

DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현

Morphological Representation of Channel Network by Dint of DEM

김 주 철* / 김 재 한**

Kim, Joo Cheol / Kim, Jae Han

Abstract

The procedures for identifying channel network are suggested by exploring the scaling property between the local slope and the contributing area, given that the area threshold criterion is an indispensable complement to the slope-area threshold criterion. Through the use of the above procedures and the field data, the basin slopes illustrate the trends of large scatters in space for the geomorphologic/topographic factors. According to the scaling regimes of them both the forms of landscape can be classified as topographic divergence and convergence. The presentation of the procedures proposed in this study is implemented in the case study on Seolma experimental catchment in Korea. As a result the dynamic behaviors of basin are confirmed, and thus the dynamics of channel head advance and channel network are shown to represent better than the method using the topographic chart manually.

keywords : local slope, area threshold criterion, slope-area threshold criterion, DEM, channel network

요 지

DEM을 이용하여 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성을 조사하여 면적한계기준과 경사-면적한계 기준이 상호보완적인 형태의 수로망 추적절차를 제시하였다. 상기방법과 현장자료에 대한 적용을 통하여 유역의 경사는 공간적으로 대규모의 산포경향을 갖는 지형인자임을 확인할 수 있었다. 양자의 규모에 따른 거동특성권역에 따라 지면의 형상은 발산지형과 수렴지형으로 분류될 수 있었다. 본 연구에서 제시한 수로망 동정 절차를 설마천 시험 유역에 대하여 수행한 결과 유역의 동적 거동을 확인할 수 있었다. 또한 이로부터 지형도를 이용한 수작업에 기초한 방법에 비하여 하천두부의 거동과 수로망의 동적특성을 잘 표현하고 있음을 볼 수 있었다.

핵심용어 : 국부경사, 면적한계기준, 경사-면적한계기준, DEM, 수로망

1. 서 론

유역규모(basin scale)의 강우-유출 현상에 대한 포괄적 이해와 이를 기초로 한 배수구조에 대한 명확한

규명은 수문학분야에서 지속적으로 추구되어지는 주된 연구목표들 중의 하나이다. 이를 위하여 반드시 고려되어야 할 중요한 요소로서 유역 내 지표면(overland)의 규모나 수로망(channel network)의 범위에 대한 합리적

* 충남대학교부속 산업기술연구소 연구원

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

** 충남대학교 토목공학과 교수

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

계량을 들 수 있다. 하천유역수문학의 경우 수많은 수로들로 구성된 수로망 내에서의 물과 유사의 움직임에 주의를 집중한다. 그러므로 유역규모의 이송과정에서 수로망기하학은 대단히 중요한 역할을 한다(김재한, 2005). 예를 들어, 물리적으로 기초한 수문학적 모형들(Brutsaert and Nibber, 1977; Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979)의 경우 배수밀도나 차수별 하천길이 등과 같은 수로망의 형태적 속성들은 해당모형의 매개변수를 구성하게 된다. 따라서 이로부터 유도되는 각종 수문학적 응답함수들이 대상유역내 수로망의 형상에 직접적인 영향을 받게 될 것은 자명하므로, 물리적으로 기초한 강우-유출 해석은 관련된 지형인자들에 대한 정확하고 객관적인 평가를 바탕으로 수행되어야만 할 것이다.

우효섭(2001)은 한반도에서 자연하천은 최상류를 제외하고는 대부분 충적하천(alluvial river)으로 보고하고 있다. 따라서 우리나라의 하천은 대부분 이동상(移動床) 하천으로 구성되므로 시/공간적으로 항상 변화하고 있다고 간주될 수 있다. 이와 같은 경우, 수로망의 형태에 관한 연구가 수로망의 생성이력(historic processes)은 무시되었을지라도 통계적 또는 확률적 접근법에 따라 오래전부터 수행되어 왔다(Strahler, 1964; Shreve, 1966; Willgoose et al., 1991a). 또한 이와 같은 견지에서, 수문학자들은 홍수응답에 대한 지형인자들의 영향을 매개변수화하고자 시도하여 왔다(Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979). 이들로부터 얻어진 차수법칙의 정량화는 홍수유출 수문곡선에 민감하게 반응하며, 정확한 유출량 산정을 위해 수로망의 형태에 대한 보다 세밀한 연구가 요구된다. 최근에는 이를 위하여 DEM(Digital Elevation Model; 수치고도모형)으로부터 수로망의 실제 크기를 논해주는 연구들이 대두되고 있는 실정이다(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993).

과거 약 20여 년간에 걸친 DEM을 기반으로 한 지리 정보처리 기술의 발달은 각종 지형인자들에 대한 자동 추출을 가능하게 하였다. 특히 O'Callaghan and Mark(1984)가 수로를 형성하기 위한 한계지지면적(critical support area; threshold area)의 개념을 제시한 이래로 DEM으로부터 수로망을 동정(identification)하기 위한 각종 기법들이 제시되어 오고 있다. 이들은 대체로 DEM을 구성하는 pixel을 지표면성분과 수로성분으로 분류하는 기준에 따라 면적한계기준(O'Callaghan and Mark, 1984; Tarboton et al., 1992)과 경사-면적한계기준(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993)의 범주로 구분되어진다. 주로 수문학분야에서 수로망의 동정에 적용되고 있는 면적한계기준은 유역 내에서 수

로가 형성되기 위한 최소배수면적의 값, 즉 전술한 한계지지면적의 추정을 필요로 한다. 실용적 관점에서 이 값은 흔히 모의된 수로망과 지형도 수로망(blue line) 사이의 시각적 유사성(visual similarity)에 기초하여 선택되어 지곤 한다(합창학, 1995; 김주철, 2004). 1990년대 초반 MIT의 Ralph M. Parsons Laboratory에서는 수문학자 Bras와 Rodríguez-Iturbe 등이 중심이 되어 한계지지면적의 객관적 추정 및 지면진화(landscape evolution) 과정을 모의하기 위한 일련의 연구들이 수행된 바 있다(Tarboton et al., 1989, 1991, 1992; Willgoose et al., 1991, 1991a, 1991b). 이들은 수문학적 관점에서 link(Smart, 1972)의 경사와 기여면적 사이의 관계에 주목하였는데, 대표적인 연구 성과로서 Tarboton et al.(1992)은 양자 사이에는 규모에 따른 개별적인 거동특성이 존재하고 그 변환점의 기여면적이 수로와 지표면을 구분하기 위한 한계지지면적에 해당함을 제안하였다. 비슷한 시기에 Montgomery and Dietrich(1988, 1989, 1992)는 지질학적 관점에서 수로망의 범위에 대한 접근을 시도한 바 있다. 이들은 하천두부(河川頭部)(혹은 수원; channel head, source)의 위치에 주목하여, 소규모 산악지역에 대한 정밀한 측량결과를 바탕으로 수로개시(channel initiation; 혹은 수로의 형성)에 관한 연구결과를 발표하였다. 여기서 무한사면안정모형(infinite slope stability model)과 지하지표유출모형(subsurface runoff model)이 결합된 하천두부의 기여면적에 대한 이론적 모형이 소개되는데, 눈길을 끄는 것은 제시된 모형의 독립변수들의 복합적 구성으로 이는 Tarboton et al.(1992)의 주장과는 달리 수로개시 여부는 한계지지면적에 대한 고려만으로는 결정될 수 없음을 강하게 시사하고 있다. 후속 연구결과를 통하여 Montgomery and Foufoula-Georgiou(1993)는 Tarboton et al.(1989, 1991, 1992)의 연구결과가 가지는 논리적 오류를 비판적으로 지적하고, 하천두부의 국부경사(local slope)와 기여면적 사이의 관계를 분석하여 수로망을 동정하기 위한 한계기준으로는 양자가 결합된 경사-면적한계기준이 보다 타당함을 제시하였다. 이후 Ijjasz-Vasquez and Bras(1995)는 선행연구 성과들을 바탕으로 DEM으로부터 산정된 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성을 세분화하여 경사-면적한계기준을 수문학적 관점에서 적용할 수 있는 방법론을 제안하였다.

이상의 연구배경을 바탕으로 본 연구에서는 유역의 국부경사와 기여면적 사이의 거동특성을 고려하여 DEM으로부터 합리적으로 수로망을 동정할 수 있는 절차를 제시해 보고자 한다. 이러한 시도의 주된 의도는

지형인자로서 경사의 중요성에 주목해 보고자하는 것이다. 경사는 유역의 3차원적 지형특성을 반영하는 매우 중요한 요소로서 평가할 수 있다. 하지만 지금까지 다른 지형인자들에 비하여 이론적 발전이 미흡한 실정에 있다. Rodríguez-Iturbe and Rinaldo(2003)는 이러한 현상의 원인으로 비교적 최근이야 DEM의 광범위한 적용이 가능해졌음을 언급한 바 있다. 이는 종이지도에 기반을 둔 전통적인 방법이 갖는 유역특성경사의 정의 및 계량의 난점을 지적하고 있다. 또한 경사는 공간적 변동성이 매우 큰 지형인자로서 일관성 있는 거동특성의 파악 역시 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 DEM으로부터 비교적 쉽고 객관적으로 정의 및 계량이 가능한 국부경사에 대한 분석을 통하여 합리적인 수로망의 동정절차를 수립해 보고자 하는 것이다. 이를 위하여 현재 수로망의 동정에 적용되고 있는 한계기준들의 배경을 이루는 기본 가설들을 면적한계기준과 경사-면적한계기준을 중심으로 이론적으로 검토하고, 실용적 측면에서 이들을 상호보완적으로 적용할 수 있는 방법론을 모색하여 보았다. 본 연구를 통하여 얻어지는 결과들은 자연유역의 배수구조에 대한 이해를 향상시킬 수 있는 수단을 제공할 것이고, 특히 최근 적용 사례가 늘어나고 있는 분포형 강우-유출모형의 합리적 운용을 위한 길잡이가 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경 및 가설

현재 DEM을 이용한 수로망의 동정에 적용되고 있는 각종 한계기준들은 대부분 다음과 같은 경사와 면적 사이의 관계에 대한 가설을 그 배경으로 하고 있다 (Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995).

- 1) 유역내 임의 지점에 대한 특성경사와 기여면적(혹은 배수면적) 사이에는 규모에 따른 일정한 거동 응답(scaling response)이 존재하고,
- 2) 이들은 개별적인 거동특성권역(scaling regimes)을 형성하며,
- 3) 이러한 권역들 사이의 변환점(break points)이 수로를 정의하는 한계기준에 해당한다.

2.1 수로경사와 배수면적 사이의 거동특성

유역의 대표적인 특성경사인 수로경사는 배수면적이 증가함에 따라 다음과 같이 멱함수(power function)의 형태로 감소하는 경향을 보인다(Tarboton et al., 1992).

$$S = CA^{-\theta} \quad (1)$$

여기서 S 는 수로경사, A 는 배수면적 그리고 C, θ 는 각각 비례상수와 멱수이다. Eq. (1)은 수로경사와 배수면적 사이에 존재하는 규모에 따른 거동특성을 묘사하는 관계식으로서 Horton의 배수구성법칙에 대한 고려로부터 Eq. (2)와 같이 추론될 수 있다(Flint, 1974).

$$S_w = \left\{ \frac{S_\Omega R_S^\Omega}{(A_1 R_A^{-1})^{-\frac{\log R_S}{\log R_A}}} \right\} A_w^{-\frac{\log R_S}{\log R_A}} \quad (2)$$

여기서 S_w, A_w 는 각각 w 차 하천의 평균경사 및 배수면적, R_S, R_A 는 각각 경사비와 배수면적비 그리고 Ω 는 유역의 차수이다. Flint(1974)는 Eq. (1) 혹은 (2)의 멱수들이 대부분의 수로망에 대하여 거의 유사한 평균값을 가짐을 제시한 바 있다. 이로부터 유역의 수로경사와 기여면적 사이에는 Eq. (1)과 같은 형태의 일정한 거동응답이 존재함을 확인할 수 있다.

2.2 지면의 형상에 따른 거동특성권역의 분류

유역규모의 유사이송현상은 다음과 같이 유사에 대한 연속방정식과 성분방정식으로 표현할 수 있다 (Willgoose et al., 1991a).

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \quad (3)$$

$$q_s = k_1 S + k_2 q^m S^n \quad (4)$$

여기서 z 는 지면의 표고, q_s 는 단위폭 당 유사이송량, q 는 단위폭 당 유량, S 는 최급하향경사(the steepest downhill slope) 그리고 k_1, k_2 와 m, n 은 각각 비례상수와 멱수이다. 일반적으로 유사이송현상은 Eq. (4)와 같이 경사에만 종속적인 hillslope process(제 1항)와 유량 및 경사에 동시에 종속적인 fluvial process(제 2항)로 구분될 수 있다(Tarboton et al., 1992; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993). 따라서 이를 각각 Eq. (3)에 개별적으로 대입하면 유사이송현상에 따른 지면의 진화과정을 Eq. (5)와 같이 모의할 수 있다 (Willgoose et al., 1991a).

$$\frac{\partial z}{\partial t} = D_z \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (5a)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s(1-n)} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) \quad (5b)$$

여기서 $D_z (= k_1)$ 는 표고의 확산계수, 그리고 ρ_s 와 n 은 각각 토양의 밀도와 공극율이다. 이로부터 지배적인 유사이송현상의 종류에 따라 유역내부에는 상이한 지면의 형상이 나타나게 될 것을 예상할 수 있다.

Tarboton et al.(1992)은 Smith and Bretherton(1972)이 제시한 유사이송현상에 의한 지면의 안정조건으로부터 특성경사와 기여면적 사이의 거동특성권역을 Eq.(6)에 따라 분류한 바 있다.

$$a \frac{\partial q_s}{\partial S} \frac{dS}{da} = q_s - a \frac{\partial q_s}{\partial a} \quad (6)$$

여기서 Eq. (6)의 우변은 Eq. (4)의 단위폭 당 유량 q 를 단위폭 당 배수면적 a 로 치환($q = c_1 a^b$)할 경우의 지면의 안정조건으로서, 음의 값을 가질 경우 지면에는 간헐천 형태의 우열(雨裂, gully)이 발생하고 양의 값을 갖게 되면 이들이 사라지는 것으로 알려져 있다(Smith and Bretherton, 1972). 따라서 지배적인 유사이송현상이 Eq. (4)의 제 1항(hillslope process)으로부터 제 2항(fluvial process)으로 천이할 경우 지면에는 Eq. (6)의 우변에 따라 안정조건과 불안정조건이 각각 나타나게 됨을 알 수 있다. 한편 Eq. (6)의 좌변에 포함된 도함수 $\partial q_s / \partial S$ 는 항상 양의 부호를 취할 것이 예상됨으로 결국 우변의 부호는 도함수 dS/da 에 따라 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\frac{dS}{da} > 0; \text{ hillslope process} \quad (7a)$$

$$\frac{dS}{da} < 0; \text{ fluvial process} \quad (7b)$$

이로부터 지배적인 유사이송현상의 천이 및 이에 따른 지면형상의 변화에 따라 특성경사와 기여면적 사이에는 개별적인 거동특성권역이 존재함을 알 수 있다. 여기서 Eq. (1)에 대한 도함수가 Eq. (7b)의 fluvial process에 의한 불안정조건을 만족하고 있음이 주목된다.

2.3 한계기준에 대한 이론적 가설

Eq. (7)로부터 도함수 dS/da 의 유역내 거동이 반전(reversal)을 나타내는 지점에서 지배적인 유사이송현상의 천이가 발생하고 이를 전후하여 상이한 지면의 형상이 나타나게 될 것을 쉽게 예상할 수 있다. 만약 여기서 Eqs. (7a) and (7b)를 각각 지표면과 수로의 개별적 거동특성으로 가정할 경우, 천이점의 배수면적은 수로

를 형성하기 위한 한계지지면적에 해당하게 된다. 이상의 가설을 배경으로 Tarboton et al.(1992)은 실무적으로 널리 적용되고 있는 면적한계기준을 이론적으로 체계화하고, link의 경사와 기여면적 사이의 관계를 적용하여 일정 한계지지면적을 결정하는 절차를 제시하였다. 하지만 대부분의 적용사례에서 Eq. (7)과 같은 반전 형태의 거동특성보다는 굴절(inflexion) 형태의 거동특성이 관측되었음을 언급한 바 있는데 이들은 이러한 현상의 원인으로 DEM의 생성과정에서 발생하는 noise를 제시하였다.

Montgomery and Foufoula-Georgiou(1993)는 Tarboton et al.(1992)이 제안한 면적한계기준 가설의 논리적 오류를 지적하고 수로망을 동정하기 위한 한계기준으로는 경사-면적한계기준이 보다 타당함을 제안하였다. 이들은 유역내 지면은 등고선의 양상에 따라 Fig. 1과 같이 발산지형(topographic divergence; hillslope)과 수렴지형(topographic convergence; valley)으로 구분할 수 있으며 전술한 유사이송현상의 천이는 이들의 경계지점(Fig. 1의 점선)에서 발생함을 주장하였다. 특히 고해상도의 DEM($2 \times 2m$)에 대한 분석으로부터 Eq. (7)과 같은 반전 형태의 거동특성은 하천두부가 아닌 보다 상류에 위치한 지표면상에서 나타남을 확인한 바 있다. 따라서 Tarboton et al.(1992)이 제안한 면적한계기준은 논리적으로 지표면과 하천을 구분하는 기준이 아니라 지표면 상의 발산지형과 수렴지형을 구분하는 기준에 해당하게 되는 것이다.

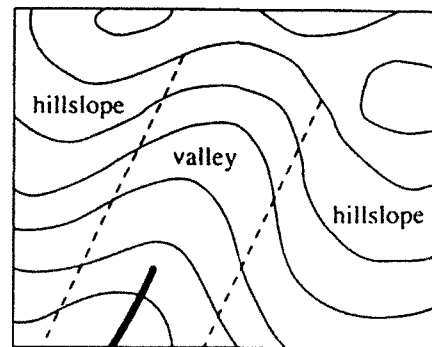


Fig. 1 Topographic Divergence and Convergence

Fig.1 하단의 굵은 실선은 수로를 나타내는 것으로 하천두부는 그림과 같이 수렴지형의 내부에만 위치하게 된다(Montgomery and Dietrich, 1988; 1989). 전술한 논거로부터 수렴지형은 Eq. (7b)와 같은 fluvial process의 지배를 받는 구간으로서 지표면과 수로가 공존할 수 있음을 알 수 있다. 이들은 Eq. (1)의 거동특성을 공유하지만 하천두부 지점을 전후하여 서로 개별적인 비례상

수와 먹수를 가질 것이 예상된다. Montgomery and Dietrich(1988; 1989)는 소규모 산악지역(약 2km^2)에 대한 정밀한 측량성과를 바탕으로 하천두부의 국부경사와 기여면적 사이에는 수로개시를 위한 일정한 거동특성이 존재함을 주장하였다. 이로부터 Montgomery and Foufoula-Georgiou(1993)는 Eq. (8)과 같은 형태의 경사-면적한계기준을 제시하였다.

$$A^\theta S = C_{th} \quad (8)$$

여기서 C_{th} 는 하천두부에 대한 한계치이다. 이는 토양이나 식생피복 및 기후 등에 종속적인 해당 지역의 특성매개변수로서 하천두부에 대한 측량 및 고해상도 DEM에 대한 분석으로부터 정확한 추정이 가능한 것으로 알려져 있다(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993). 따라서 Eq. (8)의 적용성은 C_{th} 의 합리적 추정에서 제약을 받게 된다(Giannoni et al., 2005).

3. 국부경사와 기여면적

3.1 권역별 거동특성

국부경사는 8방향 pixel windows상의 최급하향경사(김제한, 2005)로서 DEM으로부터 비교적 쉽게 산정될 수 있다. Ijjasz-Vasquez and Bras(1995)는 pixel별로 산정된 국부경사와 기여면적을 Fig. 2와 같이 양대수지상에 도시하여 특성권역을 분류하고, 전술한 가설들을 기초로 하여 각 권역별 거동특성을 분석하였다. 여기서 우선 주목되는 것은 I, II역의 경계에서 나타나는 반전형태의 거동특성(Eq. (7))으로서 이 지점의 기여면적을 기준으로 전체 pixel들은 발산지형성분과 수렴지형성분으로 대별될 수 있다. 수렴지형성분의 pixel들은 굴절형태의 거동특성에 따라 다시 3개의 특성권역으로 세분화될 수 있는데, II, IV역에서는 fluvial process에 의한 Eq. (1)의 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이는 각각 지표면유동과 수로유동에 기인하는 것으로 이에 따라 I, II역의 pixel들은 모두 지표면성분을 형성할 것이고 IV역의 pixel들은 하천성분에 해당하게 된다. III역은 지표면성분과 하천성분 pixel들이 공존하는 천이영역으로서 이의 합리적인 구분이 수로망의 동정절차를 지배하게 될 것이다.

3.2 수로망 동정절차

본 연구에서는 Ijjasz-Vasquez and Bras(1995)가 제시한 권역별 거동특성에 기초하여 면적한계기준과 경사

-면적한계기준의 상호보완적 형태의 수로망 동정절차를 다음과 같이 수립하였다.

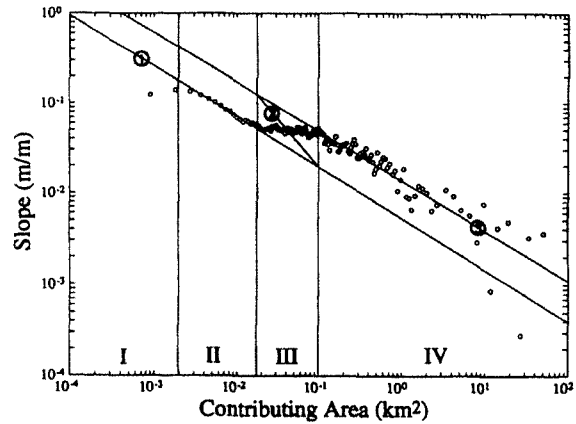


Fig. 2. Slope-Area Diagram (Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995)

- 1) 대상유역에 대한 DEM으로부터 pixel별 국부경사와 기여면적을 산정한다.
- 2) 이를 양대수지상에 도시하여 거동특성권역을 구분한다.
- 3) II, IV역에 대한 거동특성 관계식을 회귀분석을 통하여 다음과 같이 결정한다.

$$S_{LII} = C_{II} A_{II}^{-\theta_{II}} \quad (9a)$$

$$S_{LIV} = C_{IV} A_{IV}^{-\theta_{IV}} \quad (9b)$$

- 4) Eq. (9)의 두 곡선(Fig. 2의 ①, ③)을 도시하고 III역의 양 끝단에 위치한 수직선과의 교점을 조사한다.
- 5) 4)의 두 교점을 연결하는 곡선(Fig. 2의 ②)을 다음과 같이 산정하여 하천두부에 대한 관계식으로 한다.

$$S_{LIII} = C_{III} A_{III}^{-\theta_{III}} \quad (10)$$

- 6) Eq. (10)으로부터 Eq. (11)과 같은 경사-면적한계기준을 다음과 같이 수립한다.

$$A_{III}^{\theta_{III}} S_{LIII} = C_{III} \quad (11)$$

- 7) III, IV역의 경계에 해당하는 기여면적을 면적한계기준으로 하여 IV역의 수로성분 pixel을 추출한다.

- 8) Eq. (11)을 경사-면적관계기준으로 하여 III역의 pixel을 지표면성분과 수로성분으로 구분한다.
- 9) 7), 8)에서 추출된 수로성분 pixel을 결합하여 수로망을 동정한다.

4. 적용사례

본 연구에서는 설마천 시험구역의 전적비교 유역을 대상구역으로 선정하였다. DEM의 생성에는 국립지리원에서 발행한 1/25,000 축척의 수치지도를 적용하였고 pixel의 해상도는 $20 \times 20m$ 로 하였다. 지형분석 S/W로는 Arc Info와 Arc View를 적용상의 편의에 따라 병용하였다.

4.1 국부경사와 기여면적 사이의 상관성 분석

전적비교 유역은 $20 \times 20m$ 해상도에서 총 21,138개의 pixel들로 구성되었다. pixel별 기여면적의 범위는 $0.0004 \sim 8.4552km^2$ (흐름누적 값 : $0 \sim 21,137$)로서 그 크기에 따라 총 941개의 계급구간으로 나뉘었다. Fig. 3은 pixel별 국부경사와 기여면적을 양대수지상에 도시한 결과로서, 선행 연구결과(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995)에서 언급된 바와 같이 엄청난 규모의 산포경향을 볼 수 있다. 이로부터 유역의 경사(본 연구의 경우, 국부경사)는 공간적으로 매우 변동성이 큰 지형인자임을 확인할 수 있었다.

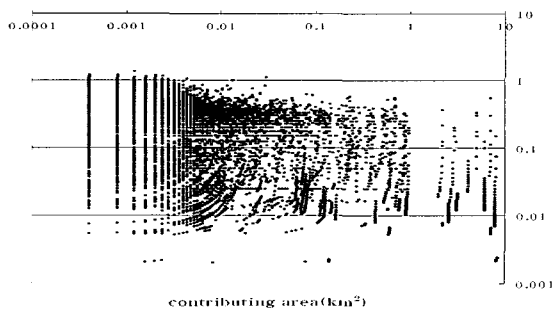


Fig. 3. Slope-Area Diagram

국부경사와 기여면적 사이의 전반적인 경향을 조사하기 위하여, 기여면적의 크기에 따라 pixel들을 분류하고, 분류된 구간별 평균경사를 이용하여 양자 사이의 거동특성을 분석하여 보았다. 이를 위하여 우선 동일한 기여면적을 갖는 총 941개의 계급구간들에 대하여 평균경사를 산정하고 이들을 Fig. 4와 같이 양대수지상에 도시하여 보았다. 여기서 기여면적이 $0.0004 \sim$

$0.0076km^2$ (흐름누적 값 : $0 \sim 18$)인 계급구간들의 산포경향이 상당히 소거되어 있음을 볼 수 있다. 이들은 동일한 기여면적에 대하여 매우 많은 개수의 국부경사 값을 갖는 계급구간들로서 전체의 약 86%에 달하는 18,238개의 pixel들이 포함되었다. 주목되는 사항은 기여면적이 $0.0008km^2$ (흐름누적 값 : 1)인 지점에서 나타나는 반전형태의 거동특성으로서 이를 기준으로 발산 지형성분과 수렴지형성분 pixel들의 구분이 가능할 것으로 판단된다. 보다 일반적인 경향을 조사하기 위하여 유사한 기여면적을 갖는 pixel들을 그룹화하여 분석을 수행하였다. 한 개의 그룹내에 포함되는 pixel의 최소개수를 5개씩 증가시켜 group화하고 각각에 대한 평균경사를 산정하였다. 이를 5~80의 총 16개 사례에 대하여 수행하였다. Figs. 5~7은 pixel의 최소개수가 5, 35, 80의 세 경우에 대하여 각각 나타낸 것이다. 여기서 pixel의 최소개수를 증가시키에 따라 산포경향이 점점 감소해감을 확인할 수 있다. 특히 pixel의 최소 개수가 35개인 Fig. 6에서부터는 전술한 반전 및 굴절형태의 거동특성이 비교적 뚜렷하게 나타나고 있음이 주목된다. Fig. 8은 Fig. 6의 사례를 국부경사와 기여면적 사이의 거동특성에 따라 권역별로 구분한 것이다.

Fig. 8의 II, IV역에 대한 거동특성 관계식을 Eq. (9)에 따라 회귀분석을 통하여 산정하였다. IV역의 경우는 비교적 일관성 있는 거동특성을 보이는 총 10개 사례들 (최소개수 : 35개~80개)에 대하여 각각 산정하였다. 그 결과, 각 사례별 회귀계수들은 대부분 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 pixel의 그룹화를 통한 정보의 손실이 가장 적을 것으로 판단되는 pixel의 최소개수 35개 사례에 대한 회귀식을 IV역에 대한 관계식으로 선정하였다. 이로부터 II역과 IV역에 대한 국부경사와 기여면적 사이의 거동특성 관계식은 다음과 같이 결정되었다.

$$S_{II} = 0.039A_{II}^{-0.353} \quad (12a)$$

$$S_{IV} = 0.089A_{IV}^{-0.393} \quad (12b)$$

Eq. (12)로부터 III역의 양 끝단에 위치한 수직선과의 교점을 산정하고 이로부터 III역에 대한 거동특성 관계식을 다음과 같이 산정하였다. 이상의 결과를 Fig. 9와 같이 도시하였다.

$$S_{III} = 0.025A_{III}^{-0.655} \quad (13)$$

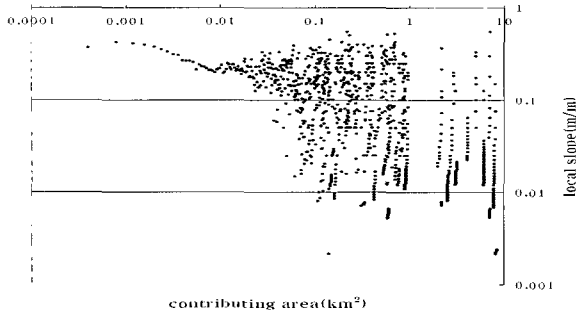


Fig. 4. Slope-Area Diagram (Areal Average)

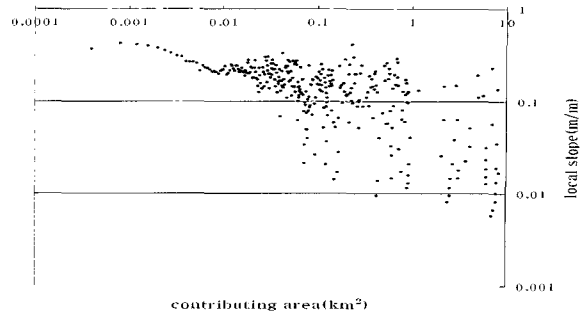


Fig. 5. Slope-Area Diagram (5)

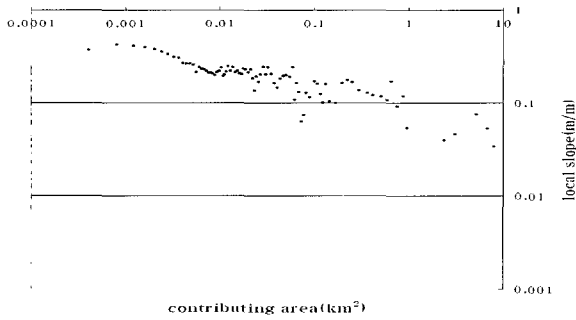


Fig. 6. Slope-Area Diagram (35)

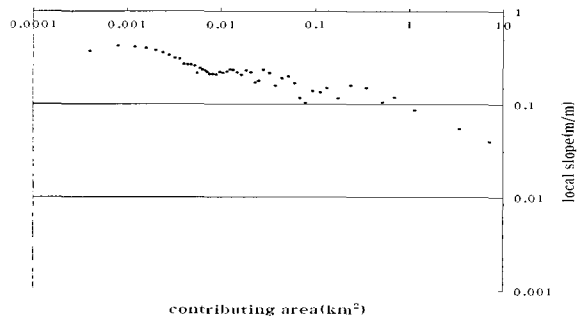


Fig. 7. Slope-Area Diagram (80)

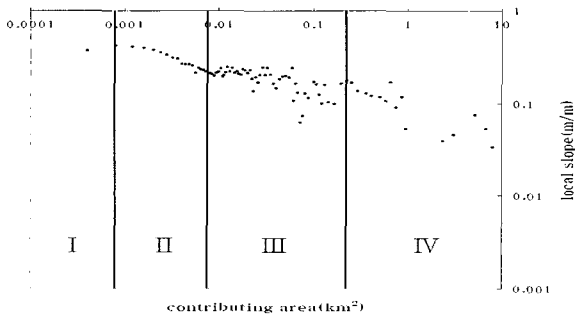


Fig. 8. Slope-Area Regimes

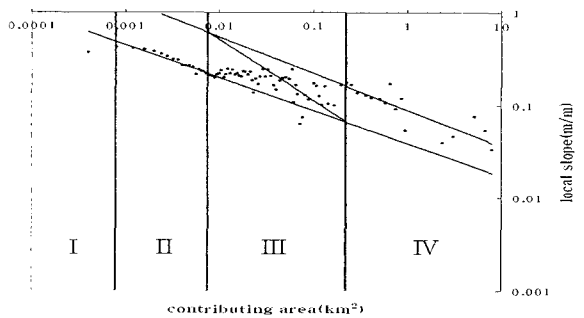


Fig. 9. Slope-Area Scaling Properties

4.2 거동특성권역에 따른 지면의 분류

대상유역을 구성하는 모든 pixel들을 Fig. 9의 거동특성권역에 따라 분류하였다. 권역별 pixel들의 상한치와 개수 그리고 총면적은 Table 1과 같다. 여기서 Table 1의 2란의 괄호안의 숫자는 상한치 면적에 해당하는 흐름누적 값이다. Figs. 10~13은 권역별 pixel들을 등고선과 중첩하여 도시한 것이다. 여기서 I, II역의 pixel들은 각각 발산지형과 수렴지형에 해당하는 지표면성분들로서 Figs. 10 and 11의 등고선의 형태로부터 이를 확인할 수 있다. 지표면유동(overland flow)의 수리학적 특성들은 지표면의 형상에 지배를 받을 것이 자명함으로 이의 명확한 구분은 정확한 강우-유출 현상 모의에 있어 필수적인 요소라 할 수 있을 것이다. 특히 최근의 분포형 강우-유출 모형의 적용에 대한 증가추세를 감안

할 때 본 연구에서 제시한 거동특성권역에 의한 지표면의 분류는 유용한 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. IV역의 pixel들은 모두 수로성분 pixel들로서 수지상의 수로망을 비교적 잘 모의하고 있음을 Fig. 13으로부터 확인할 수 있다. 따라서 이에 해당하는 한계지지면적(상한치)을 현재 실무적인 관점에서 많이 적용되고 있는 면적한계기준으로 할 경우 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 12의 III역은 수로성분과 지표면성분 pixel들이 공존하는 구간으로서 이들의 구분을 위하여 Eq. (13)로부터 다음과 같은 경사-면적한계기준을 수립하여 수로에 해당하는 부분만을 Fig. 14와 같이 추출하였다.

$$A_{\text{III}}^{0.655} S_{\text{III}} = 0.025 \quad (14)$$

Table 1. Configuration of Pixels According to Scaling Regimes

region	threshold(km^2)	No. of pixels	total area(km^2)	percentage(%)
I	-	8,208	3.2832	38.83
II	0.0008(1)	10,030	4.012	47.45
III	0.0076(18)	2,359	0.9436	11.16
IV	0.2244(560)	541	0.2165	2.56
sum	-	21,138	8.4552	100



Fig. 10. Region I (divergent overland)

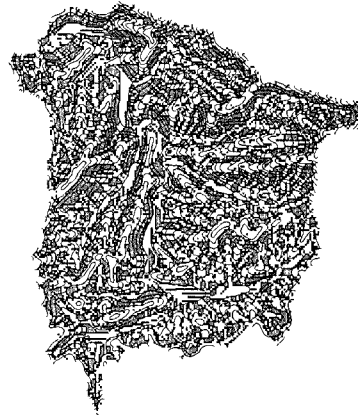


Fig. 11. Region II (convergent overland)



Fig. 12. Region III (transition zone)



Fig. 13. Region IV (channel)



Fig. 14. Channel Pixels in Region III



Fig. 15. Distribution of Channel Pixels

4.3 수로망의 동정

Fig. 15는 Figs. 13 and 14를 결합하여 구성한 대상 영역의 수로성분 pixel 분포도로서, 천이영역으로부터 추출된 수로성분 pixel들의 일부가 IV역(Fig. 13)의 수로망과 분리되어 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 주로 본 연구에서 적용한 경사-면적한계기준인 Eq. (14)의 특성에 기인하는 것으로 판단된다. Eq. (14)는 지표면유동과 하천유동 사이에 존재하는 거동특성의 천이영역을 도해적으로 구분하는 근사식(Fig. 9)으로서 이로부터 III역의 pixel들 속에는 지표면성분이 일부 포함될 수 있는 것이다. 따라서 본 연구에서는 수지상의 형태로 단일 수로망을 형성하는 pixel들만을 수로성분으로 하여 Figs. 16 and 17과 같이 대상영역의 수로망을 동정하였다. 여기서 Fig. 16은 IV역의 상한치를 한계지 지면적으로 하여 면적한계기준에 따라 작도한 수로망이고 Fig. 17은 여기에 경사-면적한계기준에 의한 수로성분이 추가된 수로망이다. Figs. 18 and 19는 각각 수치

지도(국립지리원)와 수자원 단위지도(수자원공사)상의 수로망이다.

우선 주목되는 사항은 수치지도 수로망의 형태(Fig. 18)로서 본류를 기준으로 좌측 사면에 수로가 표시되지 않고 있음을 볼 수 있다. 대상영역의 등고선의 양상(Fig. 13)을 고려할 때 수치지도 작성시 해당 수로들이 누락된 것으로 판단된다. 이는 Fig. 19의 수자원 단위지도 수로망으로부터 확인할 수 있다. Figs. 16 and 17은 Fig. 19와 거의 유사한 형태로서 본 연구에서 제시한 수로망 동정 절차의 합리성을 확인할 수 있다. 양자 간의 상대적 우수성은 대상영역에 대한 정밀한 측량이나 지형인자(예를 들면 배수밀도) 등에 대한 분석으로부터 평가할 수 있을 것으로 보인다. 고무적인 결과는 Figs. 16 and 19의 유사성으로 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성은 실무적 관점에서 많이 적용되고 있는 면적한계기준의 한계지지면적을 객관적으로 결정할 수 있는 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 16. Channel Network(area)

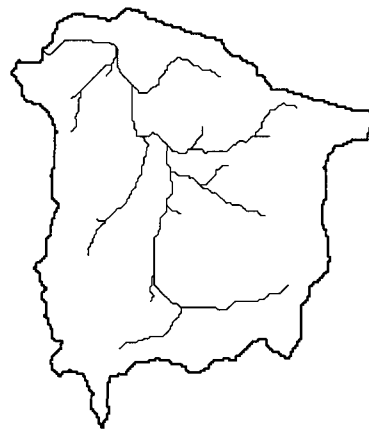


Fig. 17 Channel Network(slope-area)

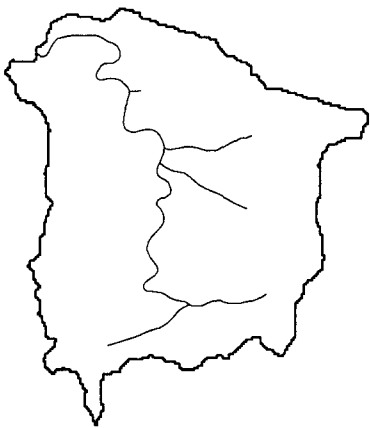


Fig. 18 Channel Network(topographic map)

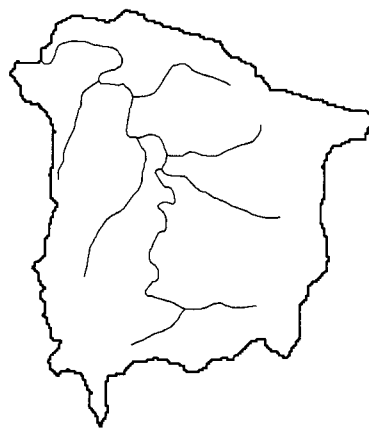


Fig. 19 Channel Network(WR unit map)

5. 결론

본 연구에서는 DEM으로부터 산정된 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성을 고려하여, 면적한계기준과 경사-면적한계기준이 상호보완적인 형태의 수로망 동정 절차를 수립하고 그 적용성을 평가하여 보았다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) pixel별로 산정된 국부경사와 기여면적은 양대수 지상에서 엄청난 규모의 산포경향을 보였다. 이로부터 유역의 경사는 공간적으로 매우 변동성이 큰 지형인자임을 확인할 수 있었다.
- 2) 국부경사와 기여면적 사이의 거동특성권역에 따라 지면을 발산지형과 수렴지형 그리고 지표면과 수로 및 이들의 천이영역으로 분류할 수 있었다. 이는 분포형 강우-유출모형의 합리적 운용을 위한 길잡이를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 면적한계기준과 경사-면적한계기준이 상호보완적인 형태의 수로망 동정 절차에 따라 수로망을 작도해 본 결과 그 적용성을 확인할 수 있다. 특히 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성은 실무적 관점에서 많이 적용되고 있는 면적한계기준의 한계지지면적을 객관적으로 결정할 수 있는 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 DEM으로부터 작도된 수로망의 지형인자들에 대한 신뢰성을 평가하기 위한 후속연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 김재한 (2005). 수문계의 수학적 모형, 선형계를 중심으로. 도서출판새론, pp. 362-365.
- 김주철 (2004). 선형계로 간주한 강우-유출 수문계 대 표순간단위도의 추정. **박사학위논문, 충남대학교.**
- 우효섭 (2001). 하천수리학. 청문각, p.322
- 함창학 (1996). 지형정보시스템(GIS)을 이용한 수문지형정보추출에 관한 기초적 연구. **박사학위논문, 충북대학교.**
- Brutsaert, W. and Nieber, J. L. (1977). "Regionalized drought flow hydrographs from a matured glaciated plateau." *Water Resources Research*, 13(3), pp. 637-643.
- Flint, J. J. (1974). "Stream gradient as a function of order, magnitude and discharge." *Water Resources Research*, 10(5), pp. 969-973.
- Giannoni, F., Roth, G. and Rudari, R. (2005). "A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response." *Advances in Water Resources*, 28, pp. 567-581.
- Ijjasz-Vasquez, E. J. and Bras, R. L. (1995). "Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models." *Geomorphology*, 12, pp. 299-311.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1988). "Where do channels begin?" *Nature*, 336, pp. 232-234.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1989). "Source area, drainage density, and channel initiation." *Water Resources Research*, 25(8), pp. 1907-1918.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1992). "Channel initiation and the problem of landscape scale." *Science*, 255, pp. 826-830.
- Montgomery, D. R. and Foufoula-Georgiou, E. (1993). "Channel network source representation using digital elevation models." *Water Resources Research*, 29(12), pp. 3925-3934.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, pp. 324-344.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, 15(6), pp. 1409-1420.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A. (2003). Fractal river basins, Chance and self-organization. *Cambridge.*
- Shreve, R. L. (1966). "Statistical law of stream numbers." *Journal of Geology*, 74, pp. 17-37.
- Strahler, A. N. (1964). "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks." pp. 4.39-4.76, In: Handbook of Applied Hydrology. *McGraw-Hill.*
- Smart, J. S. (1972). "Channel Networks." *Advances in Hydroscience*, 8, pp. 305-346.
- Smith, T. R. and Bretherton, F. P. (1972). "Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution." *Water Resources Research*, 8(6), pp.

1506-1529.

- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1989). "Scaling and elevation in river networks." *Water Resources Research*, 25(9), pp. 309-319.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1991). "On the extraction of channel networks from digital elevation data." *Hydrological Processes*, 5, pp. 81-100.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1992). "A physical basis for drainage density." *Geomorphology*, 5, pp. 59-76.
- Willgoose, G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1991a). "A coupled channel network growth and hillslope evolution model, 1. Theory." *Water Resources Research*, 27(7), pp. 1671-1684.
- Willgoose, G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1991b). "A coupled channel network growth and hillslope evolution model, 2. Nondimensionalization and applications." *Water Resources Research*, 27(7), pp. 1685-1696.
- Willgoose, G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1991). "A physical explanation of an observed link area-slope relationship." *Water Resources Research*, 27(7), pp. 1697-1702.

(논문번호:07-03/접수:2007.01.17/심사완료:2007.03.15)