

## 수문학적 접근법에 의한 유역응답내 지표면유동의 기여도 평가

### The assessment of the contribution of overland flow to basin response by means of hydrological approach

김 주 철\* / 윤 여 진\*\* / 김 재 한\*\*\*

Kim, Joo Cheol / Yoon, Yeo Jin / Kim, Jae Han

#### Abstract

The relative contributions of overland-flow and stream-flow to the response process at the basin scale are evaluated in the present study. The moments of GIUH models were applied to the data of the Bocheong watershed in the Geum river basin in Korea in order to discuss the feasibility. The GIUH model derived in this study consists of the stream path and overland region. The characteristic velocities for the flows between two cases mentioned above make a clear distinction as expected and would have more physical meaning than the ones of the model by Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979). The path lengths of overland for each stream order are nearly constant, whereas the case of stream is shown to grow larger according to the basin sizes. As a result, the overall basin response process was founded out to be greatly under the influence of the hydrodynamic behavior of overland, and its behavior is suggested to be further researched for catching the broader meanings.

**keywords** : overland flow, GIUH, moment, characteristic velocity

#### 요 지

본 연구에서는 유역규모의 응답과정에 대한 지표면유동과 하천유동의 상대적 기여도를 평가해 보고자 한다. 이를 위하여 GIUH 모형의 적률을 금강수계 보청천유역의 자료에 적용하였다. 본 연구에서 유도된 GIUH 모형은 하천 및 지표면에 대한 개별적인 배수경로들로 구성된다. 사전에 예상된 바와 같이, 양자의 특성속도는 현저하게 구별될 수 있었다. 이를 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)의 모형에 의한 특성속도와 비교해본 결과 본 연구에서 산정된 특성속도가 보다 물리적인 의미를 내포하고 있음을 알 수 있었다. 또한 지표면유동의 경우 경로길이가 거의 일정한 반면, 하천유동의 경우 유역규모에 따라 경로길이가 길어지는 경향을 볼 수 있었다. 그 결과로서, 지표면의 동수역학적 거동특성이 전반적인 유역의 응답과정에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 이에 대한 보다 폭 넓은 해석을 위하여 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 지표면유동, GIUH, 적률, 특성속도

\* 충남대학교부속 산업기술연구소 연구원

Researcher, Industrial Technology Research Institute, Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea  
(e-mail: kjc@cnu.ac.kr)

\*\* 건양대학교 토목시스템공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil System Engrg., Konyang Univ., Chungnam Nonsan, 320-711, Korea  
(e-mail: yyj0806@konyang.ac.kr)

\*\*\* 충남대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea  
(e-mail: kjh@cnu.ac.kr)

## 1. 서론

자연유역은 호우로 인한 홍수유입량을 지표면(overland)과 하천(stream)의 상호작용을 통하여 배수하는 복합적 변환계이다. 따라서 하천망(stream network)의 형상에 대한 정량적 묘사와 이를 중심으로 한 수문학적 응답특성에 대한 연구가 Horton의 배수구성법칙을 기원으로 하여 현재까지 여러 학자들에 의하여 지속적으로 수행되어 오고 있다. 유역의 배수구조와 수문학적 응답의 체계적인 결합에 관한 연구는 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)에 의하여 최초로 시도되었다. 이들은 선형수문계의 핵함수인 순간단위도를 하천망의 형태적 특성과 직접 연결하여 GIUH 이론을 개발하였다. 통계 물리학적 접근법을 기초로 연속시간형 semi-Markov 과정을 공식모형으로 하였으며, 모형의 해를 유도하기 위하여 물입자의 차수별 유하시간을 지수-분포형 확률 변수로 가정하였다. Gupta et al.(1980)은 배수경로의 개념을 이용하여 GIUH 이론을 일반화하였다. 특히 차수별 배수밀도(drainage density)에 대한 고려로부터 지표면의 평균유하거리를 평가하여 GIUH 모형의 구조내에 지표면 유동과정이 포함되도록 하였다. 이후 이를 바탕으로 하여 각종 GIUH 모형에 대한 후속연구결과들이 발표되었다. Franchini and O'Connell(1996)은 이들의 배수구조를 묘사하는 방법에 따라 Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 GIUH와 폭함수(width-function) GIUH의 범주로 구분한 바 있다.

Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 GIUH 모형들은 상태별 유하시간의 확률밀도함수에 대한 접근법에 따라 1) 가정된 특정 분포형을 이용하는 모형(Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979; Gupta et al., 1980; Cheng, 1982; van der Tak and Bras, 1990; Jin, 1992)과 2) 동수역학적 고려로부터 유도된 분포형에 의한 모형(Kirshen and Bras, 1983; Rinaldo et al., 1991)으로 나누어 볼 수 있다. 여기서 주목할 만한 성과로서 상태별 유하시간의 확률밀도함수를 Gamma-분포형 확률밀도함수로 가정한 van der Tak and Bras(1990)의 연구결과를 들 수 있다. 이들은 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 특성속도가 갖는 모순을 지적하고, 지표면과 하천에 대하여 특성속도를 개별적으로 고려한 2특성속도 Gamma-GIUH를 제안한 바 있는데, 특히 순간단위도의 형상은 하천의 특성속도보다 지표면의 특성속도에 훨씬 더 민감하게 반응할 수 있음을 언급하였다. 비교적 최근의 연구 성과로서 White et al.(2004)은 확산유추에 의한 Rinaldo et al.(1991)의 모형을 Illinois의 8개 유역에 적용하여 유역의 규모에 따른 GIUH의 분산

효과가 갖는 변동성을 해석하고자 하였고, Lee and Chang(2005)은 GIUH 모형의 상태별 유하시간을 운동과 근사해법으로부터 산정하고자 하였다.

전술한 연구동향을 바탕으로 하여 본 연구에서는 GIUH 모형의 동적매개변수인 특성속도를 수문학적 접근법을 통하여 지표면과 하천에 대하여 개별적으로 고려하고, 이에 따른 유역의 수문학적 응답에 대한 양자의 상대적 기여도를 평가해 보고자 한다. 이를 위하여 Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 GIUH 모형의 일반식이 갖는 적률특성을 해석적으로 고찰하고 이를 통하여 특성속도를 추정해보았다. 이러한 시도의 주된 의도는, GIUH 이론의 합리적 적용을 위하여 유역규모(basin scale)의 동적응답특성을 결정하고자 하는 것이다. 다시 말해서, GIUH 모형의 동적규모매개변수인 특성속도의 중요성을 다소 비판적인 어조로 강조한 Shamseldin and Nash(1998)의 견해와 본 연구의 일치성을 입증코자한 것이다. 본 연구와 유사한 배경을 갖는 연구사례로서 김주철 등(2005)은 Moussa(2003)가 제시한 신집수형상디스크립터와 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)의 모형을 결합하여 대표순간단위도를 추정한 바 있다. 본 연구에서는 이들이 제시한 금강수계 보청천유역의 대표순간단위도에 대한 산정결과를 기반으로 전반적인 유역의 응답특성에 대한 지표면 유동의 기여도에 대한 분석을 수행하였다. GIUH 모형의 상태별 유하시간의 확률밀도함수로서 지수분포 확률밀도함수를 적용하였고, DEM을 이용하여 하천망의 배수구조에 대한 특성 분석을 수행하였다. 다시 말해서, 앞으로 DEM을 이용하여 이 특성속도들을 더욱 더 세분화함으로써 지금까지 지표수(overland flow)와 하천수(channel flow)의 저항계수들의 추정의 어려움을 용이하게 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 GIUH 모형의 구조

Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 GIUH 모형의 일반식은 Eq. (1)과 같다.

$$h(t) = \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) [ f_{T_h}(t) * f_{T_c}(t) ] \quad (1)$$

여기서  $\Gamma$ 는 물입자의 배수경로  $\gamma$ 의 모집단,  $P(\gamma)$ 는 무작위 추출한 물입자가  $\gamma$ 를 통하여 배수될 확률 그리고 \*는 convolution 연산자이다.  $f_{T_h}(t)$ ,  $f_{T_c}(t)$ 는 각각 물입자의 지표면과 하천의 유하시간  $T_h$ ,  $T_c$ 에 대한 확

률밀도함수로서  $[\cdot]$ 는  $\gamma$ 를 통하여 배수되는 물입자의 총유하시간에 대한 확률밀도함수를 의미한다. Gupta et al.(1980)은  $P(\gamma)$ 를 Eq. (2)와 같이 정의하였다.

$$P(\gamma) = \theta_i(0) \times p_{i_{h_c}} \times p_{ij} \times \dots \times p_{k\Omega} \quad (2)$$

여기서  $\theta_i(0)$ 는 초기상태확률이고  $p_{ij}$ 는 상태전이확률이다.  $p_{i_{h_c}}$ 는  $i$ 차 지표면 상태에서부터  $i$ 차 하천 상태로의 전이확률로서 항상 1이다. Rodríguez-Iturbe and Valdes (1979)와 Gupta et al.(1980)은  $\theta_i(0)$ ,  $p_{ij}$ 에 대한 해석적 관계식을 제시한 바 있다. 하지만 이들은 Eq. (3)을 이용할 경우 지형도나 혹은 DEM으로부터 비교적 정확하게 추정할 수 있음이 잘 알려져 있다(김주철 등, 2005).

$$\theta_i(0) = \frac{A_i^*}{A}; p_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (3)$$

여기서  $A_i^*$ 는  $i$ 차 하천으로 직접 배수되는 유역면적,  $A$ 는 총 유역면적,  $N_{ij}$ 는  $j$ 차 하천과 합류하는  $i$ 차 하천의 개수 그리고  $N_i$ 는  $i$ 차 하천의 총 개수이다.

## 2.2 유하시간 확률밀도함수에 의한 수송의 공식화

GIUH 모형의 개발과정에서 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)는 상태별 유하시간의 확률밀도함수로서 지수분포 확률밀도함수를 가정한 바 있다. 이를 Eq. (1)과 같은 모형의 구조에 적용할 경우  $f_{T_h}(t)$ ,  $f_{T_c}(t)$ 는 각각 Eqs. (4), (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$f_{T_h}(t) = \mu_i e^{-\mu_i t} \quad (4)$$

$$f_{T_c}(t) = f_i(t) * f_j(t) * \dots * f_\Omega(t) \quad (5)$$

여기서  $f_i(t) (= \lambda_i e^{-\lambda_i t})$ 는 물입자의  $i$ 차 하천유하시간에 대한 확률밀도함수이다.  $\mu_i$ ,  $\lambda_i$ 는 각각 물입자의  $i$ 차  $T_h$ ,  $T_c$ 의 역수로서 Eqs. (6), (7)과 같이 정의된다. 그리고 아래첨자  $j, \dots, \Omega$ 는  $i$ 와 같은 뜻을 내포한다.

$$\frac{1}{\mu_i} = \frac{\overline{L_{hi}}}{V_h} = \frac{1}{V_h} \frac{\theta_i(0)A}{2N_i \overline{L_{ci}}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{\overline{L_{ci}}}{V_c} \quad (7)$$

여기서  $\overline{L_{hi}}$ ,  $\overline{L_{ci}}$ 는 각각  $i$ 차 지표면과 하천의 평균유하거리 그리고  $V_h$ ,  $V_c$ 는 각각 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 지표면과 하천의 특성속도이다. 지수분포 확률밀도함수는 선형수문계의 개념적 성분인 선형저수지의 단위충격 응답함수와 일치하는 형태(Nash, 1957; Dooge, 1973)로서 이로부터 Eq. (1)은 Eq. (8)과 같이 직렬 및 병렬로 연결된 부등선형저수지군에 대한 추적식과 유사하게 된다(Chutha and Dooge, 1990; Franchini and O'Connell, 1996).

$$h(t) = \sum_{\gamma \in T} P(\gamma) \sum_{j=1}^k C_{j,k} \exp[-\lambda_{x_j} t] \quad (8)$$

여기서  $C_{j,k}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Gupta et al., 1980).

$$C_{j,k} = \frac{\lambda_{x_1} \dots \lambda_{x_k}}{(\lambda_{x_1} - \lambda_{x_j}) \dots (\lambda_{x_{j-1}} - \lambda_{x_j})(\lambda_{x_{j+1}} - \lambda_{x_j}) \dots (\lambda_{x_k} - \lambda_{x_j})} \quad (9)$$

Eqs. (8), (9)는 표기의 간편화를 위하여 Gupta et al.(1980)의 방법을 따른 것으로, 이 경우  $\gamma$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = [x_1, \dots, x_k] \quad (10)$$

$$x_1, \dots, x_k \in \{h_1, \dots, h_\Omega, c_1, \dots, c_\Omega\} \quad (11)$$

여기서  $h_i$ ,  $c_i$ 는 각각  $i$ 차 지표면과 하천의 상태이다.  $\gamma$ 를 구성하는 첫 번째 상태  $x_1$ 는 항상  $h_i$ 이므로 Eq. (9)의  $\lambda_{x_1}$ 는 Eq. (6)에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_{x_1} = \mu_i \quad (12)$$

만약 Eqs. (6), (7)의  $V_h$ 와  $V_c$ 를 합동으로 가정할 경우  $T_h$ 는  $T_c$ 에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작아질 수 있음을 예상할 수 있다. 이러한 가정 하에서 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)는 Eq. (1)에서  $f_{T_h}(t)$ 를 소거하고 지수분포 확률밀도함수의 특성을 고려하여 최고차수 하천을 두 개의 동등한 선형저수지로 나누어 Eq. (8)을 재구성한 바 있다. 하지만 서론에서 밝힌 바와 같이, van der Tak and Bras(1990)는  $V_h$ 와  $V_c$  사이에는 무시할 수 없을 만큼의 규모의 차가

존재함을 주장하고  $V_c$ 보다  $V_h$ 가 GIUH의 형상에 훨씬 더 민감하게 영향을 줄 수 있음을 제시하였다. 따라서 보다 정확한 유역의 수문학적 응답을 추정하기 위해서는 지표면 유동과 하천 유동에 대하여 각기 개별적인 고려가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이와 유사한 시도를 여러 학자들의 후속 연구결과에서도 찾아볼 수 있다(Rinaldo et al., 1995; Robinson et al., 1995; D'Odorico and Rigon, 2003). 이에 본 연구에서는 Eq. (8)이 갖는 적률구조의 특성을 분석하여 유역 응답에 대한 지표면 유동과 하천 유동의 상대적 기여도를 평가해보고자 한다.

### 2.3 GIUH 모형의 적률

Nash(1957, 1959)는 선형수문계의 매개변수 동정에 적률법을 제안한 바 있다(김재한, 2005). 이에 따라 Eq. (8)의 적률은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$E[t^n] = (-1)^n \frac{d^n \hat{h}(s)}{ds^n} \Big|_{s=0} \quad (13)$$

여기서  $\hat{h}(s)$ 는 Eq. (8)의 모함수로서 원함수에 bilateral Laplace 변환을 취하면 얻을 수 있다(Dooge, 1973). GIUH 모형의 기본적 구성요소인 차수별 상태와 경로에 대한 1차, 2차 적률 그리고 분산은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $V$ 는 상태와 경로전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 특성속도이다.

Table 1의 결과를 하천망전반에 걸쳐 적용할 경우 1차 적률과 분산은 다음과 같이 표현되어진다.

$$E[T_c] = \frac{1}{V_c} E[L_c(\gamma)] \quad (14)$$

$$Var[T_c] = \frac{1}{V_c^2} \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \sum_{i \in \gamma} \overline{L_i^2} + \frac{1}{V_c^2} Var[L_c(\gamma)] \quad (15)$$

여기서  $L_c(\gamma)$ 는  $\gamma$ 의 하천 배수경로의 길이,  $E[L_c(\gamma)]$ 는  $L_c(\gamma)$ 의 평균 그리고  $Var[L_c(\gamma)]$ 는  $L_c(\gamma)$ 의 분산이다. 선형수문계의 정의에 따라 Eqs. (14), (15)의 결과를 지표면까지 확장할 경우 Eq. (8)의 1차 적률과 분산을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$E[t] = \frac{1}{V_h} E[L_h(\gamma)] + \frac{1}{V_c} E[L_c(\gamma)] \quad (16)$$

$$Var[t] = \frac{1}{V_h^2} \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \sum_{i \in \gamma} \overline{L_{hi}^2} + \frac{1}{V_h^2} Var[L_h(\gamma)] + \frac{1}{V_c^2} \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \sum_{i \in \gamma} \overline{L_{ci}^2} + \frac{1}{V_c^2} Var[L_c(\gamma)] \quad (17)$$

여기서  $E[t]$ ,  $Var[t]$ 는 각각 순간단위도의 1차 적률(지체시간)과 분산,  $L_h(\gamma)$ 는  $\gamma$ 의 지표면 배수경로의 길이,  $E[L_h(\gamma)]$ 는  $L_h(\gamma)$ 의 평균 그리고  $Var[L_h(\gamma)]$ 는  $L_h(\gamma)$ 의 분산이다. 또한 상기한 과정을 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)의 모형(이하, RV-GIUH)에 적용할 경우, 이의  $E[t]$ ,  $Var[t]$ 를 Eqs. (18), (19)와 같이 산정할 수 있다.

$$E[t] = \frac{1}{V} E[L(\gamma)] \quad (18)$$

$$Var[t] = \frac{1}{V^2} \left\{ \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \sum_{i \in \gamma} \overline{L_i^2} - \frac{L_\Omega^2}{2} \right\} + \frac{1}{V^2} Var[L(\gamma)] \quad (19)$$

여기서  $V$ ,  $L_\Omega$ 는 각각 유역전반에 걸쳐 일정하게 가정되는 특성속도와 최고차수 하천길이이다.

Table 1. Moments of  $i_{th}$  order state and  $\gamma_{th}$  path

	$i_{th}$ order state	$\gamma_{th}$ path
$E[t]$	$\overline{L_i} / V$	$\left\{ \sum_{i \in \gamma} \overline{L_i} \right\} / V$
$E[t^2]$	$2\overline{L_i^2} / V^2$	$2 \left\{ \sum_{i \in \gamma} \overline{L_i^2} + \sum_{i \neq j \in \gamma} \overline{L_i L_j} \right\} / V^2$
$Var[t]$	$\overline{L_i^2} / V^2$	$\left\{ \sum_{i \in \gamma} \overline{L_i^2} \right\} / V^2$

### 3. 지표면 유동의 기여도를 고려한 동적매개변수의 추정

Eq. (1) 혹은 (8)은 지형도나 DEM만으로는 추정이 불가능한 두 개의 동적매개변수  $V_h$ ,  $V_c$ 를 포함한다. 적률법(Nash, 1957, 1959; Dooge, 1973; 김재한, 2005)에 따라 Eqs. (16), (17)을 연립할 경우 이들에 대한 해석적인 관계를 수립할 수 있다. 그러나 이는 2차 방정식의 형태를 이루어  $E[t]$ ,  $Var[t]$ 의 조건에 따라 허근을 가질 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 어려움을 피하기 위하여 두 매개변수를 시행착오법을 적용하여 추정한다. 여기서 만약  $r = V_c/V_h$ 로 정의할 경우 Eq. (16)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[t] = \frac{1}{V_c} \{rE[L_h(\gamma)] + E[L_c(\gamma)]\} \quad (20)$$

호우사상 자료로부터 비교적 신뢰성 있는 추정이 가능한 Eq. (20)의 좌변이 주어질 경우, 유역응답에 대한 하천과 지표면 유동의 상대적 기여도를 정의할 수 있는  $T_h$ 와  $T_c$  사이의 관계는 Eq. (21)과 같이  $r$ 에 종속적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E[T_h]}{E[T_c]} = r \frac{E[L_h(\gamma)]}{E[L_c(\gamma)]} \quad (21)$$

여기서  $E[T_h]$ ,  $E[T_c]$ 는 각각 지표면과 하천의 평균유하시간이다. 이로부터 Eqs. (20), (21)을 고려하여  $V_h$ ,  $V_c$ 에 대한 추정을 수행하기 위해서는, 우선 자연유역에서 발생 가능한  $r$ 의 범위에 대한 사전 조사가 필요함을 알 수 있다. 국내유역의 경우  $V_c$ 는 유량측정 성과로부터 참조가 가능하지만  $V_h$ 에 대한 측정성과는 거의 찾아볼 수 없었다. 비교적 최근 발표된 해외 연구사례들로 D'Odorico and Rigon(2003)은 여러 학자들의 현장조사 결과를 바탕으로  $V_h$ ,  $V_c$ 의 범위를 각각 0.00 1~0.1m/sec, 0.5~4m/sec로 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이들의 결과를 바탕으로  $r$ 의 범위를 5~4,000으로 가정하였다. 가정된 범위내의 두 매개변수  $V_h$ ,  $V_c$ 는 Eq. (17)의 관계를 만족하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Eq. (22)의 관계를 적용하였다.

$$\min_r Z = \{\widehat{Var}[t] - Var[t]\}^2 \quad (22)$$

여기서  $\widehat{Var}[t]$ ,  $Var[t]$ 는 각각 Eq. (17)에 의한 분산 계산치와 관측 자료에 의한 분산이다.

## 4. 적용사례

### 4.1 유역의 배수경로 분석

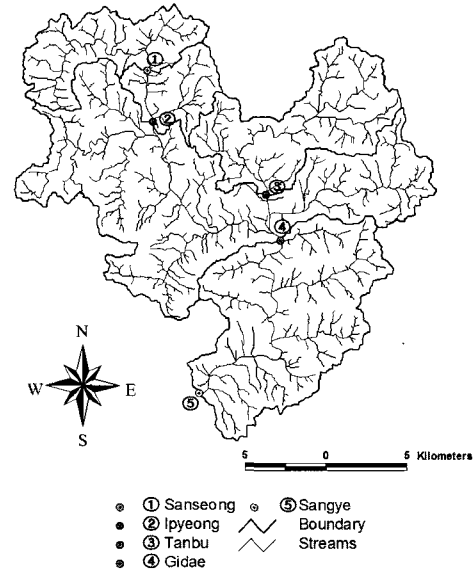


Fig. 1. Drainage map of Bocheong watershed

본 연구의 모형검증 대상유역으로 금강수계의 보청천유역을 선정하였고 해당 유역내 위치한 수위표 지점을 출구로 하는 총 5개 소유역에 대하여 분석을 수행하였다. 유역의 배수경로는 김주철 등(2005)의 연구결과를 기초로 하여 분석하였다. Fig. 1은 보청천유역의 배수유역도이다.

Table 2, 3은 각각 Strahler의 차수분류법에 의한 지표면과 하천의 배수경로에 대한 특성분석결과이다. 여기서 흥미로운 점은 Table 2, 3의 4란에 각각 수록된  $E[L_h(\gamma)]$ ,  $E[L_c(\gamma)]$ 의 산정결과로서 지표면 배수경로의 경우 5개 소유역이 거의 모두 일정한 값을 보이는 반면, 하천 배수경로의 경우 하류 방향으로 진행함에 따라 즉 유역규모의 증가와 함께 점점 길어지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로부터 동일유역의 경우 지표면 유하거리는 유역전반에 걸쳐 일정하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Table 2, 3의 마지막 란에 각각 수록된 변동계수  $C_v[L_h(\gamma)]$ ,  $C_v[L_c(\gamma)]$ 의 산정결과로부터 대상유역내 배수경로들이 비교적 동질적 특성을 가짐을 알 수 있다. 본 연구의 대상유역인 보청천유역은 유역 내 고도 차가 큰 ( $EL$ . 100~1,039m; DEM 분석결과) 산지유역으로서,

Table 2. Characteristics of overland drainage paths

	$L_h(\gamma)_{\min}$ (km)	$L_h(\gamma)_{\max}$ (km)	$E[L_h(\gamma)]$ (km)	$Var[L_h(\gamma)]$ (km <sup>2</sup> )	$\sum P(\gamma) \sum \overline{L_{hi}^2}$ (km <sup>2</sup> )	$C_v[L_h(\gamma)]$
Sanseong	0.263	0.427	0.365	0.005	0.139	0.203
Ipyeong	0.254	0.433	0.369	0.006	0.142	0.215
Tanbu	0.255	0.451	0.388	0.006	0.156	0.198
Gidae	0.255	0.455	0.378	0.006	0.145	0.206
Sangye	0.262	0.434	0.375	0.005	0.146	0.196

Table 3. Characteristics of stream drainage paths

	$L_c(\gamma)_{\min}$ (km)	$L_c(\gamma)_{\max}$ (km)	$E[L_c(\gamma)]$ (km)	$Var[L_c(\gamma)]$ (km <sup>2</sup> )	$\sum P(\gamma) \sum \overline{L_{ci}^2}$ (km <sup>2</sup> )	$C_v[L_c(\gamma)]$
Sanseong	9.371	13.231	12.005	1.847	92.002	0.113
Ipyeong	13.319	17.510	16.049	2.140	182.068	0.091
Tanbu	13.208	19.455	17.161	5.591	188.690	0.138
Gidae	0.691	23.508	19.686	20.729	150.510	0.231
Sangye	19.767	41.380	34.083	48.289	492.232	0.204

비교적 단순한 구조의 하천망을 형성하고 있음을 나타낸다. 이는 White et al.(2004)이 수행한 해발고도의 범위가  $EL$ . 130~350m로 비교적 평탄한 Illinois 유역들(유역면적 897~26,327km<sup>2</sup>)에 대한 연구결과와 좋은 비교가 될 것으로 보인다.

4.2 2특성속도의 추정

Table 4는 김주철 등(2005)이 RV-GIUH를 이용하여 제시한 보청천유역내 5개 수위표 지점의 대표순간단위도에 대한 특성 분석결과이다. 3란의  $Var[t]$ 는 Eq. (19)를 이용하여 본 연구에서 산정한 결과이고 5, 6란은

대표순간단위도의 첨두  $q_p$ 와 첨두시간  $t_p$ 이다.

Eq. (8)의 2특성속도 GIUH(이하, 2V-GIUH)의 동적 매개변수를 Table 4의 2, 3란의 결과를 이용하여 산정하였다.  $r$ 을 5~4,000의 범위 내에서 0.001씩 증가시켜 각 사례별  $V_h$ ,  $V_c$ 를 Eq. (20)을 이용하여 추정하였고, 이를 Eq. (17)에 적용하여 사례별 분산을 산정하였다. 이중 Eq. (22)를 만족하는 사례를 조사하여 해당 소유역별 매개변수로 하였다. 이상의 과정에 따른 소유역별 매개변수와 2V-GIUH의 특성에 대한 산정결과는 Table 5와 같다.

Table 4. The characteristics of representative RV-GIUHs of Bocheong watershed

	$E[t](hr)$	$Var[t](hr^2)$	$V(m/sec)$	$q_p(mm/hr)$	$t_p(hr)$
Sanseong	8.737	26.452	0.382	0.093	5.803
Ipyeong	9.975	36.896	0.447	0.081	6.286
Tanbu	9.898	35.614	0.482	0.080	6.365
Gidae	16.464	119.606	0.332	0.046	9.380
Sangye	17.992	96.182	0.526	0.045	13.067

Table 5. The characteristics of 2V-GIUHs of Bocheong watershed

	$r$	$V_h$ (m/sec)	$V_c$ (m/sec)	$\frac{E[T_h]}{E[T_c]}$	$\widehat{Var}[t]$ (hr <sup>2</sup> )	$q_p$ (mm/hr)	$t_p$ (hr)
Sanseong	19.813	0.031	0.612	0.602	31.020	0.093	5.103
Ipyeong	28.632	0.026	0.741	0.658	42.920	0.080	5.519
Tanbu	27.108	0.029	0.777	0.613	40.068	0.080	5.821
Gidae	74.628	0.011	0.808	1.433	119.606	0.053	9.329
Sangye	39.402	0.019	0.754	0.434	105.087	0.046	12.413

우선 주목되는 결과는 Table 5의 6란에 수록된 2V-GIUH의 분산  $\widehat{Var}[t]$ 에 대한 산정결과로서 기대 소유역을 제외한 나머지 4개 소유역에서 모두 RV-GIUH에 비하여 다소 크게 산정되고 있음을 알 수 있다. 이는 Table 4의 2, 3란에 수록된  $E[t]$ ,  $Var[t]$ 의 특성에 종속적인 결과로서 호우사상 자료에 포함된 측정오차와 유효우량산정 및 기저유출분리 과정에서 발생한 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 추후 보다 정교한 방법에 의한 유효우량추상도 및 직접유출수문곡선 작성에 관한 연구가 후속되어야 할 것으로 보인다.

흥미로운 점은 Table 5의 2, 5란에 수록된  $r$ ,  $E[T_h]/E[T_c]$ 의 산정결과로서 유역규모의 응답과정에 있어 지표면 유동의 기여도는 결코 무시할 수 없을 것으로 판단된다. 이는 3, 4란에 수록된  $V_h$ 와  $V_c$  사이의 현저한 규모의 차로부터 역시 확인할 수 있다. 주지할 사항은 지표면 유동의 기여도가 유역규모와는 큰 상관성을 갖지 않는 것으로, 유역의 유출초기 조건 즉, 선행강수조건이나 토양함수조건 등에 매우 종속적인 복합적인 특성을 가짐이 예상된다. 따라서 보다 정확한 지표면 유동의 기여도를 평가하기 위해서 앞으로 운동과 근사해법(Lee and Chang, 2005)이나 확산유추(Rinaldo et al, 1991)를 이용한 동수역학적 접근법에 기초하여 이에 대한 고려가 수행되어야 할 것으로 보인다.

또한 Table 4, 5의 4란에 각각 수록된  $V$ ,  $V_c$ 의 산정 결과 역시 주목된다. 양자는 모두 하천유속의 개념을 갖는 동적매개변수로서, 동일 소유역에 대하여 전자가 훨씬 작게 평가되고 있음을 볼 수 있다. 또한 대부분의

소유역에서 전술한 하천유속 범위(0.5~4m/sec)의 하한에도 못 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 RV-GIUH의 특성속도  $V$ 는 물리적인 개념을 갖기 보다는 매개변수의 적합(fitting) 과정에 따른 결과인 것으로 사료된다. 하지만 2V-GIUH의 경우, 모든 소유역에서 전술한  $V_h$ ,  $V_c$ 의 범위를 만족하여 보다 물리적인 의미를 내포하고 있는 것으로 판단된다.

### 4.3 GIUH의 산정

Figs. 2~6은 소유역별 2V-GIUH에 대한 산정결과를 김주철 등(2005)의 RV-GIUH에 의한 결과와 함께 작도한 것으로 대부분의 소유역에서 양자가 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 Table 5의 7, 8란에 수록된  $q_p$ ,  $t_p$ 의 산정결과에서도 확인할 수 있듯이 하류방향으로 진행함에 따라 첨두는 작아지고 첨두시간은 길어지는 일관성 있는 응답특성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 다만 Fig. 5에 수록된 기대 소유역에 대한  $q_p$ 의 경우 2V-GIUH가 RV-GIUH보다 다소 크게 산정되고 있음을 볼 수 있는데, 이는 해당 유역의 배수구조에 기인하는 것으로 판단된다. 기대 소유역은 산계 소유역과 같은 6차 유역이다. 하지만 최고차수 하천인 6차 하천의 길이(Table 3.  $L_c(\gamma)_{\min}$  참조)가 0.691km(산계 소유역, 19.767km)에 불과해 Fig. 1에서도 볼 수 있듯이 전반적인 하천의 흐름 방향에 비하여 집수평면의 형상이 다소 작게 신장되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 이로부터 타유역과는 구별되는 배수경로의 이질성이 발생하여  $q_p$ 의 크기에 영향을 미친 것으로 보인다.

Sanseong

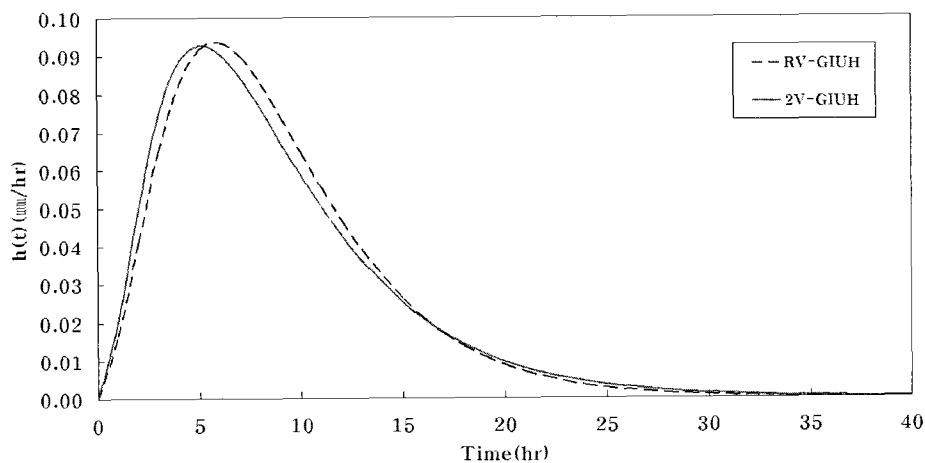


Fig. 2. RV-GIUH vs 2V-GIUH of the Sanseong subbasin

### Ipyeong

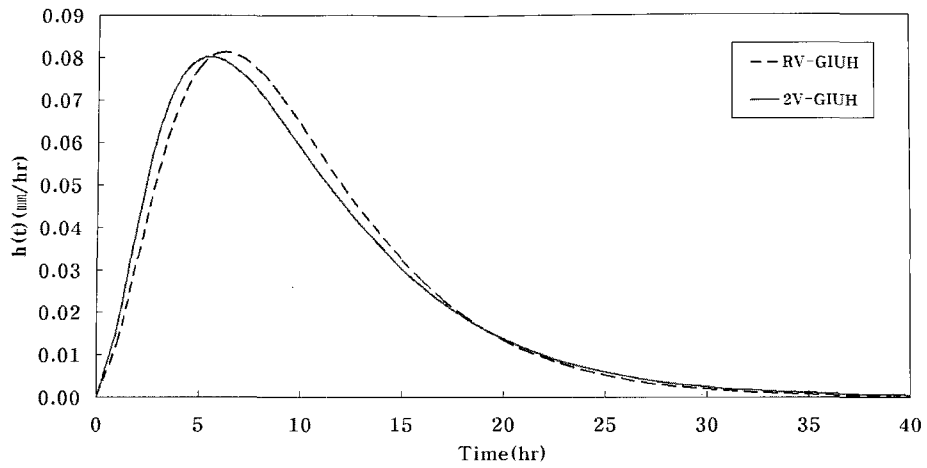


Fig. 3. RV-GIUH vs 2V-GIUH of the Ipyeong subbasin

### Tanbu

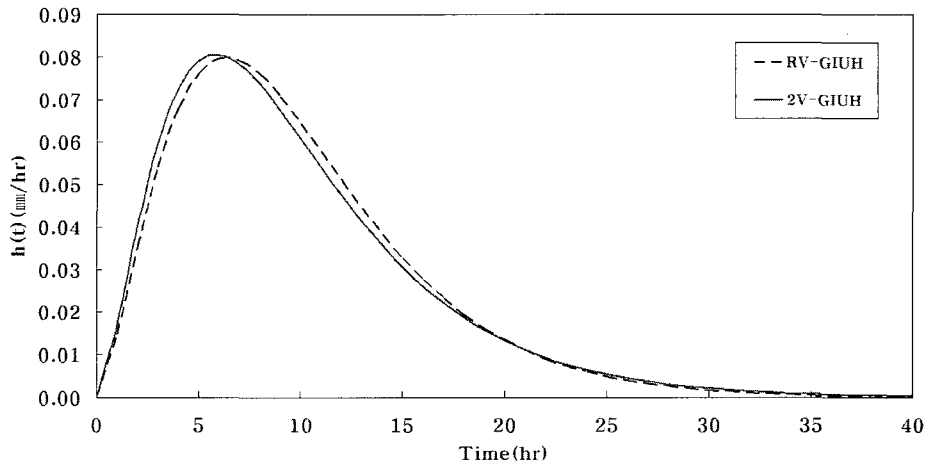


Fig. 4. RV-GIUH vs 2V-GIUH of the Tanbu subbasin

### Gidae

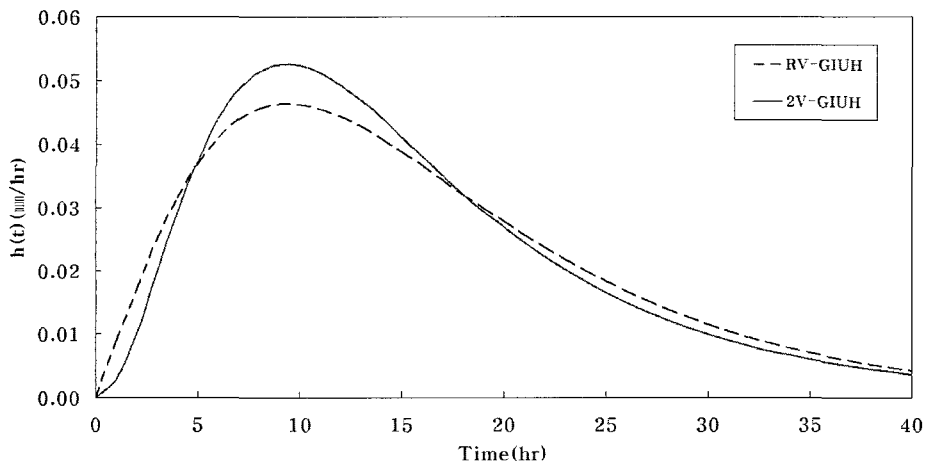


Fig. 5. RV-GIUH vs 2V-GIUH of the Gidae subbasin



## Sangye

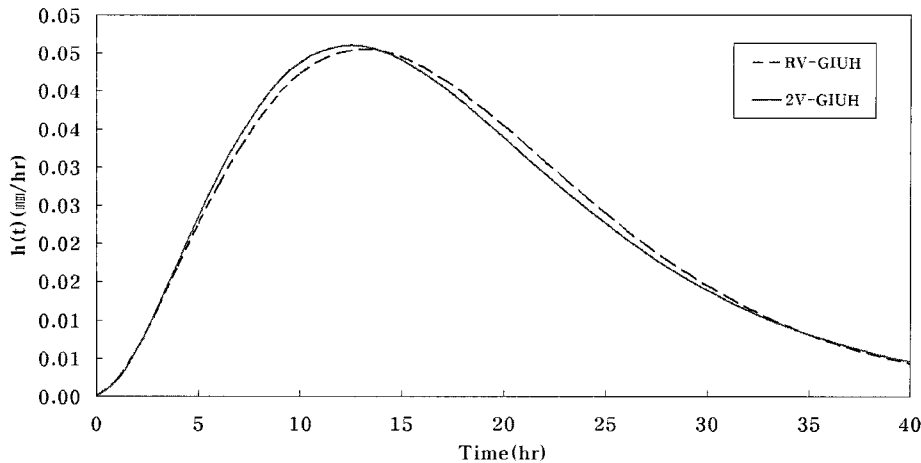


Fig. 6. RV-GIUH vs 2V-GIUH of the Sangye subbasin

### 5. 결 론

본 연구에서는 유역규모의 응답에 대한 지표면과 하천유동의 상대적 기여도를 평가하기 위하여, GIUH에 대한 적률분석을 통하여 양자의 특성속도를 개별적으로 산정하여 보았다. Strahler의 차수분류법을 기반으로 하여 지표면 유동이 포함된 GIUH 모형을 구성하였고, DEM을 이용하여 배수경로의 특성에 대한 분석을 수행하였다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지표면 배수경로의 평균유하거리는 보청천 소유역에서 거의 일정한 값을 보이는 반면, 하천 배수경로의 경우 유역규모의 증가와 함께 점점 길어지는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이로부터 동일유역의 경우 지표면 유하거리는 유역전반에 걸쳐 일정하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 대상유역인 보청천 유역은 유역내 고도차가 큰 산지유역으로서, 비교적 단순한 구조의 하천망을 형성하고 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 지표면과 하천의 특성속도 사이에는 현저한 규모의 차가 존재함을 알 수 있었다. 이로부터 유역응답에 대한 지표면 유동과정의 영향은 무시할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 지표면유동의 기여도는 단지 유역규모만으로는 판단할 수 없고 유역의 유출초기조건에 종속적이고 복합적인 특성을 가짐이 예상된다.
- 3) 동일 유역에 대하여 산정된 2특성속도 GIUH와 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)의 모형에 의한 GIUH의 하천유속을 비교해 본 결과, 전자의

경우 선행 연구사례(van der Tak and Bras, 1990; D'Odorico and Rigon, 2003)에서 제시된 하천유속의 범위를 만족하여 보다 물리적인 의미를 내포한 결과를 줄 수 있음을 알 수 있었다.

- 4) 2특성속도 GIUH를 소유역별로 산정해 본 결과 하류방향으로 진행함에 따라 침투는 작아지고 침투시간은 길어지는 일관성 있는 응답특성을 보여 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 집수평면의 형상과 이로 인한 배수구조의 특성은 순간단위도의 침투에 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

향후 보다 일반화된 지표면유동에 대한 고려를 위하여 운동과근사해법이나 확산유추 등을 이용한 동수역학적 접근법에 기초한 후속연구가 수행되어야 할 것으로 생각되며, 이의 결과들은 지표면이나 하천의 흐름에 대한 저항계수들을 추정하는데 크게 기여할 수 있으리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 김주철, 윤여진, 김재한 (2005). "Nash 모형의 지체시간을 이용한 GIUH 유도", *한국수자원학회논문집*, 38 (10), pp. 801-810.
- 김재한 (2005). 수문계의 수학적 모형, 선형계를 중심으로, *도서출판새론*.
- Cheng, B.M. (1982). *A study of geomorphologic instantaneous unit hydrograph*, Ph. D. thesis, Univ. of Illinois, Urbana, Ill.
- Chutha, P., and Dooge, J.C.I. (1990). "The shape parameters of the geomorphologic unit hydro-

- graph", *Journal of Hydrology*, 117, pp. 81-97.
- D'Odorico, P., and Rigon, R.(2003), "Hillslope and channel contributions to the hydrologic response", *Water Resources Research*, 39(5), SWC1-1-SWC1-9.
- Dooge, J.C.I. (1973). *Linear theory of hydrologic systems*, Technical Bulletin, 1468, Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- Franchini, M. and O'Connell, P.E. (1996). "An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph", *Journal of Hydrology*, 175, 407-428.
- Gupta, V.K., Waymire, E. and Wang, C.T. (1980). "A Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology", *Water Resources Research*, 16(5), pp. 855-862.
- Jin, C.X. (1992). "A deterministic gamma type geomorphologic instantaneous unit hydrograph based on path types", *Water Resources Research*, 28(2), pp. 479-486.
- Kirshen, D.M., and Bras, R.L. (1983). "The linear channel and its effects on the geomorphologic IUH", *Journal of Hydrology*, 65, pp. 175-208.
- Lee, K.T., and Chang, C. (2005). "Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling", *Journal of Hydrology*, 311, pp. 91-105.
- Moussa, R. (2003). "On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response", *Hydrological Processes*, 17, pp. 33-58.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph", *IASH Assemblée Générale de Toronto*, (3), pp. 114-121.
- Nash, J.E. (1959). "Systematic determination of unit hydrograph parameters", *Journal of Geophysical Research*, 64(1), pp. 111-115.
- Rinaldo, A., Marani, A., and Rigon, R. (1991). "Geomorphological dispersion", *Water Resources Research*, 27(4), pp. 513-525.
- Rinaldo, A., Vogel, G.K., Rigon, R., and Rodríguez-Iturbe, I. (1995). "Can one gauge the shape of a basin?", *Water Resources Research*, 31(4), pp. 1119-1127.
- Robinson, J.S., Sivapalan, M., and Snell, J.D. (1995). "On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments", *Water Resources Research*, 31(12), pp. 3089-3101.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response", *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1409-1420.
- Shamseldin, A.Y, and Nash, J.E. (1998). "The geomorphological unit hydrograph - a critical review", *Hydrology and Earth System Science*, 2(1), pp. 1-8.
- van der Tak, L.D., and Bras, R.L. (1990). "Incorporating hillslope effects into the geomorphologic instantaneous unit hydrograph", *Water Resources Research*, 26(10), pp. 2393-2400.
- White, A.B., Kurmar, P., Saco, P.M. Rhoads, B.L., and Yen, B.C.(2004) "Hydrodynamic and geomorphologic dispersion: scale effects in the Illinois river basin", *Journal of Hydrology*, 288, pp. 237-257.

(논문번호:06-31/접수:2006.02.21/심사완료:2006.05.30)