[L_c] u_h^2}{u_c u_h (<L_h> u_c + <L_c> u_h)} \quad (19)$$

4. 적용사례

4.1 대상유역의 수문사상 및 지형분석

본 연구의 대상유역은 비교적 장기간 수문자료가 축적된 국제수문개발계획(IHP) 대표유역을 선정하였다. 선정된 한강, 금강 및 낙동강 수계의 대표유역에 대해 수위관측소를 기준으로 평창강 유역의 6개, 보청천 유

역의 5개 및 위천 유역의 6개 소유역으로 총 17개 유역으로 나누어 연구를 수행하였다. 특성유속 산정을 위한 각 소유역별 수문사상은 Table 1과 같다. 소유역별 면적 평균 강우량은 티센법을 적용하여 추정하였으며, 직접유출 수문곡선의 작성을 위한 기저유출분리는 경사급 변점법을 적용하였다. 유효우량산정은 초기손실-일정손실법을 적용하였다.

Table 1. The Outline of Storm Events

Watershed	Year	Month- Day	Lag time (hr)	Variance (hr ²)	Mean of Lag time (hr)	Mean of Variance (hr ²)	Watershed	Year	Month- Day	Lag time (hr)	Variance (hr ²)	Mean of Lag time (hr)	Mean of Variance (hr ²)				
평창강유역	보청천유역	1983	07-03	10.74	40.51	9.24	41.50	보청천유역	1984	07-10	17.61	157.45	15.32	98.33			
		1985	07-10	6.07	22.45				1987	08-20	10.40	51.46					
		1986	07-16	11.07	46.92				1992	07-16	15.79	131.21					
		1995	07-09	8.20	40.01				1998	08-24	15.15	73.76					
			08-08	10.13	57.63				1998	06-24	15.31	64.90					
		금강유역	1990	06-20	9.75				37.74	10.56	52.27	금강유역			2000	07-30	17.67
	1991		05-25	11.42	79.01	1990	07-14		16.10				58.94				
	1995		08-08	9.84	38.57	1991	06-11		22.13				114.40				
			08-19	11.00	51.47	1999	06-23		15.12				129.09				
	1998		08-14	10.78	54.54	1999	09-09		16.66				180.29				
						1999	09-22		22.12				158.41				
	낙동강유역	평창강유역	1985	07-10	11.33	57.55	12.08		56.97	낙동강유역	1989		08-22	4.34	6.42	5.24	14.08
			1988	07-19	10.94	20.57		1990			07-18		5.88	18.42			
			1990	07-17	13.41	44.53		1992			09-12		5.52	17.11			
			1991	05-25	12.02	71.88		1992			07-14		5.00	13.46			
				08-02	10.94	64.00		1992			08-12		5.44	15.01			
		1998	08-14	13.81	83.27	14.44	107.44	금강유역	1986		07-21		7.17	18.50	6.62	20.41	
		1985	07-10	11.58	71.65				1989		08-22	6.66	25.76				
		1991	07-24	11.15	32.10				1990		07-18	7.40	23.32				
			08-02	14.86	116.76				1990		09-12	6.36	16.80				
		1992	05-07	16.89	112.33				1992		07-17	6.58	21.98				
	09-24		16.43	214.25	1992	08-12	5.52	16.11									
	한강유역	1990	06-20	10.52	39.65	10.07	37.79	평창강유역	1989	08-22	6.89	19.71	7.39	27.53			
		1994	06-30	7.60	35.63				1992	07-17	6.89	22.59					
07-06			9.18	36.17	1996				07-04	8.20	41.00						
1995		08-08	10.24	32.67	1997				05-12	7.58	26.82						
1997		07-15	12.81	44.84	17.37				164.19	평창강유역	1986	07-21			10.12	29.23	8.38
1991	05-25	20.74	185.42	1987		07-14	7.01	33.45									
	08-02	17.03	175.73	1989		08-22	8.58	29.69									
1992	08-27	18.40	228.67	1990		09-23	6.90	22.76									
	09-24	14.95	120.23	1997		05-12	9.29	44.51									
1995	07-15	16.72	154.53	7.47	22.22	평창강유역	1989	08-2	8.03	27.77	7.03	23.65					
1995	08-19	16.36	120.58				1990	09-23	6.97	22.57							
	1992	07-12	7.47				21.95	1992	07-14	5.18			13.20				
08-24		7.44	23.37				1992	07-17	7.07	20.63							
1993	08-08	7.38	18.96				1997	08-03	6.45	24.19							
	09-16	8.64	26.08				1998	05-10	7.88	27.10							
1995	08-30	7.09	22.55				9.51	43.02	평창강유역	1983			06-20	15.98	138.10	12.31	89.98
	2000	06-26	6.83							19.66			1986	07-21	11.83		
1993	08-08	7.48	32.17				1997	05-12		9.88			58.08				
	09-16	11.52	37.88				1998	05-10		11.53			119.83				
2000	06-26	9.53	59.01	11.29	41.68	평창강유역	1983	06-17		12.21	62.41						
	1993	08-08	7.48				32.17	1992		07-12	11.25	29.02					
1999	07-15	10.41	25.51				1997	07-15		10.41	25.51						
	09-09	11.29	49.79				1999	09-09		11.29	49.79						

Table 2. The Travel Length of Watersheds

Watershed	Area (km ²)	Stream		Hillslope		Covariance (m ²)	
		Mean (m)	Variance (m ²)	Mean (m)	Variance (m ²)		
A	Imokjeong	55.80	8,967	18,129,700	559	408,886	439,672
	Jangpyeong	105.14	12,817	41,236,000	539	306,087	381,448
	Baegokpo	143.84	14,148	29,079,900	512	213,522	-145,617
	Sanganmi	393.73	29,106	131,710,000	489	214,487	523,077
	Habangjeong	85.56	10,191	18,412,100	501	231,788	101,876
	Bangnim	527.90	30,444	224,621,000	497	220,658	263,399
B	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
	Tanbu	77.51	11,437	36,914,100	509	259,422	511,887
	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
C	Donggok	33.39	5,705	3,937,070	333	78,434	-16,007
	Gono	109.04	12,263	23,267,800	300	83,183	77,682
	Miseong	171.64	18,881	81,167,400	287	84,602	196,219
	Byeongcheon	302.95	22,536	125,258,000	296	96,464	211,066
	Hyoryeong	150.38	12,772	28,499,700	396	187,496	535,943
	Museong	472.58	22,715	111,823,000	329	126,828	174,602

대상구역의 하천망은 하천망생성기법에 대한 오차를 줄이고 하천망에 대한 지형자료의 객관성이 부여 될 수 있도록 1/25,000 수치 지형도의 하천선(Blue line)을 그대로 사용하였다. 또한 각 구역의 수위관측소를 유출구로 하여 구역경계를 분할하였으며 각 구역은 20 m × 20 m의 격자망으로 구성하였다. 분할된 구역에 대해 Arc view의 Hydro extension을 이용하여 DEM 전처리 작업을 수행하였으며 흐름방향도와 흐름길이도를 생성하였다. 생성된 Grid를 연산하여 대상구역의 각 격자 중심에서 유역 출구점까지의 지표면 유하거리와 하천 유하거리를 산정하였다. Table 2는 추출된 지형인자들의 유하길이에 대한 평균, 분산 및 공분산의 값들을 나타낸 것이다.

4.2 배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형 매개변수 산정 결과

특성유속은 Table 1의 각 구역별 지체시간 및 분산의 평균값과, Table 2의 지형인자를 이용해 Eqs. (13)~(17)에 의해 산정되었으며 그 결과는 다음 Table 3과 같다. Table 3에서 산정된 두 쌍의 특성유속값들 중 u_{c2} 와 u_{h2} 는 지표면 특성유속이 음수로 발생하므로 산정값

에서 제외되었다.

하천망의 특성유속값 u_{c1} 은 0.505~2.163 m/s의 범위로 평균 1.287 m/s이며 지표면의 특성유속 u_{h1} 은 0.010~0.031 m/s의 범위로 평균 0.018 m/s로 산정되었다. 추정된 특성유속에 대한 참고자료로 비교적 최근에 발표한 D'odorico and Rigon (2003)의 연구 결과와 비교하였다. 이들은 여러 학자들의 현장조사를 바탕으로 하천망과 지표면의 특성유속범위로 각각 0.5~4.0 m/s, 0.001~0.1 m/s를 제시하였다. 따라서 본 연구에서 추정된 특성유속 값들은 타당한 범위 내에서 추정되었음을 알 수 있었다.

특성유속의 공간적 분포를 살펴보면 지표면 특성유속은 본류에 대해 모든 구역에서 하류로 내려가며 작아지는 경향을 보였다. 하천망의 특성 유속은 평창강과 보청천의 경우 하류로 내려감에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으나, 위천의 경우 이러한 경향이 나타나지 않았다. 이는 특속유속들은 유역규모 이외의 다른 지형인자들과 관계됨을 암시한다. 따라서 이러한 특성유속 값들과 유역의 특성인자들과의 적합한 분포식이 규명된다면 Eqs. (18) and (19)는 미계측 유역에 있어서 유용한 합성단위도 기법이 될 것으로 판단된다.

특성유속과 지형인자들의 값을 이용하여 Eqs. (18) and (19)에 의한 Nash 모형의 매개변수 및 순간단위도의 특성치들은 Table 3의 (6)~(9)란에 수록하였다. Figs. 1~3은 산정된 Nash 모형에 의한 각 유역의 순간 단위도를 나타낸 것이다. 본류는 실선으로 지류는 점선

으로 나타내었다. Fig. 1에서 보여 지듯이 평창강 유역의 6개 소유역 중 4개는 본류에 위치하며 하반정과 백옥포 지점은 지류에 위치하고 있다. 6개 지점에 대해 유역규모가 커짐에 따라, 즉 본류의 경우 상류에서 하류로 감에 따라 첨두유량은 작아지는 경향을 나타내었

Table 3. The Estimation of Characteristic Velocities and Nash Parameters

Watershed	Area (km ²)	u_{c1} (m/s)	u_{h1} (m/s)	u_{c2} (m/s)	u_{h2} (m/s)	Nash				
						n	K (hr)	Peak discharge (mm/hr)	Peak time (hr)	
본류 (Main Stream)	Imokjeong	55.80	0.600	0.031	0.200	-0.048	2.06	4.49	0.080	4.75
	Jangpyeong	105.14	0.891	0.023	0.261	-0.048	2.13	4.95	0.070	5.61
	Baegokpo	143.84	1.042	0.017	0.240	-0.033	2.56	4.72	0.064	7.36
	Sanganmi	393.73	2.152	0.013	0.374	-0.019	1.94	7.44	0.051	6.99
	Habangjeong	85.56	0.707	0.023	0.215	-0.045	2.68	3.75	0.078	6.32
	Bangnim	527.90	2.086	0.010	0.359	-0.022	1.84	9.45	0.042	7.91
지류 (Tributaries)	Sanseong	49.10	0.683	0.018	0.267	-0.057	2.51	2.98	0.103	4.49
	Ipyeong	76.30	0.730	0.013	0.243	-0.070	2.10	4.52	0.078	5.00
	Tanbu	77.51	0.505	0.028	0.258	-0.137	3.06	3.69	0.072	7.60
	Gidae	354.14	0.810	0.011	0.251	-0.029	2.39	6.42	0.050	8.90
	Sangye	485.21	0.979	0.010	0.361	-0.023	2.91	6.41	0.043	12.24
상류 (Upper Stream)	Donggok	33.39	2.042	0.021	0.196	-0.032	1.95	2.69	0.140	2.55
	Gono	109.04	1.673	0.018	0.359	-0.029	2.14	3.09	0.113	3.53
	Miseong	171.64	2.163	0.016	0.526	-0.031	1.98	3.73	0.099	3.66
	Byeongcheon	302.95	1.883	0.016	0.589	-0.037	2.20	3.81	0.089	4.57
	Hyoryeong	150.38	1.187	0.027	0.347	-0.034	2.09	3.36	0.106	3.66
	Museong	472.58	1.675	0.011	0.365	-0.018	1.68	7.31	0.059	4.99

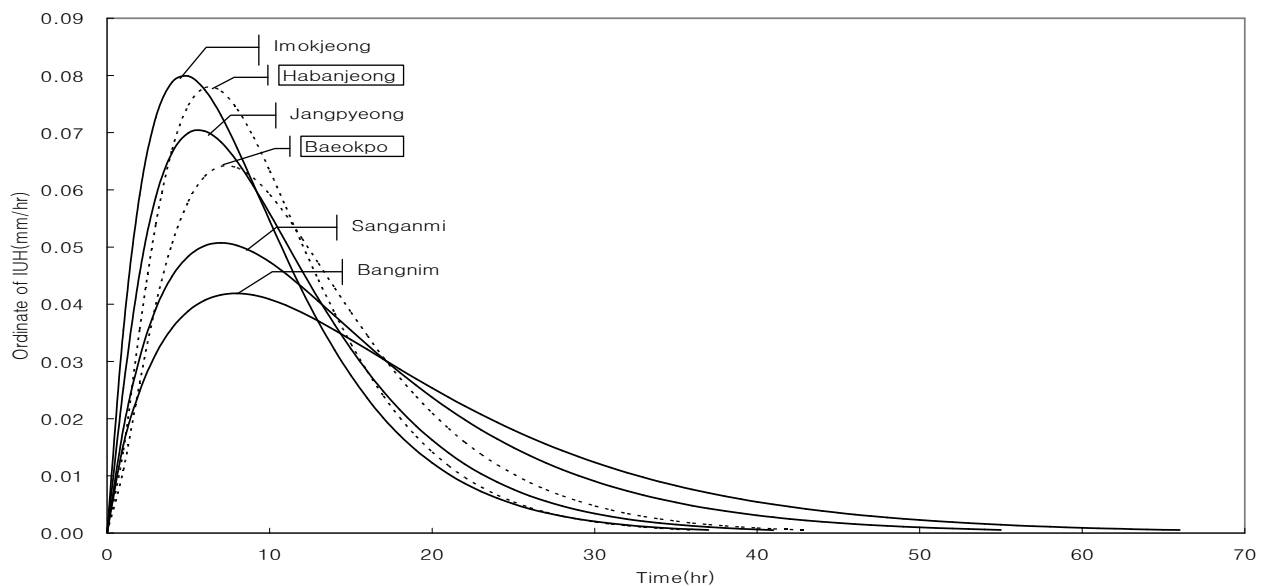


Fig. 1. IUH of Pyeongchang River

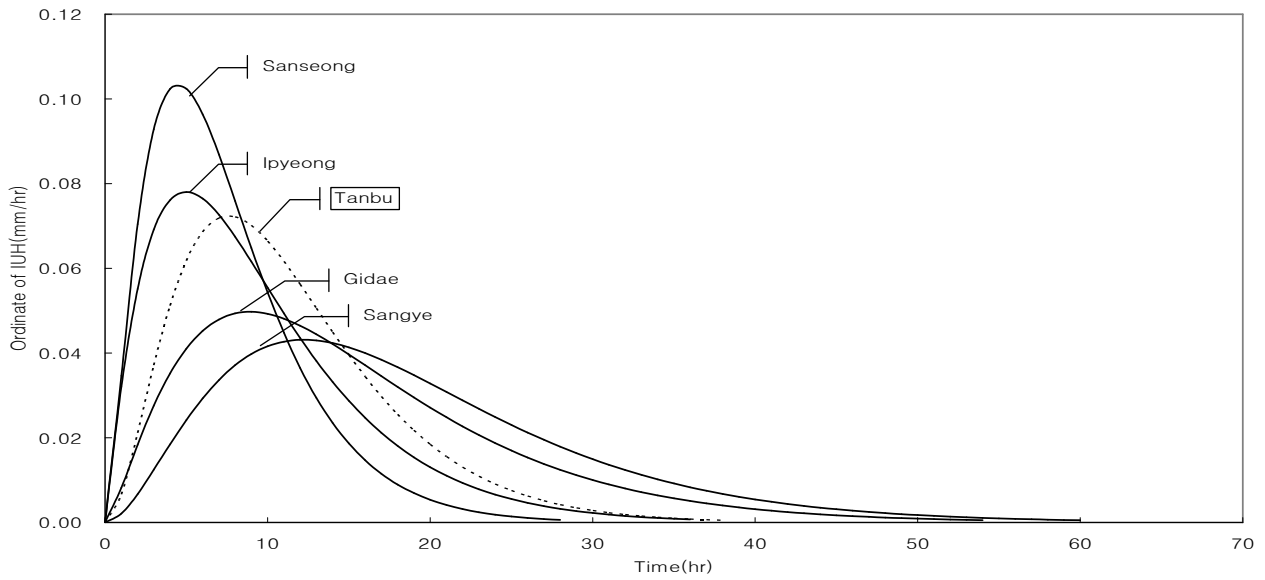


Fig. 2. IUH of Bocheong River

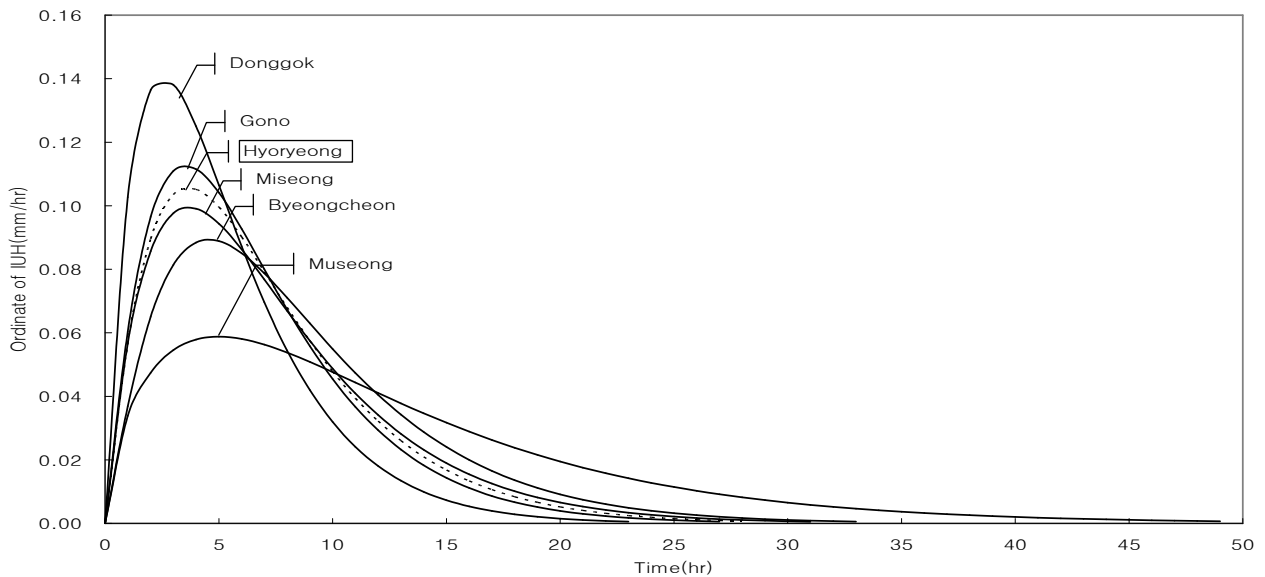


Fig. 3. IUH of Wi River

다. 반면 첨두시간은 본류의 경우 유역규모에 따라 길어지는 경향을 나타내었지만, 지류인 하반장 지점과 백옥포 지점의 경우 유역규모가 큰 장평과 상안미유역 보다 첨두시간이 길게 나타났다. 이는 지표면 특성유속이 서로 비슷한 반면 하천 특성유속의 경우 하반장(0.71 m/s), 백옥포(1.04 m/s)지점이 장평(0.89 m/s), 상안미(2.15 m/s)지점 보다 상대적으로 작기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 즉, 지류의 특성이 반영된 결과라고 할 수 있다. Fig. 2는 보청천 유역의 5개 지점에 대한 순간단위도를 나타낸 것으로 탄부 지점을 제외하고 4개 지점이 본류에 위치하고 있다. 보청천 유역의 경우 모든 소유역에서 유역규모에 따라 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 길어지는 일정한 경향을 나타내었다. Fig. 3은 위천 유역의 순간단위도를 나타낸 것으로 유역규모

가 커짐에 따라 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 길어지는 일관성 있는 유역 응답 특성을 나타내었다.

4.3 모형의 검증

모형의 검증을 위하여 특성유속 산정을 위해 사용된 관측수문사상을 제외한 수문사상을 선정하여 비교하였다. 검증을 위해 선정된 관측수문사상은 Table 4에 수록하였다. 직접유출수문곡선 분리는 4.1절과 동일한 방법을 적용하였으며, 4.2절에서 동정된 Nash 순간단위도로부터 1시간 단위도를 유도하여 관측수문사상과 비교한 결과는 Table 4의 (7)~(10)란과 같다. Figs. 4~6은 평창강 유역의 상안미 지점, 보청천 유역의 산성 지점 및 위천 유역의 미성유역의 관측수문곡선과 본 모형의 결과와 비교한 예를 나타낸 것이다. 계산된 유출수문곡

선과 관측수문곡선의 비교 결과 침투유량은 약 20.45 %, 침투시간은 약 1.65시간의 오차를 보이며 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다. 그러나 보청천 유역의 산계 지점과 위천 유역의 무성지점의 경우 계산된 침투유량

의 오차가 각각 최대 55 %, 46 %로 급격히 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 본 연구 대상유역 면적인 500 km² 이상의 유역에서의 적용은 주의가 요구되며, 이러한 적용성에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

Table 4. The Comparison between Observed Data and Calculated Result

Watershed	Year	Month -Day	Observation		Calculation		Abs. Error of Q_p (%)	Abs. Error of t_p (hr)		
			Q_p (m ³ /s)	t_p (hr)	Q_p (m ³ /s)	t_p (hr)				
남부지방산계	Imokjeong	2002	04-29	17.91	22	25.58	19	42.83 %	3	
		2002	08-31	47.91	13	52.48	15	9.54 %	2	
	Jangpyeong	2002	04-29	40.19	25	49.68	24	23.61 %	1	
		2002	07-22	42.9	20	48.58	21	13.24 %	1	
	Baegokpo	2002	04-29	88.36	19	106.77	21	20.84 %	2	
		2002	08-31	90.11	11	120.86	15	34.12 %	4	
	Sanganmi	2002	04-29	159.56	21	187.45	21	17.48 %	0	
		2002	08-31	269.58	22	267.3	24	0.85 %	2	
	Habangjeong	2002	04-29	47.91	15	53.54	13	11.75 %	2	
		2002	08-31	123.27	10	86.67	13	29.69 %	3	
	Bangnim	2002	04-29	199.09	15	195.91	15	1.60 %	0	
		2002	07-22	165.92	21	186.12	22	12.17 %	1	
	남부산지	Sanseong	1995	08-30	57.17	14	47.71	13	16.55 %	1
			2002	08-31	88.27	13	100.49	13	13.84 %	0
Ipyeong		2001	06-24	18.06	5	21.00	10	16.28 %	5	
		2002	08-31	165.59	15	125.5	16	24.21 %	1	
Tanbu		2001	06-29	10.73	11	8.75	12	18.45 %	1	
		2002	08-31	65.86	12	51.75	10	21.42 %	2	
Gidae		1999	06-23	442.47	13	270.98	16	38.76 %	3	
		2001	06-24	43.72	8	36.52	9	16.47 %	1	
Sangye		2001	06-24	37.61	8	23.04	12	38.74 %	4	
		2001	06-29	75.34	10	33.44	15	55.61 %	5	
남부평지	Donggok	1992	08-24	35.2	13	44.89	14	27.53 %	1	
		1996	08-26	33.26	8	43.54	8	30.91 %	0	
	Gono	1996	08-26	110.18	7	127.47	7	15.69 %	0	
		2000	07-22	88.09	6	105.76	6	20.06 %	0	
	Miseong	1996	08-26	216.77	5	216.58	8	0.09 %	3	
		2000	07-22	174.2	7	188.51	8	8.21 %	1	
	Byeongcheon	1992	08-24	295.99	14	272.16	16	8.05 %	2	
		1998	05-10	190.26	12	165.71	12	12.90 %	0	
	Hyoryeong	1992	08-24	134.59	14	118.67	15	11.83 %	1	
		2000	07-22	218.75	8	205.17	7	6.21 %	1	
	Museong	1992	08-24	454.95	14	318.11	16	30.08 %	2	
		1990	09-23	268.94	5	145.87	6	45.76 %	1	
	Mean								20.45 %	1.65

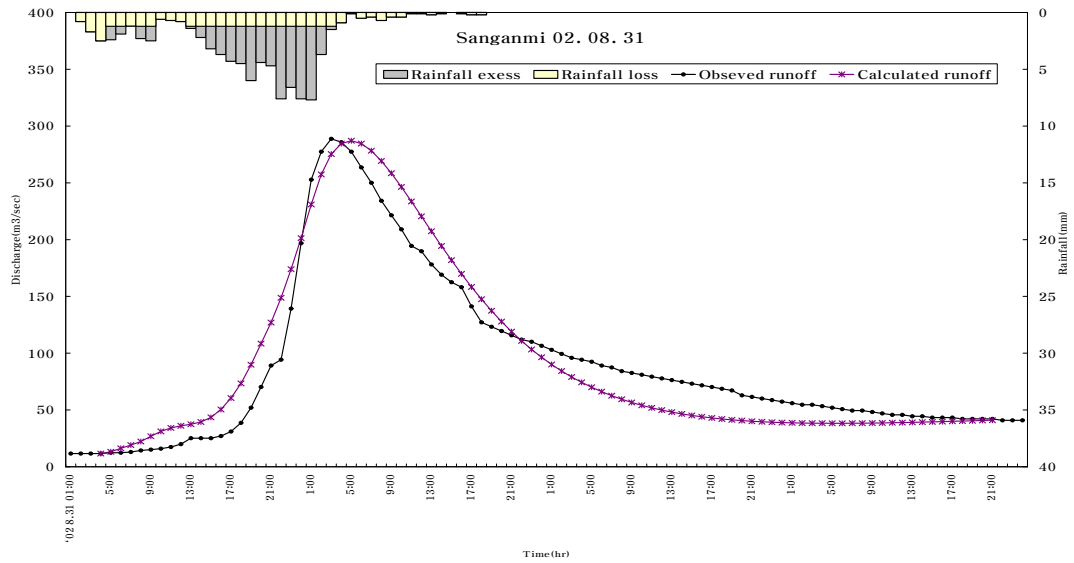


Fig. 4. Comparison Between Observed Data and Calculated Result (Sanganmi)

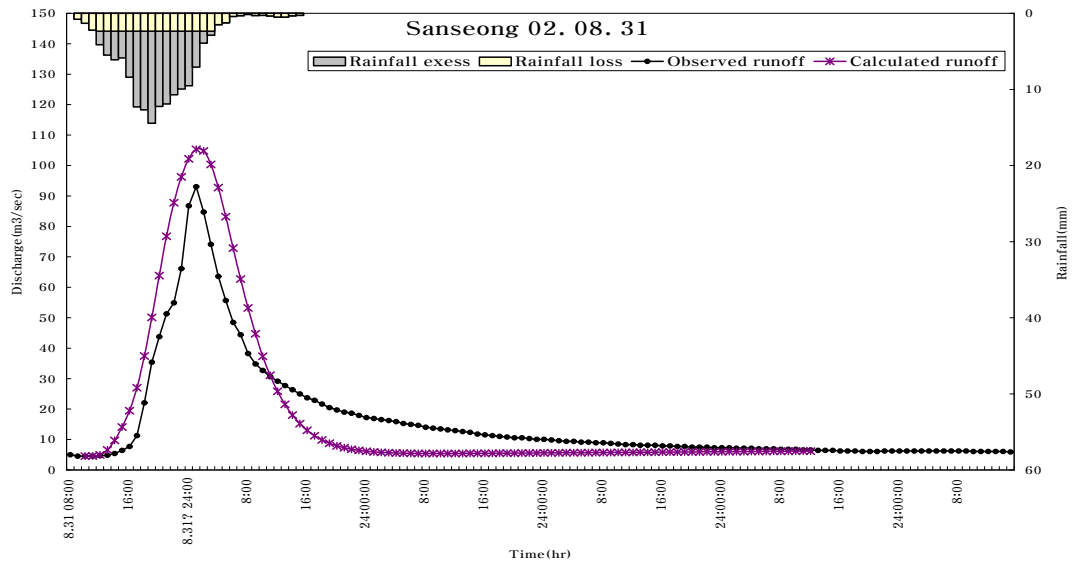


Fig. 5. Comparison Between Observed Data and Calculated Result (Sanseong)

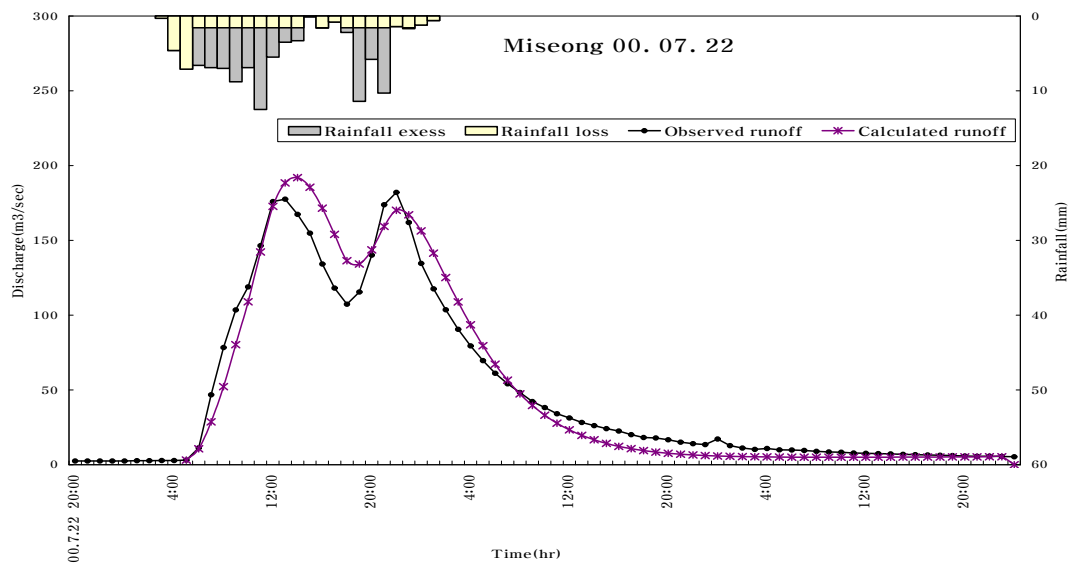


Fig. 6. Comparison Between Observed Data and Calculated Result (Miscong)

4.4 특성유속에 따른 Nash 모형 매개변수의 변동성 분석

Eqs. (18) and (19)에 의해 유도된 Nash 순간단위도의 지체시간에 대한 u_c 와 u_h 의 영향을 분석하기 위하여 평창강 유역의 상안미 지점, 보청천 유역의 산성 지점 및 위천 유역의 미성 지점을 선정하였다. D'odorico and Rigon (2003)가 제안한 특성유속 범위에 대하여 지표면 특성유속은 0.001씩 하천 특성유속은 0.1씩 변동 시키며 Eqs. (8) and (9)에 의한 지체시간과 분산의 변화를 살펴보았다. Figs. 7 and 9는 하천의 특성유속을 고정하고 지표면 특성유속값을 0.001~0.1 m/s의 범위로 변동 시켰을 때의 지체시간과 분산의 변화를 나타낸 것이고, Figs. 8 and 10은 지표면 특성유속을 고

정하고 하천 특성유속을 0.5~4.0 m/s로 변동 시켰을 때의 지체시간과 분산의 변화를 나타낸 것이다. Figs. 7~10에서 보여 지듯이 지체시간과 분산은 하천 특성속도보다는 지표면 특성속도에 민감하게 반응함을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 Di Lazzaro (2009)가 연구한 중소유역의 수문응답에 있어서 지표면 유동의 기여도가 지배적이라는 평가결과와 일치한다. 특히 우리나라의 유역의 특성을 대표 할 수 있는 IHP 시험유역의 17개 유역에 대한 지표면 특성유속은 Table 3과 같이 0.010~0.031 m/s의 범위로 선정되었으며, Figs. 7 and 9에서 보여 지듯이 이 범위에서는 지표면 특성유속의 변화에 따라 지체시간 및 분산이 매우 민감하게 변하고 있음을 알 수 있다. 결론적으로 유역면적 500 km² 이내의 중소규모 유역에서 격자 기반 지형학적 순간단위도의

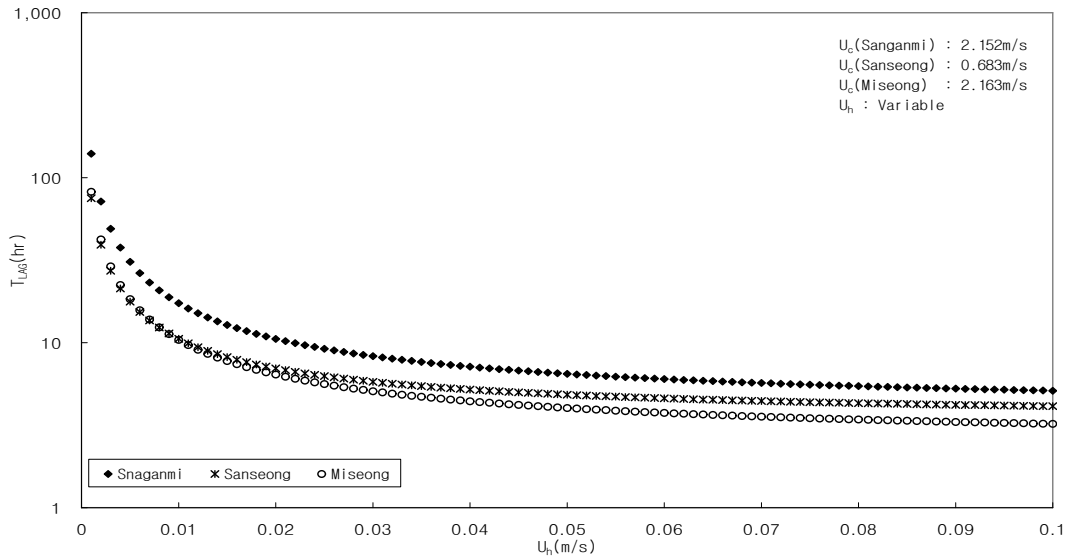


Fig. 7. Variation of Lag Time as Hillslope Characteristic Velocity

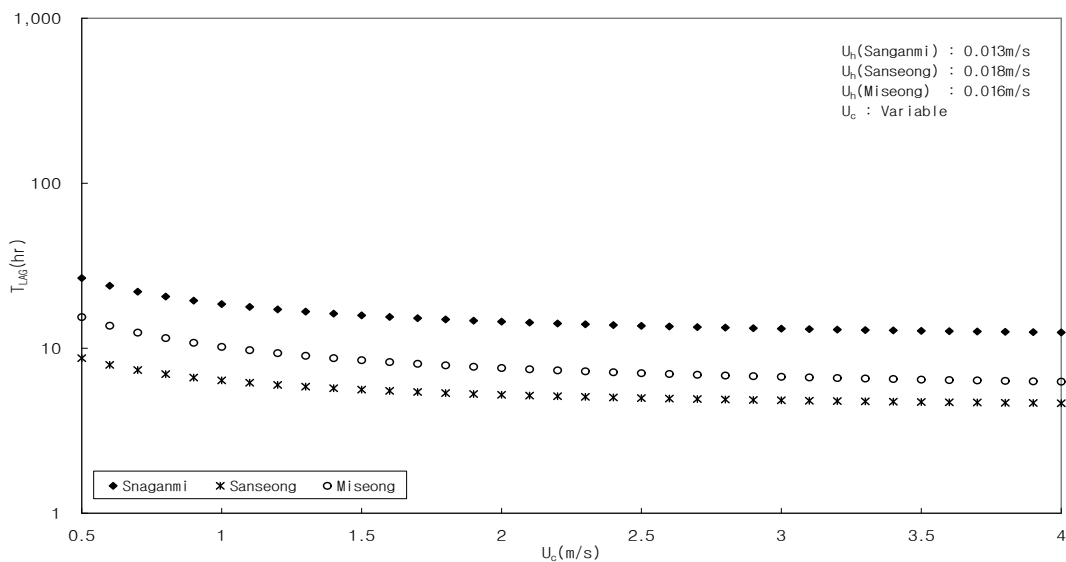


Fig. 8. Variation of Lag Time as Stream Characteristic Velocity

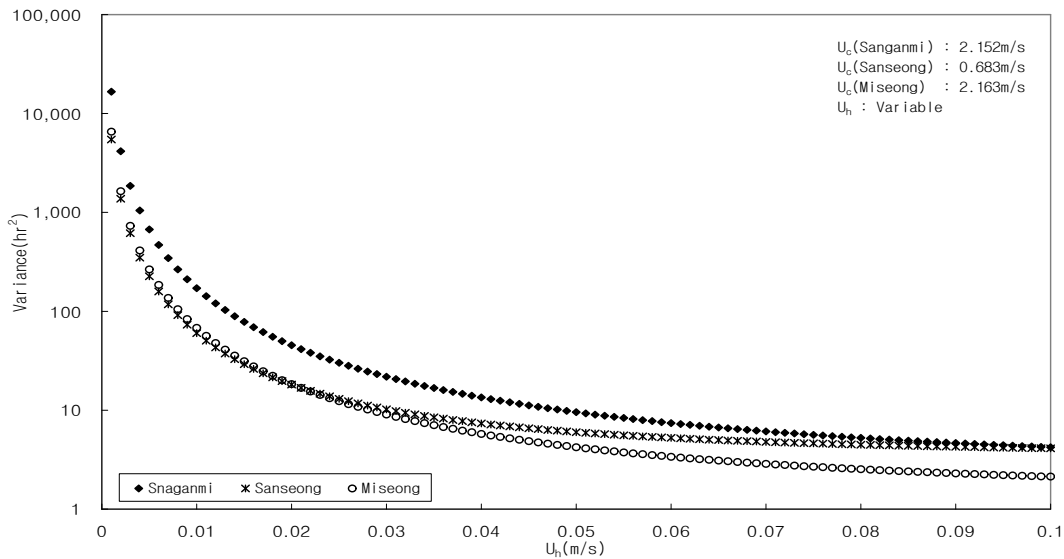


Fig. 9. Variation of The Variation as Hillslope Characteristic Velocity

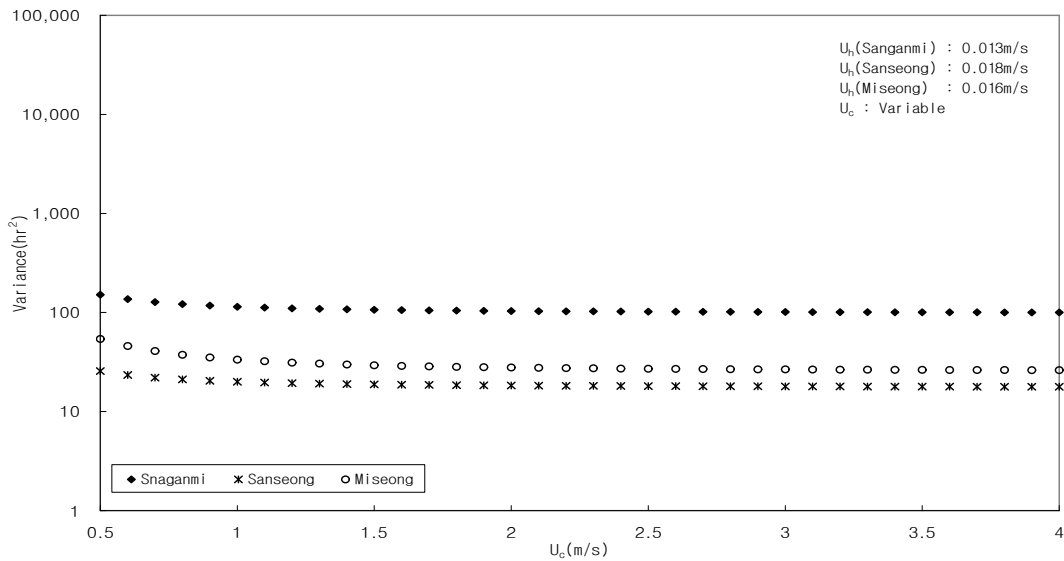


Fig. 10. Variation of The Variation as Stream Characteristic Velocity

적용 시에는 지표면 유동에 대한 고려가 반드시 필요하며(Di Iazzaro, 2009), 격자 기반 지형학적 순간단위도의 개념에 바탕을 두고 개발된 Eqs. (18) and (19)의 적용을 위해서는 지표면 특성 유속의 산정에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 배수경로 이질성에 의한 격자 기반 지형학적 순간단위도로부터 Nash 모형 매개변수를 동정하였으며, 동정된 매개변수에 의한 모형의 적용성을 검증하였다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 동정된 매개변수에 의해 유도된 순간단위도의 형상은 유역규모가 커짐에 따라 침투유량은 작아지

고 침투시간은 길어지는 일관성 있는 유역 응답 특성을 나타내었다.

- 2) 본 연구에서 적용된 모형의 계산 유출수문곡선과 관측수문곡선의 비교 결과 침투유량은 약 20.45%, 침투시간은 약 1.65시간의 오차를 보이며 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다.
- 3) 지표면과 하천의 특성유속에 따른 동정된 매개변수에 의한 순간단위도의 지체시간 및 분산의 변화양상을 살펴본 결과, 지표면 특성유속에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 결론적으로 연구 대상 유역면적의 한계인 500 km² 이내의 중소규모 유역에서 본 모형의 적용 시 지표면 유동에 대한 고려는 반드시 필요하며, 지표면 특성 유속의 산정에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 건설부/건설교통부 (1983-2002). 국제수문개발계획(IHP) 대표유역보고서.
- 김주철, 정관수, 김재한 (2004). “신집수형상디스크립터와 Nash 모형의 지체시간 사이의 상관성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제12호, pp. 1065-1074.
- 성기원 (1997). “수문지형특성 및 시간응답특성의 상사성을 이용한 Nash 모형 해석.” **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제2호, pp. 97-106.
- 조홍제 (1987). “지형학적 수문응답특성에 의한 선형저수지 모델 해석.” **한국수자원학회논문집**, 제20권, 제2호, pp. 117-126.
- 최용준, 김주철, 김재한 (2009). “배수경로 이질성에 의한 순간단위도 형상의 상대적 기여도 평가.” **한국수자원학회논문집**, 제20권, 제11호, pp. 897-909.
- 홍일표, 고재웅 (1999). “하천의 프랙탈 특성을 고려한 지형학적 순간단위도의 개발(I).” **한국수자원학회논문집**, 제32권, 제5호, pp. 565-577.
- Botter, G. and Rinaldo, A. (2003). “Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion.” *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 10, 1286. doi:10.1029/2003WR002154.
- Di Lazzaro, M. (2008). “Correlation between channel and hillslope lengths and its effects on the hydrologic response.” *Journal of Hydrology*, Vol. 362, pp. 260-273.
- Di Lazzaro, M. (2009). “Regional analysis of storm hydrographs in the rescaled width function framework.” *Journal of Hydrology*, 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*, Vol. 39, No. 5, 1113.

doi:10.1029/2002WR001708.

- Dooge J.C.I. (1973). “*Linear theory of hydrologic system*” Tech. Bull. 1468. Agriculture Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Moussa, R. (2003). “On morphometric properties of basin, scale effects and hydrological response.” *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 33-58.
- Nash, J.E. (1957). “The form of the instantaneous unit hydrograph.” *IASH Assemblée Générale de Toronto*, Vol. 3, pp. 114-121.
- Nash, J.E. (1959). “Systematic determination of unit hydrograph parameters.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, No. 1, pp. 111-115.
- Nash, J.E. (1960). “A Unit Hydrograph study with particular reference to British Catchments.” *Proc. Civ. Eng.*, Vol. 17, pp. 249-282.
- Rinaldo, A., Rigon, R. and Marani, M. (1991). “Geomorphological dispersion.” *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 513-525.
- Rinaldo, A., Botter, G., Bertuzzo, E., Uccelli, A., Settin, T. and Marani, M. (2006). “Transport at basin scales: 1. Theoretical framework.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 19-29.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B. (1979). “The geomorphologic structure of hydrologic response.” *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Rosso, R. (1984). “Nash model relation of Horton order ratios.” *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 914-920.
- Singh, V.P. (1988). “*Hydrologic system - Rainfall-runoff modeling Volume 1.*” Prentice hall, Eaglewood cliffs, New Jersey.
- Van der Tak, L.D., and Bras, R.L. (1990). “Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph.” *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2393-2400.

논문번호: 09-106	접수: 2009.09.09
수정일자: 2009.10.19/10.28	심사완료: 2009.10.28