

# DEM에 의해 추출된 지형인자의 공간상관성을 기반으로 한 수문학적 응답구조의 해석

## The Analysis of Hydrological Response Structure Based on Spatial Correlation of Extracted Geomorphic Variables by Using DEM

김주철\* · 최용준\*\* · 김재한\*\*\*

Kim, Joo Cheol · Choi, Yong Joon · Kim, Jae Han

### 要 旨

유역에서의 수문지형학적 특성들은 유출현상과 깊은 상관성을 가지고 있다. 지리정보체계의 발달은 양자간의 역학 관계를 규명하는데 커다란 도움을 주었다. 본 연구에서는 이러한 지형인자 중 수문응답과 밀접한 관계로 알려진 국부경사와 지표면거리에 대한 분석을 실시하였다. 그러나 이상의 지형인자는 각 pixel별 변동성이 매우 크기 때문에 DEM으로부터 추출된 자료를 직접 사용하는 것은 한계를 가지게 된다. 따라서 공간상관성을 고려한 분포도의 통계적 특성을 이용해 수문응답함수 특성과 분포된 지형학적인자간의 관계를 살펴보았다. 분석결과 국부경사는 첨두유량에, 지표면거리는 첨두유량, 평균 및 분산에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 향후 이러한 수문지형학적 분석 기법은 DEM자료로부터 수문응답을 직접 유추할 수 있는 유용한 기법으로 발전될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 배수밀도, 국부경사, 공간적 변동성, 수문응답

### Abstract

The hydrological-geomorphic character is closely related with runoff in basin. A development of GIS greatly helps investigating about mechanism between theirs. We analyze local slope and hillslope length which are related with hydrological response. But variation of these geomorphic variables has very wide range at each pixel. So there's a limit as to use directly. Therefore we investigate a relation between hydrological response and distributed geomorphic variables according to statistical character of distributed map considering spatial correlation. As a result, the local slope affects peak discharge, and the hillslope length affects peak discharge and time, mean and variance of hydrological response. Henceforth these hydrological-geomorphic analyze methods can be improved that hydrology response is directly analogized with DEM data.

Keywords : Drainage Density, Local Slope, Spatial Variability, Hydrological Response

### 1. 서 론

자연 유역에서 강우로 인한 물의 유동은 크게 지표면 유동과 하천 유동으로 구분되게 된다. 전자의 경우에는 주로 유출의 생성에 기여하게 되며, 후자의 경우에는 유출의 수송에 지배적인 역할을 하게 된다. 또한 유역은 지형학적으로 거시적인 규모의 지질구조학적 용기로부터 유수에 의한 국부적인 세굴에 이르기까지 무수히 많은 요인에 의해 끊임없이 진화해 가는 동적시스템

을 구성한다. 따라서 물리적으로 기초한 강우-유출 현상에 대한 해석은 반드시 대상유역의 형태학적 혹은 지형학적 특성에 대한 객관적이고 신뢰성 있는 평가 위에서 수행되어야 함이 강조되어 왔다(Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979; Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 2003). 본 연구에서는 이러한 지형인자들 중 경사와 배수밀도에 주목하였다.

경사는 유역의 3차원적 특성을 반영하는 요소로서 유역의 형태나 혹은 물 입자의 동적특성을 지배하는 중

2010년 5월 4일 접수, 2010년 5월 28일 채택

\* 수자원공사 수자원연구원 연구원(kjoocheol@hanmail.net)

\*\* 정희원 · 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정(ace\_choi@@hanmail.net)

\*\*\* 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 교수(kjh@cnu.ac.kr)

요한 지형인자로서 평가할 수 있다. 하지만 지금까지 다른 지형인자들에 비하여 이론적인 발전이 상당히 미흡한 실정이다. Rodríguez-Iturbe and Rinaldo(2003)는 이러한 현상의 원인으로 비교적 최근에야 DEM의 광범위한 적용이 가능해졌음을 언급한 바 있다. 또한 경사는 공간적 변동성이 매우 큰 지형인자로 일관성 있는 거동특성의 파악 역시 매우 어려운 것으로 알려져 왔다 (Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995). 비교적 최근의 연구 성과로서 김주철과 김제한(2007)은 DEM으로부터 신뢰성 있는 하천망을 추출하기 위하여 국부경사(local slope)의 공간분포특성을 기반으로 한 경사-면적관계기준(slope-area threshold)을 적용한 바 있다. 여기서 이들은 pixel을 기반으로 하여 정의되는 국부경사가 갖는 엄청난 규모의 공간적 변동성을 언급한 바 있는데 이는 이 지형인자에 대한 새로운 형태의 접근을 요구하고 있다.

유역의 배수 구조를 구성하는 하천망과 구릉지사면의 상호작용은 유출현상을 지배하는 주요한 성분으로서 이들의 상대적인 규모는 해당 유역의 유출특성에 본질적으로 영향을 미치게 된다. 배수밀도는 이러한 유출현상의 상호작용이 갖는 상대적인 규모와 이로부터 파생되는 상이한 유출특성의 차이를 해당 유역의 형태학적 특성으로부터 정량적으로 계량할 수 있는 지형인자로서 수문지형학 분야에서 그 역할이 주목되고 있다 (Tucker et al., 2001; 김주철과 이상진, 2010).

지형인자와 수문응답함수의 결합의 최초의 시도는 Rodríguez-Iturbe and Valdes(1979)의 연구를 들 수 있다. 여기에서 수문응답함수는 유역에 있어서 강우로 인한 유출의 시간적 변화를 나타내는 반응함수를 나타낸다. 이들은 Strahler 차수법칙을 기반으로 유역의 지형인자와 동역학적 특성인자와의 결합에 의한 지형학적 순간단위도(GIUH) 모형을 개발하였다. 이후 Rinaldo et al.(1991)은 확산유추를 통해 GIUH에서의 지형학적 분산의 효과를 규명하였으며, D'odorico and Rigon(2003)과 Di Lazzaro(2009)는 지형학적 분산을 pixel 형태로 일반화하였다. 최용준 등(2010)은 이러한 pixel 형태의 지형학적 분산 개념을 이용해 개념적 강우-유출 모형인 Nash 모형의 매개변수를 유도한 바 있다. 본 연구에서는 최용준 등(2010)의 모형을 이용해 공간 분포된 국부경사와 배수밀도에 의한 유역응답함수의 구조 관계에 대한 분석을 시도하였다. 즉, 공간적 변동성에 의해 분포된 국부경사와 지표면 유효거리가 수문응답함수에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 이상의 지형인자들에 대한 자기상관(autocorrelation) 분석을 통하여 해당 계열자료의 공간상관 구조를 추정하고 이

를 기반으로 pixel별 대상 지형인자를 재분류하여 공간 분포된 국부경사와 배수밀도를 작성하여 적용하였다.

## 2. 이론적 배경 및 방법론

### 2.1 국부경사와 배수밀도

#### 2.1.1 국부경사

DEM을 기반으로 한 유역의 유출현상 모의에는 일반적으로 8방향 모형이 적용된다. 이에 따라 8방향 pixel windows 상에서 물 입자의 흐름방향은 식 (1)로부터 산정되는 최급하향경사로부터 결정된다.

$$S_{\max} = \max \left[ \frac{Z_0 - Z_i}{l} \right] \quad (1)$$

여기서  $S_{\max}$ 는 최대경사,  $Z_0$ 는 중앙에 위치한 pixel의 고도,  $Z_i$ 는 이웃한 8개 pixel의 고도 그리고  $l$ 은 중앙 pixel과 이웃한 pixel들의 중심 간의 거리이다. 상기한 과정에 따라 모든 pixel들에 대하여 최급하향경사가 산정되면 해당 pixel들로부터 유역출구까지의 물 입자들의 흐름경로(flow path)가 일관성 있게 결정될 수 있다. Ijjasz-Vasquez and Bras(1995)는 식 (1)에 의하여 산정되는 pixel별 최급하향경사에 주목하여 이를 국부경사라 명명하였다. 이러한 pixel 별 국부경사와 기어면적과의 관계는 엄청난 규모의 산포경향을 나타낸다(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995). 이로부터 유역의 국부경사는 공간적으로 매우 변동성이 큰 지형인자임을 확인할 수 있다.

#### 2.1.2 배수밀도

배수밀도는 대수적으로 다음과 같이 표현된다(Bras, 1990).

$$D_d = \frac{L_T}{A} \quad (2)$$

여기서 우변의  $L_T$ 는 하천의 총 연장 그리고  $A$ 는 유역면적으로서 좌변의 배수밀도  $D_d$ 는 길이의 역수 차원을 갖는다. 식 (2)는 유역의 단위면적 당 하천 총 연장을 나타내는 지형인자로서 만약 이를 유역 전반에 걸쳐 일정하게 가정할 경우 유역 내 물 입자의 평균 지표면 유효거리  $\bar{L}_h$ 는 다음과 같이 산정된다(Bras, 1990).

$$\bar{L}_h = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{D_d} \right) \quad (3)$$

식 (3)으로부터 유역의 배수밀도가 증가할수록 지표면 유하거리는 감소하게 됨을 알 수 있다. 이는 하천망이 발달된 유역일수록 전반적인 유출현상에 대하여 지표면 이동경로가 차지하는 비중이 작음을 암시한다. 또한 지표면과 하천의 유하속도 사이에는 비교적 큰 규모의 차가 존재할 수 있음이 여러 학자들에 의하여 지적되고 있다(D'odorico and Rigon, 2003; Di Lazzaro, 2009). 이러한 사항들은 하천과 지표면 유하거리의 상대적인 규모가 유역의 유출현상을 지배하는 중요한 지형특성임을 나타내는 것으로 식 (2)와 (3)은 배수 구조를 기반으로 하여 이러한 유역의 상이한 유출특성에 대한 체계적인 접근수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. Gupta et al(1980)은 식 (3)의 관계를 Strahler의 차수법칙과 결합하여 지형학적 순간단위도 모형 내의 지표면 유동에 대한 평가를 위하여 적용한 바 있다. 여기서 흥미로운 사항은 배수밀도의 개념을 차수에 따라 개별적으로 적용하여 지표면 유하거리를 산정한 점으로 지표면 유하거리의 공간적 변동성을 시사하는 연구결과로 볼 수 있다.

식 (2)와 (3)은 배수밀도의 동질성(homogeneity)을 기반으로 한 지형인자들이다. 즉 식 (3)으로부터 산정되는 지표면 유하거리는 유역 내 임의 지점에서 출발한 물 입자가 하천에 도달하기 위하여 유하해야 하는 평균 경로의 길이를 의미하게 된다. 하지만 D'odorico and Rigon(2003) 및 Di Lazzaro(2009) 등은 DEM으로부터 pixel별로 산정한 지표면 유하거리에 대한 분석을 통하여 자연유역의 배수경로에는 대규모의 이질성(heterogeneity)이 존재함을 제시한 바 있다. 이는 전술한 지표면 유하거리의 공간적 변동성이 결코 무시할 수 없는 자연지형의 근본적인 특성 중의 하나임을 의미하는 것으로 배수밀도와 지표면 유하거리 사이의 관계를 식 (3)보다는 식 (4)와 같이 다루는 것이 보다 합리적임을 나타낸다.

$$D_d \propto \frac{1}{L_h} \quad (4)$$

Tucker et al(2001)은 식 (1)의 8방향 pixel windows 상의 최급하향경사법을 이용하여  $L_h$ 를 계량하는 방법을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 Tucker et al.(2001) 방법을 적용하여 지표면 거리를 산정하였다. 모든 pixel들에 대한  $L_h$ 를 산정하여 적절한 축척에 따라 도상에 도시할 경우 이는 식 (3)의 정의에 따라 본질적으로 배수밀도의 공간 분포도와 일치하게 된다.

## 2.2 국부경사와 배수밀도의 공간적 변동성

이상의 공간적 변동성과 관련하여 Tucker et al.(2001)은 DEM으로부터 pixel별로 산정된 지형인자를 일종의 무작위변수(random variable)로 취급하여 이에 대한 통계학적 접근방향을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 이러한 개념을 각각의 지형인자에 적용하여 다음과 같은 통계학적 관계식을 적용하였다(김주철과 이상진, 2010).

$$E[S^R] = \int_0^{\infty} S^R p(S) dS \quad (5)$$

$$E[L_h^R] = \int_0^{\infty} L_h^R p(L_h) dL_h \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 좌변의  $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자이고 우변의  $S, L_h$ 는 각각 국부경사와 지표면 거리를 그리고  $p(S), p(L_h)$ 는 각각  $S, L_h$ 에 대한 확률밀도함수이다. 따라서 식 (5)와 (6)은 각각  $S, L_h$ 의  $R$ 차 모멘트를 의미하는 것으로서  $S$ 와  $L_h$ 의 공간적 변동성에 대한 체계적인 접근을 위한 관계식임을 확인할 수 있다. 여기서 만약  $S$ 와  $L_h$ 를 일종의 공간계열(spatial series) 자료로 가정한다면 식 (7)과 (8)과 같은  $S$ 와  $L_h$ 의 공간적 자기상관 구조를 제시할 수 있게 된다.

$$Cov(\lambda_1) = E[S(x)S(x+\lambda_1)]; \lambda_1 = |\lambda_1| \quad (7)$$

$$Cov(\lambda_2) = E[L_h(x)L_h(x+\lambda_2)]; \lambda_2 = |\lambda_2| \quad (8)$$

여기서  $Cov(\cdot)$ 는 공분산 연산자이고  $x=(x,y)$ 는 임의 지점의 좌표 그리고  $\lambda_{1,2}$ 는 각각  $S$ 와  $L_h$ 의 공간상관거리로서 식 (7)과 (8)은 각각  $S$ 와  $L_h$ 의 자기상관성의 범위를 정의하게 된다. 식 (5)~(8)은 지리정보처리기술의 발전을 토대로 하여 제시된 고전적인 지형인자들에 대한 새로운 형태의 접근방법으로 볼 수 있다. 특히 식 (7)과 (8)의 경우 유역규모의 지형자료들이 갖는 엄청난 규모의 공간적 변동성을 다루기 위한 이론적 혹은 실무적 배경을 제시하는 주요한 관계식임을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 대상유역 내 포함되는 모든 pixel들에 대하여  $S$ 와  $L_h$ 를 산정하고 이를 식 (5)와 (6)에 적용하여 국부경사의 통계학적 특성을 분석하여 본다. 또한 동일한 자료를 공간계열자료로서 가정하여 식 (7)과 (8)에 의한  $S$ 와  $L_h$ 의 공간상관거리  $\lambda_{1,2}$ 를 추정하여 본다. 이렇게 산정되는  $\lambda_{1,2}$ 는 임의 지점에 대한 각각의

$S$ 와  $L_h$ 가 주변 지점의  $S$ 와  $L_h$ 와의 상관성을 갖는 범위 혹은 영향반경을 정의하는 것으로 대규모의 공간적 변동성을 나타내는 지형인자들을 재분류(binng)하기 위한 일관성 있는 기준을 제시해 준다. 본 연구에서는 Arc Info의 Grid module 내에서 운용되는  $\lambda_{1,2}$ 를 영향 반경으로 한 원형 moving windows(Focal Mean Operator)를 이용하여 대상구역 내 모든 pixel들에 대한 이동평균(moving average)을 산정하고 이를 도상에 도시하여  $S$ 의 공간적 변동성 분석에 적용한다. 실제  $\lambda_{1,2}$ 의 추정을 위한 자기상관분석에는 범용통계 package인 Minitab을 적용한다.

2.3 수문응답함수

Nash (1957)는 식 (9)에서의 핵함수인  $f(t)$ 에 대해 직렬로 연결된  $n$ 개의 동등한 선형 저수지로 구성된 배수유역을 제안함으로써 개념적 수문응답함수를 제시하였다.

$$f(t) = \frac{1}{K} \frac{1}{\Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (9)$$

여기에서  $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma함수이다. 식 (9)는 배수유역의 순간단위도에 대한 일반식으로서  $n$ 과  $K$ 가 각각 형상매개변수와 축척매개변수에 해당하는 2매개변수 Gamma분포 확률밀도함수와 일치한다. 여기에서 순간단위도는 유역에 강우가 순간적으로 발생하였을 경

우의 순간응답함수로 정의되며, 형상매개변수와 축척매개변수는 통계적으로 2변수 Gamma 확률밀도함수의 변수를 의미한다. 최용준 등(2010)은 지리정보체계에 의한 일반적인 pixel 형태로 확장된(D'odorico and Rigon, 2003) 지형학적 분산 개념을 이용하여 식 (9)의 두 매개변수를 유도하는 식을 개발하였다.

$$n = \frac{\langle L_h \rangle^2 u_c^2 + 2 \langle L_c \rangle \langle L_h \rangle u_c u_h + \langle L_c \rangle^2 u_h^2}{\text{Var}[L_h] u_c^2 + 2 \text{Cov}(L_c, L_h) u_c u_h + \text{Var}[L_c] u_h^2} \quad (10)$$

$$K = \frac{\text{Var}[L_h] u_c^2 + 2 \text{Cov}(L_c, L_h) u_c u_h + \text{Var}[L_c] u_h^2}{u_c u_h (\langle L_h \rangle u_c + \langle L_c \rangle u_h)} \quad (11)$$

여기서  $u_h, u_c$ 는 각각 지표면 및 하천의 특성유속,  $L_h, L_c$ 는 각각 지표면 및 하천유하거리를 나타내며,  $E[\cdot], \text{Var}[\cdot], \text{Cov}[\cdot, \cdot]$ 는 각각 기대치, 분산 및 공분산 연산자이다. 본 연구에서는 공간분포된 지형인자에 의한 수문응답구조의 해석을 위해 식 (10)과 (11)를 적용하였다.

3. 적용 및 고찰

3.1 유역의 개요

본 연구에서는 대상유역으로 금강 수계에 위치한 국제수문개발계획(IHP) 시험유역인 보청천 유역(그림 1)을 선정하였다. 보청천 유역은 우리나라 금강수계의 중소유역으로 대부분 산지로 형성되어 있어 유역의 평균 고도는 높은 편이며 유역의 경계부는 높고 하천을 중심

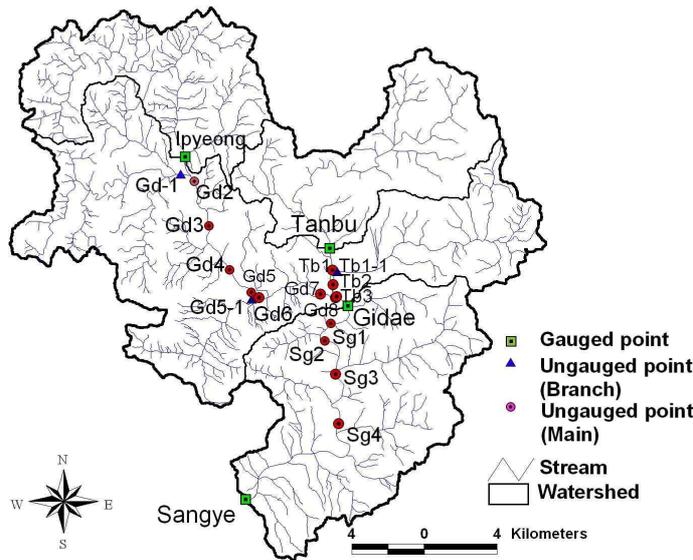


그림 1. Drainage map of Bocheong watershed

표 1. Geomorphic Variables

Water shed	Area (km <sup>2</sup> )	Channel		Hillslope		Co-variance (m <sup>2</sup> )	Distributed	
		Mean (m)	Variance (m <sup>2</sup> )	Mean (m)	Variance (m <sup>2</sup> )		Local slope	Hillslope length (m)
Ipyeong	76.3	9,314	30,567,600	288	95,789	-159,826	0.2789	281.2
Gd-1	63.09	7,571	13,600,500	278	61,975	112,798	0.2472	284.3
Gd2	140.84	9,738	24,889,000	284	80,831	-39,451	0.2640	283.2
Gd3	148.78	12,168	29,074,600	293	87,639	-125,391	0.2601	292.0
Gd4	166.65	13,978	39,717,400	300	89,976	-201,404	0.2519	298.2
Gd5	168.37	15,728	41,515,500	301	89,680	-209,076	0.2513	298.6
Gd5-1	28.46	5,800	5,178,260	350	118,152	-78,045	0.2164	333.1
Gd6	198.44	14,708	49,702,100	307	93,936	-237,766	0.2461	303.9
Gd7	218.27	17,821	61,496,100	321	107,899	-348,319	0.2432	313.8
Gd8	219.02	18,707	62,410,800	321	107,754	-347,275	0.2433	314.0
Tanbu	77.51	11,437	36,914,100	509	259,422	511,887	0.3604	471.4
Tb1	81.70	12,136	40,823,800	511	259,694	455,421	0.3556	470.0
Tb1-1	50.43	8,613	16,773,700	383	123,239	-330,477	0.3723	429.5
Tb2	132.51	11,608	34,801,500	461	211,129	269,019	0.3617	454.6
Tb3	134.39	12,244	36,104,600	464	212,513	239,540	0.3604	454.0
Gidae	354.14	17,104	62,831,300	375	152,181	-339,719	0.2878	367.2
Sg1	369.08	18,257	68,800,900	373	149,340	-293,437	0.2890	366.7
Sg2	376.69	19,393	73,361,100	370	147,355	-233,903	0.2879	365.3
Sg3	407.52	20,623	87,499,100	372	147,178	-250,906	0.2905	365.8
Sg4	420.61	23,597	97,238,200	370	125,198	-215,482	0.2896	365.0
Sangye	485.21	30,027	158,953,000	373	148,836	-190,788	0.2881	366.5

으로 좌우안은 평탄하다. 본 연구에서는 본류 구간에 대해 이평수위국 지점부터 기대수위국 지점까지의 하천구간, 지류를 따라 탄부수위국 지점부터 기대수위국 지점까지의 하천구간과 이상의 두 하천이 합류하는 기대수위국 지점부터 유역 출구 지점인 산계수위국 지점까지의 하천구간으로 나누었으며, 이상의 세 하천구간에 대해 임의로 2차 지류까지 확장해 유역을 분할하였으며 각각의 소유역에 대한 수문응답특성을 분석하였다.

### 3.2 지형인자의 공간분포

대상유역에 대한 배수밀도, 지표면 유하거리 및 국부 경사를 산정하기 위하여 GIS를 기반으로 한 지형분석을 수행하였다. DEM의 생성에는 국립지리원에서 발행한 1/25,000 축척의 수치지도를 적용하였고 pixel의 해상도는 20×20m로 하였다. 그림 1에 도시된 하천망은 수치지도에서 추출한 하천선(blue line)으로서 본 연구에서는 별도의 하천망 추출작업을 거치지 않고 이를 분석에 직접 적용하였다. 유역의 지형인자 중 국부경사는 Arc Info의 FLOWDIRECTION 함수의 Optional output을 이용하여 산정하였으며, 지표면 거리는 Arc Info의 Grid module에서 FLOWLENGTH 함수를 이용하여 산정하였다. 표 1은 이상의 절차에 의해 산정된

대상유역의 지형인자 값들을 나타낸 것으로, (3)~(7)란은 실제 하천망을 이용한 하천 및 지표면의 유하거리에 대한 통계적인 값들을 추출한 결과이다. 또한 (8)~(9)란은 식 (5)와 (6)을 기반으로 Arc Info의 FOCALMEAN 함수를 사용하여 공간분포된 pixel별  $S$  및  $L_h$ 의 통계학적 특성을 소유역별로 산정한 결과이다. pixel별  $S$  및  $L_h$ 에 대하여 범용 통계 package인 Minitab을 이용하여 해당 계열자료의 자기상관분석을 수행한 결과  $S$ 에 대한 유의한 공간상관거리  $\lambda_1$ 은 약 7.1km,  $L_h$ 에 대한  $\lambda_2$ 는 약 4.8km 정도인 것으로 나타났다.

### 3.3 수문학적 응답구조의 해석

수문응답함수를 특성을 추출하기 위해 식 (10)과 (11)의 Nash 모형의 매개변수 산정식을 적용하였다. 식 (10)과 (11)에서 지표면과 하천의 특성유속은 최근 연구된 최용준 등(2010)의 값을 적용하였다. 본 연구에는 기대수위국 지점을 기준으로 상·하류에 대한 수문응답함수의 특성을 비교하고자 하였으므로 대상 소유역에 대해 하천 유속은 0.810 m/s, 지표면 유속은 0.011 m/s로 일정하게 적용하였다(최용준 등, 2010).

표 2. Character of Nash's IUH

Watershed	Nash's IUH Parameters		Nash's IUH			
	n	K(hr)	$Q_p$ (mm/hr)	$t_p$ (hr)	Mean(hr)	Variance(hr <sup>2</sup> )
Ipyeong	1.77	5.91	0.0693	4.552	10.467	61.9104
Gd-1	2.15	4.48	0.0775	5.137	9.617	43.0740
Gd2	2.05	5.12	0.0703	5.394	10.511	53.7889
Gd3	2.34	4.94	0.0656	6.634	11.572	57.1341
Gd4	2.61	4.73	0.0631	7.635	12.369	58.5594
Gd5	2.89	4.50	0.0618	8.497	12.995	58.4493
Gd5-1	1.57	6.89	0.0668	3.937	10.827	74.6016
Gd6	2.66	4.82	0.0612	7.980	12.796	61.6292
Gd7	2.89	4.92	0.0564	9.294	14.218	70.0055
Gd8	3.01	4.82	0.0560	9.698	14.521	70.0387
Tanbu	1.58	10.65	0.0431	6.127	16.776	178.6380
Tb1	1.63	10.45	0.0424	6.619	17.066	178.2932
Tb1-1	2.13	5.93	0.0589	6.698	12.625	74.8371
Tb2	1.70	9.18	0.0463	6.444	15.622	143.3871
Tb3	1.76	9.04	0.0456	6.874	15.916	143.9123
Gidae	2.39	6.43	0.0497	8.909	15.335	98.5496
Sg1	2.50	6.27	0.0492	9.415	15.680	98.2416
Sg2	2.60	6.16	0.0487	9.833	15.994	98.5432
Sg3	2.72	6.06	0.0479	10.406	16.466	99.7986
Sg4	3.47	5.02	0.0489	12.415	17.436	87.5411
Sangye	3.52	5.59	0.0434	14.122	19.717	110.3004

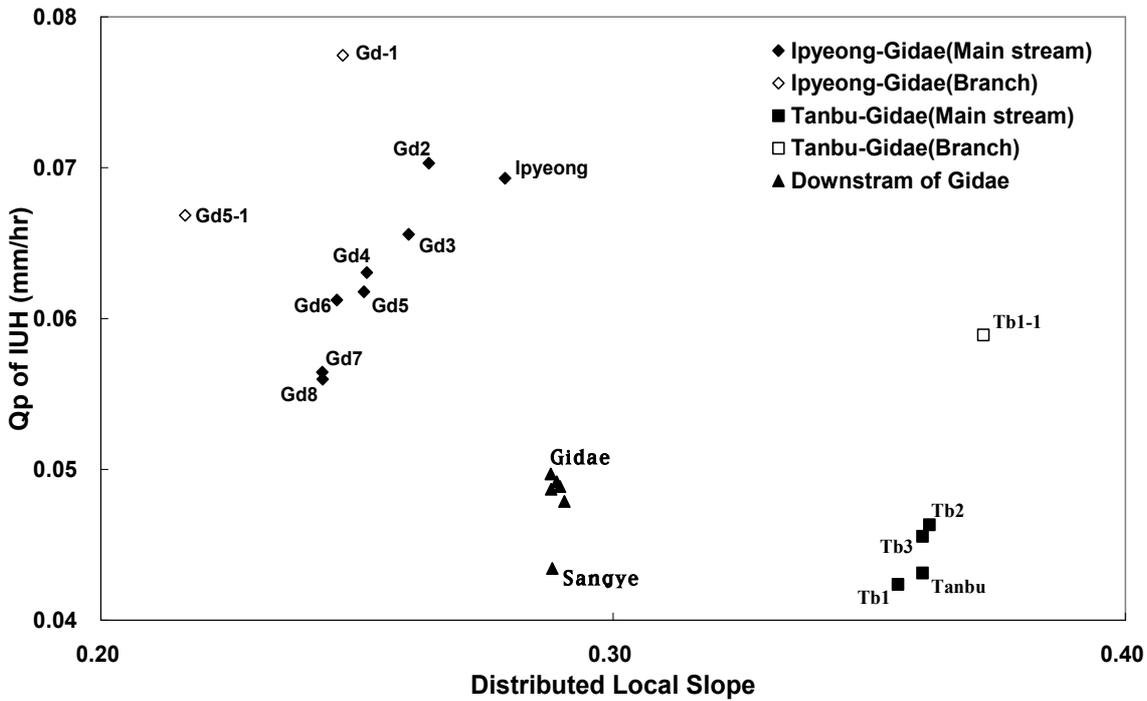


그림 2. Relation between Distributed Local Slope and  $Q_p$  of IUH

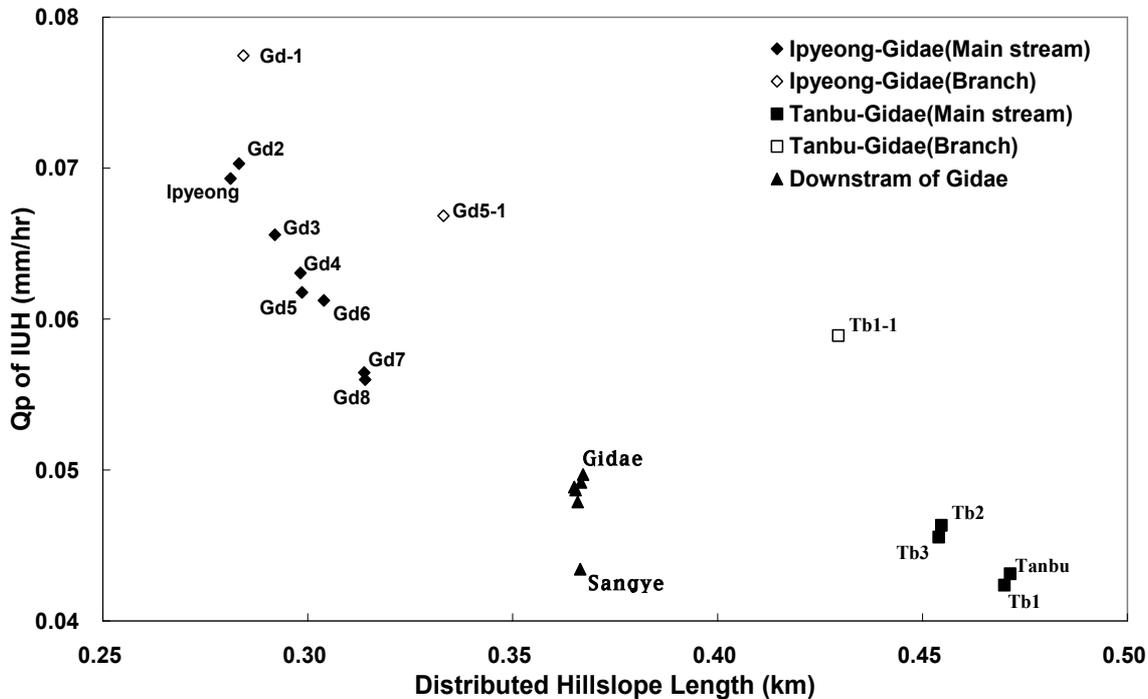


그림 3. Relation between Distributed Hillslope Length and  $Q_p$  of IUH

대상유역내의 공간상관성에 의한 지표면 유하거리와 국부경사의 지형인자와 유역의 수문학적 응답구조의 관계를 살펴보기 위해 식 (10)과 (11)에 의해 유도된 순간단위도의 첨두유량, 첨두시간, 유하시간의 평균 및 분산과의 비교를 분석하였다. 첨두시간은 강우로 인한 수문응답함수에서 최대 유출량을 의미하며, 첨두시간은 첨두유량이 발생하는 시간으로 정의된다. 또한 유하시간은 유역 내 임의의 지역에 떨어진 강우입자가 유역 출구까지 유하하는데 소요되는 시간을 의미한다. 유도된 순간단위도의 매개변수 및 비교 결과는 표 2와 같다. 비교결과 첨두시간은 이상의 지형특성 인자들과의 상관성은 찾아 볼 수 없었다. 이는 첨두시간은 주로 하천망에 의한 물의 이송효과에 지배적인 영향을 받음으로 본 연구에서 제시된 지표면을 포함한 유역 단위의 지형인자와는 큰 상관성을 보이지 않는 것으로 판단된다. 즉, 첨두시간에 대한 지형인자와의 상관성은 향후 하천망에 대한 독립적인 분석이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 그러나 순간단위도의 첨두유량은 그림 2와 3에서 보여 지듯이 국부경사와 지표면거리에 대해 두 지형인자 모두 상관관계를 나타내었으며, 순간단위도의 평균과 분산은 그림 4와 5 같이 지표면 유하거리에 상관관계를 보임을 알 수 있었다.

첨두유량은 그림 2와 같이 공간분포된 국부경사와

비례관계를 보이며, 지표면 유하거리와는 그림 3과 같이 반비례 관계를 보인다. 전자의 경우에는 물리적으로 유속은 경사와 비례관계를 보임에 따라 나타나는 현상으로 판단되며, 후자의 경우 하천 유속에 비해 낮은 지표면 유속으로 인해 물의 유동을 지체시키는 효과를 발생하게 되므로 긴 지표면 유하거리를 갖는 유역은 짧은 지표면 유하거리를 갖는 유역에 비해 첨두유량이 낮아지는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 여기서 좀 더 흥미로운 점은 이평유역에서 기대유역까지 구간과 탄부유역에서 기대유역까지의 구간은 같은 경향성을 보이지만 서로 다른 분포선을 나타낸다는 점이다. 이는 표 1에서 보여 지듯이 기대유역에서 합류되는 두 유역의 지형특성인자가 확연히 다른 분포를 가지고 있기 때문으로 판단된다. 또한 지류의 경우 분류의 지형특성값들과는 다른 양상의 특성값들을 나타내지만, 분류와 합류할 경우 분류의 경향을 따르는 것으로 나타나고 있다.

유하시간의 평균은 그림 4와 같이 공간분포된 지표면 유하거리와 비례의 관계를 보이며 첨두유량과 마찬가지로 두 구간에 대해 서로 다른 분포선을 나타내었다. 또한 지류가 합류함에 따라 첨두유량과 같이 분류의 특성을 따르는 것으로 나타났다. 유하시간 분산 역시 그림 5에서 보여 지듯이 이러한 양상을 동일하게

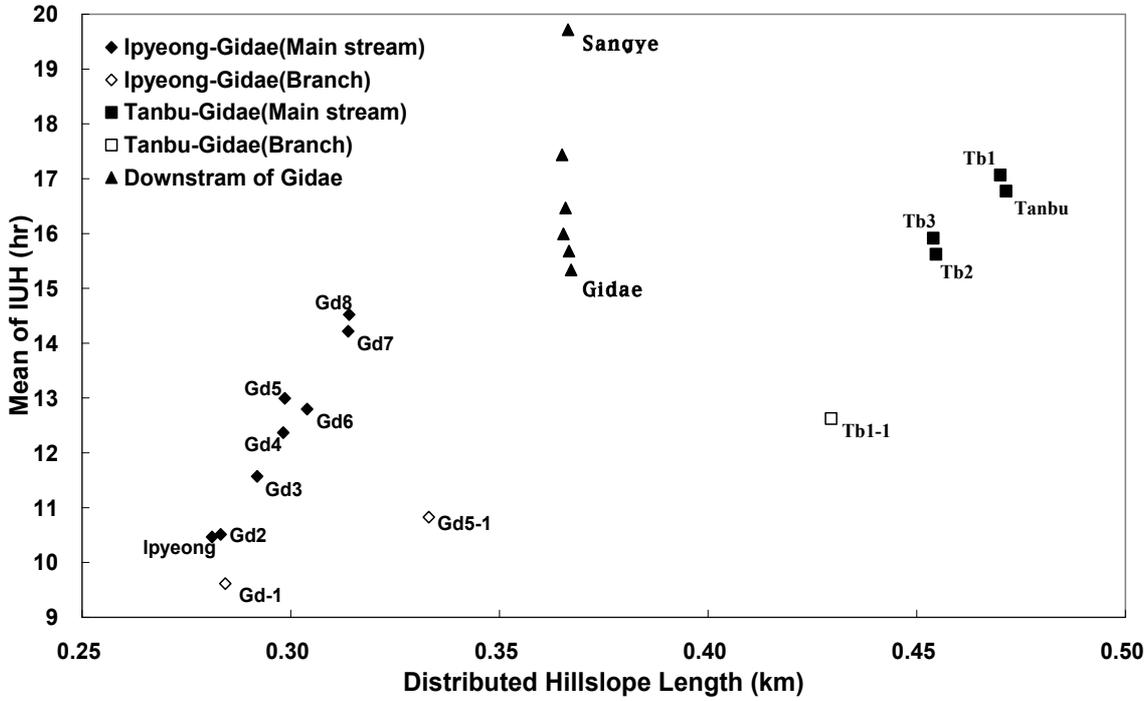


그림 4. Relation between Distributed Hillslope Length and Mean of IUH

나타냄을 알 수 있었다. 이러한 유하시간의 평균 및 분산과 공간분포된 지표면 유하거리와의 비례관계는 하

천유속(0.81 m/s)에 비해 상대적으로 확연히 낮은 지표면 유속(0.011 m/s)이 순간단위도의 감수부에 큰 영향

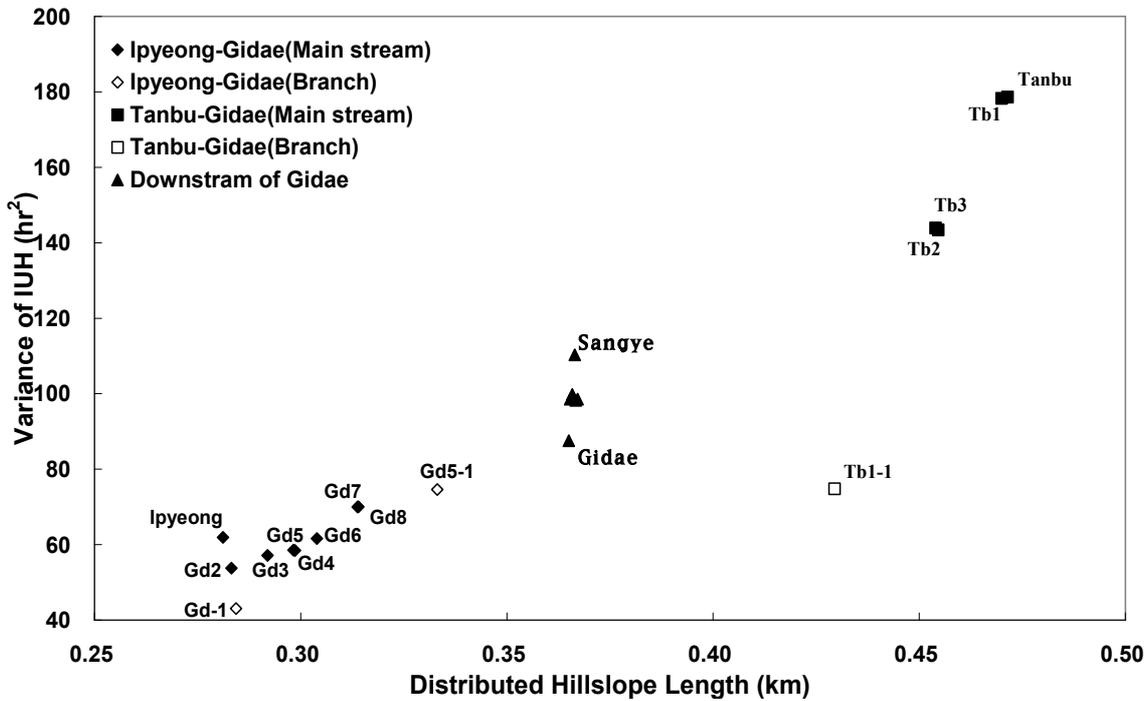


그림 5. Relation between Distributed Hillslope Length and Variance of IUH

을 미치기 때문에 판단된다. 그러나 모든 분석결과에서 주목할 점은 기대 유역의 수문특성값이다. 대상유역의 종류에 위치한 기대유역은 공간분포된 지형인자(지표면거리 및 국부경사)의 값이 매우 상이(표 1 참조)한 Tb3 유역(134.39 km)과 Gd8 유역(219.02 km)이 합류됨에 따라 형성된 유역으로서, 기대 지점의 수문특성값은 두 합류되는 소유역 구간과는 또 다른 분포선을 나타냄을 알 수 있었다.

결론적으로 본 연구대상유역에 대해 하천망의 발달이 시작되는 상류지점에서의 합류(Ipyeong과 Gd-1, Tb1과 Tb1-1), 또는 합류되는 두 소유역간의 상대적인 면적의 차가 큰 경우(Gd5와 Gd5-1)에는 두 소유역의 합류후의 수문응답특성은 본류 또는 유역면적이 큰 유역의 수문응답특성에 가깝게 나타나는 경향을 나타냈으나, 하천망이 어느 정도 발달된 중류유역에서 지형특성이 상이한 두 유역의 합류 시(Tb3와 Gd8)에는 전혀 다른 수문응답특성값의 분포를 보임을 알 수 있었다. 일반적인 순간단위도의 형상은 유역규모가 커짐에 따라, 즉 하류방향으로 진행됨에 따라 첨두유량은 작아지고 첨두시간은 커진다고 알려져 왔다. 이러한 개념은 주로 전자의 영향이 지배적일 경우에 해당되는 것으로 판단된다. 그러나 자연유역은 후자의 경우와 같이 전혀 다른 특성을 가지는 지류의 소유역들이 끊임없이 본류와 합류되면서 발달되는 것으로, 서로 다른 지형특성 및 규모의 유역이 포개지는 구조(nested structure)를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 구조가 서로 대등한 규모의 전혀 다른 지형특성을 가지는 두 유역이 합류 될 경우에는 전혀 다른 수문응답구조를 나타낼 수 있음을 제시하고자 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공간상관성을 기반으로 하는 공간분포된 유역의 지형인자(국부경사 및 지표면거리)의 통계적 특성을 산정하였다. 또한 이러한 자료들과 유역의 수문응답함수의 특성들과의 상관성 분석하였다. 좀 더 다양한 유역에 대해 다양한 지형인자에 대한 연구가 진행되어야 하겠지만 본 연구를 통해 도출된 결과와 다음과 같이 요약된다.

- 1) 대상유역의 지형인자의 자기상관분석을 수행한 결과 국부경사에 대한 유의한 공간상관거리는 약 7.1km, 지표면거리에 대한 공간상관거리는 약 4.8 km 정도인 것으로 나타났다.
- 2) 수문응답의 첨두유량은 공간 분포된 지표면 유효거리와 반비례, 공간분포된 국부경사와 비례관계

를 나타낸다. 또한 유효시간의 평균 및 분산은 공간분포된 지표면 유효거리와 비례관계를 나타낸다.

- 3) 대상유역에서 하천망의 발달이 시작되는 상류지점에서의 합류, 또는 합류되는 두 소유역간의 상대적인 면적의 차가 큰 경우에는 합류 후의 수문응답 특성은 본류 또는 유역면적이 큰 유역의 수문응답특성에 가깝게 나타나는 경향을 보이지만 하천망이 발달된 중류유역에서 지형특성이 상이한 두 유역의 합류 시에는 합류전의 두 소유역과 전혀 다른 수문응답특성의 분포특성을 나타낼 수 있음을 제시한다. 또한 본 연구의 결과는 향후 하천망에 대한 지형특성 및 동수역학적 특성들의 분석의 확장을 통해 좀 더 정밀한 수문응답 구조의 해석에의 활용이 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2008년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음

#### 참고문헌

1. 김주철, 김재한, 2007, "DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현", 한국수자원학회논문집, 40권, 4호, pp.287-297.
2. 김주철, 이상진, 2010, "GIS 기반 유역 배수 밀도의 공간분포도 작성", 한국지형공간정보학회지, 18권, 1호, pp.3-9.
3. 최용준, 김주철, 정관수, 2010, "배수경로 이질성을 기반으로 한 Nash 모형의 매개변수 동정", 한국수자원학회 논문집, 43권, 1호, pp.1-13.
4. Bras, R. L., 1990, "Hydrology—An introduction to hydrologic science", Addison Wesley.
5. 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.
6. 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.
7. Gupta, V. K., Waymire, E. and Wang, C. T., 1980, "A Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology", Water Resources Research, Vol.16, No.5, pp.855-862.
8. Ijjasz-Vasquez, E. J. and Bras, R. L., 1995, "Scaling

- regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models”, *Geomorphology*, Vol.12, pp.299–311.
9. Montgomery, D. R. and Foufoula-Georgiou, E., 1993, “Channel network source representation using digital elevation models”, *Water Resources Research*, Vol.29, No.12, pp.3925–3934.
  10. Nash, J. E., 1957, “The form of the instantaneous unit hydrograph.”, *IASH Assemblée Générale de Toronto*, Vol.45, pp.114–121.
  11. Rinaldo, A., Rigon, R. and Marani, M., 1991. “Geomorphological dispersion”. *Water Resources Research*, Vol.27, No.4, pp.513–525.
  12. Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A., 2003, “Fractal river basins—Chance and self-organization”, Cambridge.
  13. Rodríguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B., 1979, “The geomorphologic structure of hydrologic response”, *Water Resources Research*, Vol.15, No.6, pp.1409–1420.
  14. Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A. and Bras, R. L., 2001, “Statistical analysis of drainage density from digital terrain data”, *Geomorphology*, Vol.36, pp.187–202.