

# Strahler 차수법칙에 따른 하천망 해상도가 수문학적 응답함수에 미치는 영향

## The Effect of The Channel Networks Resolution According to Strahler's Ordering Scheme on The Hydrological Response Function

최용준\* · 안정민\*\* · 김주철\*\*\*

Choi, Yong Joon · Ahn, Jung Min · Kim, Joo Cheol

### 要 旨

본 연구의 목적은 유역 하천망의 발달에 따른 수문응답함수의 변화양상 분석에 있다. 이를 위한 대상유역은 보청천의 탄부수위표를 출구로 하는 소유역을 선정하였다. 적용된 하천망은 Strahler 차수분류법에 의해 구성된 하천망과 유역 내 모든 격자가 하천 또는 지표면으로 구성된 경우로 총 10가지로 구성하였다. 각각의 경우에 대해 대상 유역 내 모든 격자의 지표면과 하천 배수경로 길이를 산정하였으며 Nash 모형을 이용하여 수문응답함수를 결정하였다. 분석결과 하천망이 발달함에 따라 수문응답함수의 첨두유량은 크게 나타나며, 첨두시간은 작아지는 양상을 보였다. 또한 응답함수의 통계적 특성을 살펴 본 결과 하천망의 발달에 따라 유하시간의 평균(지체시간)과 분산이 지수적으로 감소함을 알 수 있었다.

핵심어 : Strahler 차수법칙, 지형학적 순간단위도, 하천망

### Abstract

In this study, the change pattern of hydrological response function as development has been observed. The target watershed was selected Tanbu sub-Basin in the Bocheong Basin. The applied channel networks are composed of 10 cases that are channel networks by strahler's ordering scheme and cases of all grids channel or the hillslope in basin. To each case of grid in basin, channel and hillslope drainage path lengths to outlet of basin are calculated, and hydrological response function was calculated by Nash Model. As results of this analysis, the peak discharge of hydrological response function is increased and peak time is shortened as development of channel networks. And based on statistical characteristics of hydrological response function, mean (lag time) and variance of travel time are reduced exponentially.

Keywords : Strahler's ordering scheme, GIUH, Channel networks

### 1. 서 론

강우로부터 유출로의 변환과정은 자연유역 내 임의지점으로 유입된 물 입자가 지표면과 하천망의 상호작용을 통하여 유역의 출구로 유하해 가는 자연현상으로서 정의될 수 있다(Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996). 따라서 이러한 유출현상의 모의에 있어 하천망의 역할에 대한 정확한 평가는 결코 간과할 수 없는 중요한 요소 중 하나라 할 수 있다. 현재 DEM을 기반으로 한 하

천망의 추출에 이용되는 주요한 지리정보처리기술로는 수원의 정의에 해당하는 면적한계기준과 경사-면적한계기준 및 물 입자의 유동방향을 정의하는 8방향 모형, 다중방향모형 및 ∞방향모형 등을 찾아볼 수 있다. 이들은 각자 개별적인 장단점을 보유하고 있어 독립적으로 혹은 상호보완적으로 하천망의 추출과정에 적용된다. 하지만 이러한 과정을 통하여 추출된 하천망의 신뢰성에 대한 명확한 판단기준은 아직 제시되지 못하고 있다. 상기한 기술들 중에서 비교적 오랜 전통을 가지

2011년 9월 27일 접수, 2011년 10월 24일 채택

\* 정희원 · 한국수자원공사 K-water연구원 연구원(ace\_choi@hanmail.net)

\*\* 종신회원 · 한국수자원공사 물관리센터 연구원(ahnjm80@gmail.com)

\*\*\* 교신저자 · 한국수자원공사 K-water연구원 연구원(kjoocheol@hanmail.net)

고 있는 8방향 모형의 경우 DEM(Digital Elevation Model) 생성시의 오차로서 평가되는 sink나 peak를 제거하는 과정을 통해 결정되는 흐름방향에 의하여, 단일 유역의 경계 내에 포함되는 grid상의 모든 지점들이 한 개의 출구 지점에 연결되는 일종의 배수망(drainage network)을 제공하게 된다. 일반적으로 전술한 면적한계기준(O'callaghan and Mark, 1984; Tarboton et al., 1992)과 경사-면적 한계기준(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993)의 경우 이러한 배수망을 구성하는 격자별 기여면적이나 혹은 격자별 국부경사-기여면적의 관계에 따라 특정한 한계값을 결정하여 하천망의 추출을 수행하게 된다. 이는 배수망의 일부가 대상유역의 하천망을 대표할 수 있음을 의미하는 것이다. 하지만 이러한 한계값의 결정을 통하여 왜곡된 하천망 형상이 추출될 수 있음 또한 기존 연구를 통하여 제시된 바 있다(Montgomery and Dietrich, 1989). 따라서 본 연구에서는 상기한 하천망 추출과정을 거치지 않고 8방향 모형에 의하여 형성된 배수망을 대상으로 Strahler의 차수법칙에 따라 위상구조를 수립하여 각 사례별 하천망을 구성하여 이러한 변동이 지형학기반-수문학적 응답함수의 거동에 어떠한 영향을 줄 수 있는지를 시험하여 보고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 Strahler의 차수법칙에 따라 위상구조에 따라 하나의 하천으로 구성된 하천망에서부터 최고차 하천으로 구성된 하천망까지 각 하천망을 구성하였으며, 이와 더불어 대상 유역의 모든 격자가 지표면 또는 하천으로 구성될 경우를 추가적으로 구성하였다.

현재까지 수문응답특성에 영향을 주는 수문학적 요소는 지형학적 분산과 동수역학적 분산으로 대표되는 유속과 확산계수로 구분할 수 있으며(Rinaldo et al., 1991), 지형학적 측면에서 볼 때 가장 미시적인 유역배수구조의 구분은 지표면과 Strahler차수법칙에 따른 차수별 하천으로의 구분으로 볼 수 있다(Saco and Kumar, 2002). 따라서 이러한 배수구조를 모두 고려 한다면 지표면유동과 하천유동 사이의 구분 및 하천차수에 따른 수문학적 요소들의 변동특성이 명시적으로 포함하게 되는 것으로 하천지형법칙의 맥락에 따라 유역의 수문학적 응답특성이 갖는 공간변동성에 대한 해석이 가능해지게 된다. 그러나 이를 모두 고려할 경우 해당 모형의 실제 적용을 위해서는 유역 규모의 성장에 따라 추정되어야 할 매개변수의 개수가 상당수 증가하게 되어 모형의 매개변수 추정이 어려워진다. 따라서 본 연구의 초점은 이러한 유역의 동수역학 특성들의 공간적 변동성이 아닌 하천망의 해상도(발달)에 따른 지형학기반-수문응답함수의 영향에 대한 연구로 한정하였으며, 하

천망에서의 공간적 변동성은 고려하지 않았다. 또한 Botter and Rinaldo(2003)는 각각의 수문학적 응답함수의 통계적 특성(분산) 중 동수역학적 분산(확산계수)의 효과가 무시할 수 있을 정도로 작음을 규명한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 동수역학적 분산 항은 고려하지 않았다. 즉 하천망 해상도에 따른 수문학적 응답함수의 변화양상을 살펴보기 위해 배수유역 구조를 하천과 지표면으로 양분하였으며, 양자에 대해 각각 유역전반에 걸쳐 일정한 유속을 수문특성인자로 적용하였다.

## 2. 기본 이론

Strahler의 차수분류법을 기반으로 한 지형학기반-수문응답함수(GIUH, Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph) 모형의 일반식은 식 (1)과 같다(Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979).

$$f(t) = \sum_{\gamma \in \eta} P(\gamma) [f_{\omega}(t) * \dots * f_{\Omega}(t)]_{\gamma} \quad (1)$$

여기서  $\eta$ 는 물 입자의 배수경로인  $\gamma$ 의 모집단,  $P(\gamma)$ 는 임의의 추출한 물 입자가  $\gamma$ 를 통하여 배수될 확률, \*는 회선적분 연산자,  $\Omega$ 는 유역 내 최고차 하천상태이다.  $f_{\omega}(t)$ 는  $\omega$ 차 상태의 유하시간에 대한 확률밀도함수로서 식 (1) 우변의  $[\cdot]_{\gamma}$ 는  $\gamma$ 를 통하여 배수되는 물 입자의 총 유하시간에 대한 확률밀도함수를 의미한다. Rinaldo et al.(1991)은 식 (1)을 기반으로 확산방정식의 해석해를 차수별 평균대기시간의 확률밀도함수로 하여, 동수역학적 관점에서 식 (2)와 같은 확산유추-GIUH를 유도하였으며, 하천망의 수문학적 응답은 개별적인 하천구간내의 동수역학적 분산효과와 하천망의 형태로 인한 지형학적 분산효과로 구성됨을 제시하였다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_L t^3}} \sum_{\gamma \in \Gamma} P(\gamma) \bar{L}_{\gamma} \exp\left\{-\frac{(\bar{L}_{\gamma} - ut)^2}{4D_L t}\right\} \quad (2)$$

여기에서  $D_{L_{\omega}}$ 는 동수역학적 확산 계수( $m^2/s$ ),  $u_{\omega}$ 는 운동학적 파속( $m/s$ ),  $\bar{L}_{\gamma}$ 는 경로  $\gamma$ 의 평균 길이이다. 이후 D'odorico and Rigon(2003)은 Rinaldo et al.(1991)에 의해 정의된 Strahler의 차수법칙을 이용한 GIUH 모형에서의 지형학적 분산 개념을 다음 식 (3)과 (4)와 같이 일반적인 형태로 확장하였다. 만약 유역 내부에서 발생 가능한 모든 배수경로들 중에서 임의로 선택한  $i$ 번째 배수경로의 지표면 및 하천유하거리를 각각  $L_{h_i}$ ,  $L_{c_i}$ ,

모든 배수경로의 개수를  $n$ 이라 할 경우 유역 전반에 걸친 유하시간분포(또는 수문응답함수, 순간단위도 (IUH, Instantaneous Unit Hydrograph))의 평균 및 분산은 식 (3)과 (4)와 같다.

$$E[T] = \frac{E[L_h]}{u_h} + \frac{E[L_c]}{u_c} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Var[t] = & \frac{2D_c}{u_c^3} E[L_c] + \frac{2D_h}{u_h^3} E[L_h] + \frac{1}{u_c^2} Var[L_c] \\ & + \frac{1}{u_h^2} Var[L_h] + 2 \frac{Cov[L_c, L_h]}{u_c u_h} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $E[\cdot]$ ,  $Var[\cdot]$ ,  $Cov[\cdot, \cdot]$ 는 각각 기대치, 분산 및 공분산 연산자를,  $u_h$ ,  $u_c$ 는 각각 지표면 및 하천 유속을,  $D_h$ ,  $D_c$ 는 각각 지표면 및 하천에서의 확산 계수를 나타낸다. Rinaldo et al.(1991)는 식 (4) 우변의 첫 두 항을 각각 하천과 지표면에 대한 동수역학적 분산으로, 다음 두 항을 각각의 지형학적 분산으로 구분하였다. 전자의 동수역학적 분산은 GIUH의 분산 일부를 수로의 동수역학적 특성인 확산계수를 기반으로 정량화하고 있으며 후자의 지형학적 분산은 확산계수에 독립적인 형태로서 하천망의 기하학적 특성(혹은 배수경로의 이질성)이 순간단위도의 분산(혹은 형상)에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다. 이러한 영향에 대해 Botter와 Rinaldo(2003)는 자연 상태의 조건에 대한 수치실험을 통해 동수역학적 분산과 지형학적 분산의 상대적인 규모를 비교하였으며, 그 결과 동수역학적 분산의 규모가 지형학적 분산에 비해 매우 작기 때문에 이를 무시할 수 있음을 수치실험을 통해 입증한 바 있다. 마지막 항의 지표면과 하천 경로길이의 공분산은 지형학적 형상에 기인하는 유역의 지표면(또는 하천)의 형태학적 특성을 나타내는 것으로 Di Lazzaro(2009)는 수문응답함수에서 이러한 공분산의 영향을 비중있게 고려할 것을 제시하였다. 이러한 이론적 배경에 따라 본 연구에서는 동수역학적 분산을 대표하는 앞의 두 항은 고려하지 않았으며, 나머지 세 항만을 적용하여 수문응답함수를 산정하였다.

대상유역의 지형인자와 더불어 수문학적 응답함수를 결정짓는 유역의 수리학적 특성인 지표면 및 하천 유속은 식 (3)과 (4)를 연립함으로서 다음과 같이 산정된다 (Di Lazzaro, 2009).

$$u_{cl,2} = \frac{a \pm b}{c} \quad (5)$$

$$u_{h1,2} = \frac{u_{cl,2} E[L_h]}{u_{cl,2} E[T] - E[L_c]} \quad (6)$$

여기서 식 (5)의  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a = & E[L_c] \{ -cov[L_h, L_c] E[L_h] E[T] \\ & + E[L_c] Var[L_h] E[T] \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} b = & E[L_h] E[L_c] \\ & \left\{ E^2[T] (Cov^2[L_h, L_c] - Var[L_h] Var[L_c]) \right. \\ & \left. + Var[T] (-2Cov[L_h, L_c] E[L_h] E[L_c] \right. \\ & \left. + E^2[L_c] Var[L_h] + E^2[L_h] Var[L_c]) \right\}^{0.5} \end{aligned} \quad (8)$$

$$c = E[L_c] \{ Var[L_h] E^2[T] - E^2[L_h] Var[T] \} \quad (9)$$

식 (5)와 (6)으로부터 한 개의 유역에 대하여 두 쌍의 지표면 및 하천유속이 산정됨을 알 수 있으며, Di Lazzaro(2009)는 이러한 두 쌍의 특성유속 중 음의 값을 갖거나 지표면과 하천유속이 미소한 차이를 갖는 경우에는 산정값에서 제외 할 것을 제안하였다.

대상유역의 수문응답함수는 Nash(1957) 모형을 적용하여 산정하였다. Nash는 유역을 직렬로 연결된  $n$ 개의 동등한 선형 저수지로 구성하여 유역의 수문응답함수를 유도하였으며, 수문응답함수는 다음 식 (10)과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{K} \frac{1}{\Gamma(n)} \left( \frac{t}{K} \right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (10)$$

여기에서  $\Gamma(\cdot)$ 는 gamma함수를 나타낸다. 식 (10)은 배수유역의 순간단위도에 대한 일반식으로서  $n$ 과  $K$ 는 각각 순간단위도의 형상과 규모매개변수로 선형저수지의 개수와 저류상수로 정의되는 gamma분포 확률밀도함수와 일치한다. 주목할 것은 선형저수지의 개수  $n$ 이 반드시 정수일 필요가 없다는 것이다. 이것은 선형저수지는 완전히 개념화된 성분으로서, 선형저수지의 개수  $n$ 은 유역의 물리적 규모 뿐만 아니라 형상, 면적 및 배수망의 효과 등을 통하여 대상 유역 순간단위도의 형상을 설명하는 복합적 매개변수이기 때문이다. 최용준 등(2010)은 식 (5)~(9)의 유속들과 대상유역의 지형인자를 결합하여 식 (10)의 매개변수인  $n$ 과  $K$ 를 다음과 같이 유도한 바 있다. 본 연구에서는 이 식들을 이용하여 Nash 모형의 매개변수를 산정하였다.

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

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

표 1. Drainage Path Lengths and Estimated Characteristic Velocities in Tanbu Basin(by Using Blue Line of DEM)

$E[L_c]$ (m)	$Var[L_c]$ (m <sup>2</sup> )	$E[L_h]$ (m)	$Var[L_h]$ (m <sup>2</sup> )	$Cov[L_h, L_c]$ (m <sup>2</sup> )	$u_h$ (m/s)	$u_c$ (m/s)
11,437	36,914,100	509	259,422	511,887	0.030	0.671

### 3. 적용 및 분석결과

#### 3.1 대상 유역 및 대표 매개변수 산정

본 연구의 대상유역은 국제수문개발계획(IHP, International Hydrological Project) 대표유역인 금강수계의 보청천 유역 중 탄부 수위표를 출구로 하는 소유역(이하, 탄부 유역)을 선정하였다(그림 1(a)). 탄부 유역(유역면적 : 77.5km<sup>2</sup>)은 보청천 유역 중 유일한 지류유역으로 유역의 대표 매개변수는 수치지형도상의 실제 하천망(blue line)을 이용하여 산정 하였다. 수치지형도의 축척은 1:25,000, 격자 해상도는 20 m를 적용하였다. 대상유역의 실제하천망에 대한 Strahler의 차수법칙에 따른 위상구조는 4차 하천으로 분류된다. 대상유역에 대한 식 (5)~(9)의 지표면 및 하천유속을 산정하기 위한 지체시간( $E[T]$ ) 및 분산 ( $Var[T]$ )은 한국건설기술연구원(2000)에서 제시한 유역 대표값을 적용하였다. 적용된 탄부 유역의 지체시간 및 분산은 각각 9.42 hr, 32.25 hr<sup>2</sup>이다. 또한 대상유역의 실제하천망에 대한 지형분석결과는 표 1의 (1)~(5)란과 같다. 이상의 자료를 이용해 산정된 식 (5)~(9)의 지표면 및 하천 유속은 표 1의 (6)~(7)란과 같이 각각 0.030 m/s, 0.671 m/s로 나타났다. 이러한 결과값은 D'odorico and Rigon (2003)가 제시한  $u_h$ (0.001~0.1m/s) 및  $u_c$ (0.5~4.0m/s)의 범위 내에서 추정되었으므로 본 연구 수행을 위한 대표 매개변수로 결정하였다.

#### 3.2 하천망 해상도에 따른 지형분석

대상유역에 대해 8방향 모형에 의하여 형성된 배수망을 대상으로 Strahler의 차수법칙에 따라 위상구조를 수립하여 유역 내 단 한개의 하천만이 존재하는 경우부터 최대 하천이 존재 하는 경우까지 각 사례별로 하천망을 구성하였다. 이러한 지형분석은 Utah Univ.의 David Tarboton이 개발한 TauDEM(Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) 프로그램을 이용하였다. TauDem은 ArcMap의 Extension 모듈로서 본 연구 적용시에는 실제하천망을 flowpath로 하여 하천망을 구성하였다. 여기에서 flowpath를 이용하는 방법은 수문학 분야에서 유역분할 및 하천망 생성기법 등에 널리 이용되는 BurnDEM과 동일한 방법이다. 대상유역의 DEM으로부터 TauDEM 프로그램을 실행한 결과 탄부 유역은 최대 8차 하천까지 존재하는 것으로 나타났다. 그림 1의 (c)~(j)는 이상의 프로그램을 이용하여 대상 유역 내 1차 하천만 존재하는 경우(c)부터 최대 8차 하천까지 존재하는 경우(j)를 나타낸 것이다. 그림 1(a)의 실제하천망은 (f)와 (g) 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이상의 8가지 경우와 더불어 유역 내 모든 격자가 지표면(b)인 경우와 모든 격자가 하천(k)인 경우를 추가하여 총 10개의 경우로 구성하였다. 대상유역 내 각 격자가 유역 출구점까지의 지표면 및 하천 배수경로 길이는 Turker et al.(2001)가 제시한 개념을 적용하였으며, ArcInfo의 FLOWLENGTH 함수를 이용하여 산정하였다. 이러한 분석절차에 의해 수행된 각 경우 별 지형분석 결과는 다음 표 2와 같다.

표 2. Results of Geomorphologic Analysis by Using DEM about Each Case in Tanbu Basin

Case	Channel		Hillslope		$Cov[L_h, L_c]$ (m <sup>2</sup> )
	$E[L_c]$ (m)	$Var[L_c]$ (m <sup>2</sup> )	$E[L_h]$ (m)	$Var[L_h]$ (m <sup>2</sup> )	
I	-	-	12,004	39,342,876	-
II	8,570	26,345,431	3,433	5,411,532	3,792,960
III	9,175	33,205,369	2,829	4,852,240	642,646
IV	10,687	41,404,849	1,316	1,130,926	-1,596,440
V	11,411	38,822,121	593	205,512	157,604
VI	11,683	39,577,562	321	66,411	-150,524
VII	11,825	39,506,630	179	20,741	-92,250
VIII	11,899	39,452,720	105	8,982	-59,376
IX	11,950	39,352,662	53	4,431	-7,069
X	12,004	39,342,876	-	-	-

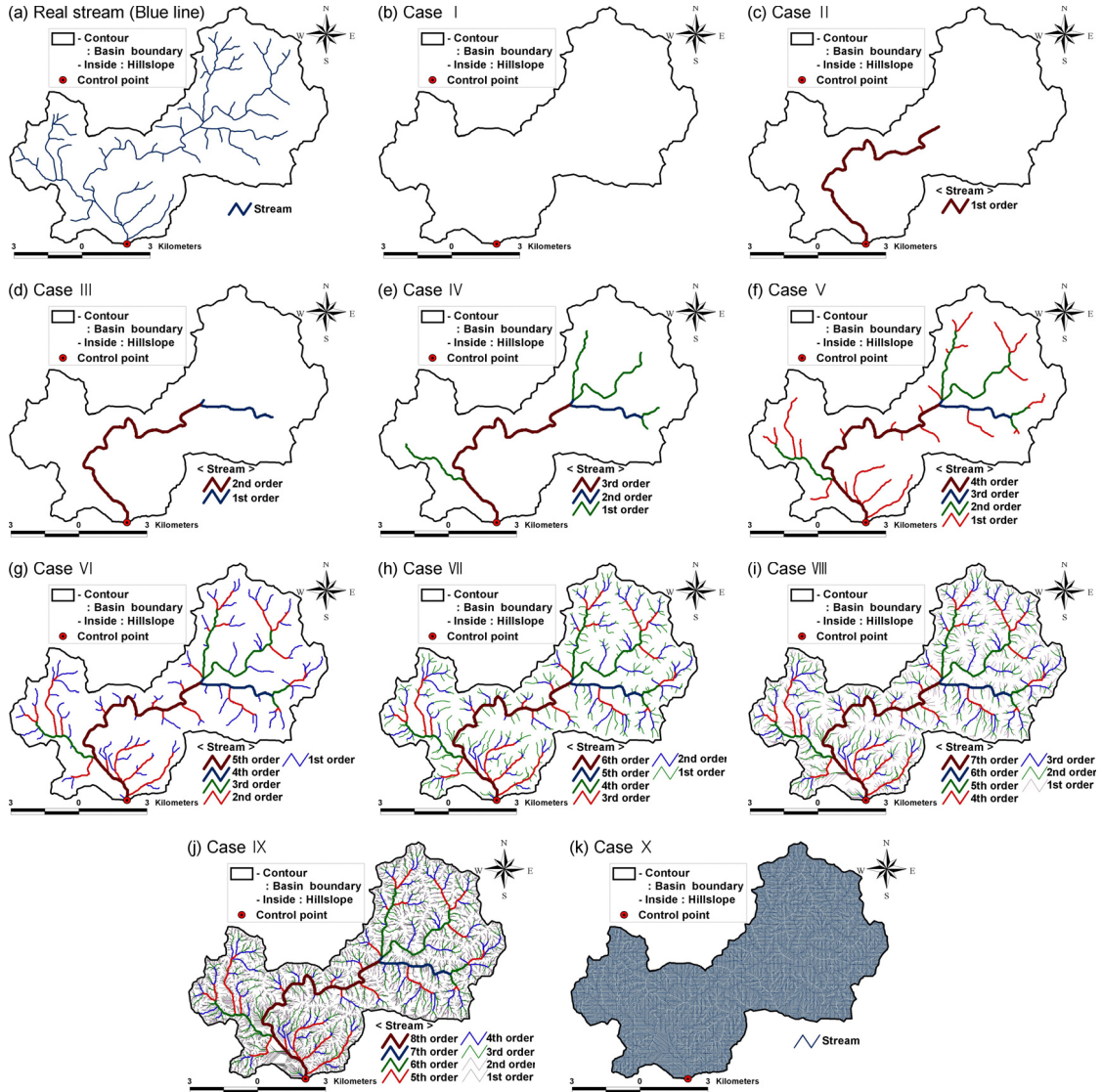


그림 1. Real(Blue Line) and Composed Stream Networks in Tanbu Basin

### 3.3 분석결과

하천망의 해상도(발달)에 따른 수문응답함수의 변화 양상을 살펴보기 우선 수문응답함수의 매개변수를 산정하였다. 표 1의 유역 수리학적 대표매개변수 및 표 2의 지형분석 결과를 바탕으로 산정된 식 (11), (12)의 수문응답함수의 매개변수  $n$ 과  $K$  값은 다음 표 4의 (2)~(3)란과 같다. 개념적인 선형 저수지의 개수(수문응답함수의 형상매개변수)  $n$ 은 하천망의 발달에 따라 일관된 경향을 나타내지 않았다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이  $n$ 은 유역의 물리적 규모 뿐 만 아니라 형상,

면적 및 배수망의 효과 등을 통하여 대상 유역 순간단위도의 형상을 설명하는 복합적 매개변수이기 때문이다. 반면 저류상수(수문응답함수의 규모매개변수)  $K$ 는 하천망이 발달함에 따라 작아지는 경향을 나타냈다. 이러한 원인은 하천망이 발달함에 따라 지표면 유속에 비해 상대적으로 큰 하천유속의 영향 때문으로 판단된다. 같은 이유로 인해 표 3의 (4)~(6)란의 침투유량, 침투 시간 및 수문응답함수의 평균( $E[t]$ ; 지체시간, lag time) 역시 일관된 경향성을 나타냈다. 즉, 하천망이 발달에 따라 대상유역 내 하천 셀 격자가 많아지므로 상

표 3. Characteristics of IUH and Each Variance and Its Ratio to the Total Variance

Case	n	K (hr)	Peak discharge (mm/hr)	Peak time (hr)	Lag Time (hr)	Variance (hr <sup>2</sup> )						
						Total	Channel	Hillslope	Covariance			
I	3.662	30.197	0.008	80	110.59	3,339.62	-	(0.00)	3,339.62	(1.00)	-	(0.00)
II	2.511	14.008	0.022	21	35.18	492.80	4.51	(0.01)	459.36	(0.93)	28.93	(0.06)
III	2.111	14.147	0.025	16	29.86	422.47	5.69	(0.01)	411.88	(0.97)	4.90	(0.01)
IV	3.013	5.493	0.049	11	16.55	90.92	7.09	(0.08)	96.00	(1.06)	-12.18	(-0.13)
V	4.101	2.484	0.089	8	10.19	25.30	6.65	(0.26)	17.44	(0.69)	1.20	(0.05)
VI	5.392	1.446	0.128	6	7.80	11.27	6.78	(0.60)	5.64	(0.50)	-1.15	(-0.10)
VII	5.465	1.197	0.153	5	6.54	7.83	6.77	(0.86)	1.76	(0.22)	-0.70	(-0.09)
VIII	4.908	1.200	0.163	5	5.89	7.07	6.76	(0.96)	0.76	(0.11)	-0.45	(-0.06)
IX	4.179	1.300	0.167	4	5.43	7.06	6.74	(0.95)	0.38	(0.05)	-0.05	(-0.01)
X	3.662	1.357	0.172	4	4.97	6.74	6.74	(1.00)	-	(0.00)	-	(0.00)

대적으로 빠른 하천유속의 영향범위가 커져 침투시간 및 지체시간이 지수적으로 작아지며, 이로 인해 유량이 집중되어 침투유량이 커지게 되는 것으로 판단된다. 또한 표 3의 (7)란의 총 분산 ( $Var[t]$ ) 역시 지수적으로 작아짐을 볼 수 있었다. 그림 2(a)를 보면 이러한 경향을 쉽게 볼 수 있다. 그림 2는 식 (10)에 의한 수문응답함수로서, (a)는 모든 경우의 경향을 살펴보기 위해 x축의 시간을 140시간으로 하여 나타낸 것이며, (b)는 침투부분의 경향을 좀 더 살펴보기 위해 시간축을 30시간으로 나타낸 것이다. 마지막으로 (c)는 그림 2의 (a),

(b)에서 잘 표현되지 못하고 있는 case I을 살펴 보기 위해 시간축과 수문응답함수의 종거축을 조정하여 나타낸 것이다.

표 3의 (8)~(10)란은 본 연구에서 적용된 식 (4)의 3~5항(하천 및 지표면의 지형학적 분산과 양자간의 공분산)을 표시한 것으로 괄호안의 숫자는 총 분산에 대한 각 요소의 기여도를 나타낸 것이다. 하천망의 발달이 적은 경우(case I~V)에서는 지표면의 지형학적 효과가 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 반대의 경우에는 하천망의 지형학적 분산효과가 더 크게 나타남을

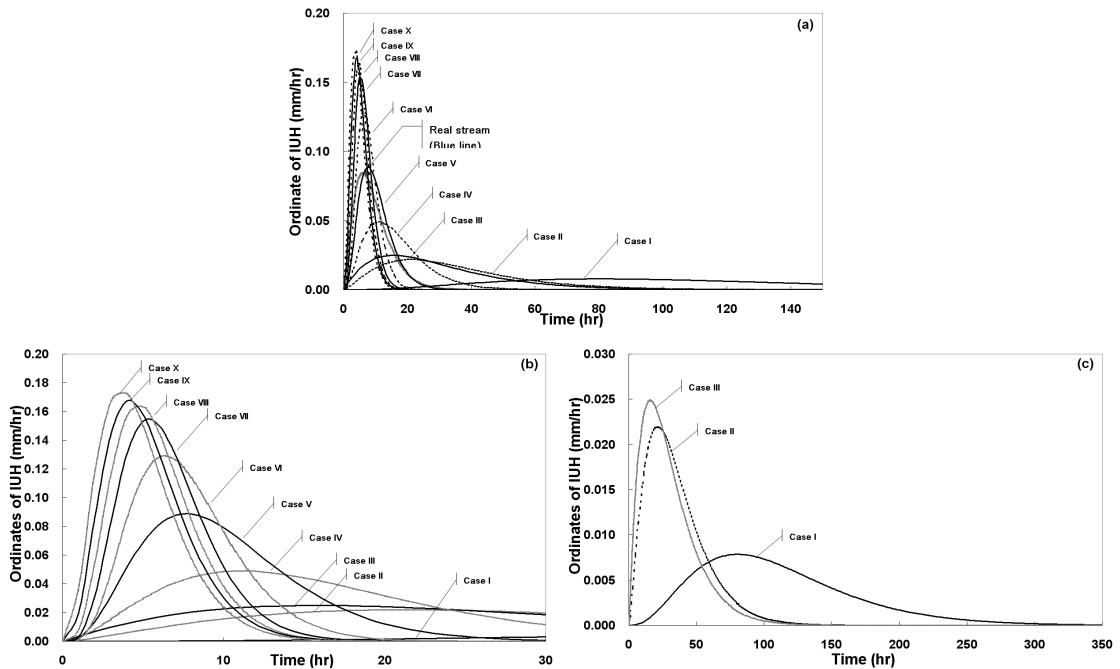


그림 2. Hydrological Response Function for Each Channel Networks Resolution

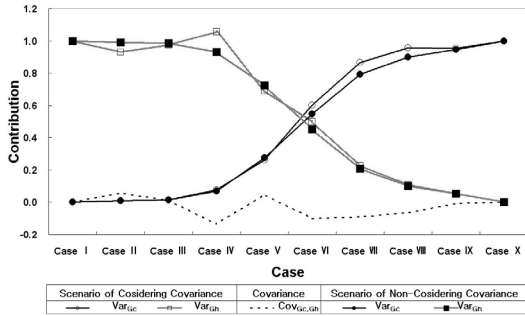


그림 3. Variation of Each Variance; Cases for considering and non-considering covariance

알 수 있었다. 우리나라의 자연 하천의 경우 대부분 전자의 경우에 속하므로 지표면에서의 지형학적 분산 효과가 더 우세하게 나타날 것으로 예상된다.

또한 지표면과 하천의 공분산은 하천망의 생성시의 지표면과 하천의 형태학적 특성에 따라 양의 값과 음의 값이 계속 변화하는 것으로 볼 수 있었으며, 총 분산에 대해 최소 1%에서 최대 13%까지 영향을 주는 것으로 나타났다. 즉 공분산 역시 경우에 따라서는 수문응답함수의 형상 결정에 매우 중요한 요소로 작용할 수 있음을 간접적으로 확인 할 수 있었다. 그림 3은 이러한 공분산의 영향을 고려하지 않았을 경우(solid symbol)와 공분산을 고려했을 경우(blank symbol)를 비교한 것으로, 비록 공분산의 기여도는 지표면과 하천의 지형학적 분산 효과보다는 상대적으로 작지만, 이로 인해 다른 요소들의 값 또한 변화함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유역의 하천망 해상도(발달)에 따른 수문응답함수의 변화양상을 살펴보기 위하여 Strahler 차수법칙을 바탕으로 유역의 하천망을 확장 시켜가며 수문응답함수의 변화를 살펴보았다. 대상유역의 수치지형도상의 실제하천망에 대한 수문 응답함수의 통계적 특성은 생성된 가설 하천망 중 Case V와 VI의 결과와 유사하게 나타났으며, 이는 실제 수치지형도상의 하천망의 현재 발달 상태가 Case V와 VI 사이에서 위치하고 있기 때문인 것으로 판단된다(그림 1 참조). 또한 하천망 발달에 따른 수문응답함수 변화양상 분석결과 하천망이 발달함에 따라 유역의 수문응답함수의 침투유량은 크게 나타나며, 침투시간은 작아지는 양상을 보였다. 응답함수의 통계적 특성을 살펴 본 결과 하천망의 발달에 따라 유하시간의 평균(지체시간)과 분산이 지수

적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 하천과 지표면 유속의 상대적인 차이 및 하천의 영향 범위의 변화로 인해 나타나는 현상으로 판단된다. 또한 지표면과 하천 배수경로 길이의 공분산에 의한 지표면(혹은 하천)의 형태학적 특성은 경우에 따라 수문응답함수 형상결정에 비교적 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 즉, 유역 내 하천망의 과도한 발달은 침투홍수량의 증가 및 침투유량이 발생하는 침투시간의 감소를 초래 할 것으로 예상되며, 홍수량 또한 시간적으로 매우 집중되어 발생하게 될 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

1. 최용준, 김주철, 정관수, 2010, 배수경로이질성을 기반으로 한 Nash 모형의 매개변수 동정, 한국수자원학회 논문집, 제43권, 제1호, pp.1-13.
2. 한국건설기술연구원, 2000, 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구·합성단위도 개발을 중심으로.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E., 1989, Source Area, Drainage Density, and Channel Initiation, Water Resources Research, Vol.25, No.8, pp.1907-1918.
7. 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.
8. Nash, J. E., 1957, The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, IASH Assemblée Générale de Toronto, Vol.45, pp.114-121.
9. O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M., 1984, The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data, Computer Vision, Graphics And Image Processing, Vol.28, pp.324-344.
10. Rinaldo, A. and I. Rodriguez-Iturbe, 1996, The Geomorphological Theory of the Hydrologic

- Response, Hydrological Processes, Vol.10, No.6, pp.803-844.
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 Valdes, J. B., 1979, The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response, Water Resources Research, Vol.15, No.6, pp.1409-1420.
  13. Saco, P. M. and Kumar, P., 2002, Kinematic Dispersion in Stream Networks -1. Coupling Hydraulics and Network Geometry, Water Resources Research, Vol.38, No.11, 1244, doi:10.1029/2001 WR000694.
  14. Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I., 1992, A Physical Basis for Drainage Density, Geomorphology, Vol.5, pp.59-76.
  15. 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.