

배수밀도와 수원유역의 기하학적 특성을 기반으로 한 배수구조에 대한 해석

Analysis of Drainage Structure Based on the Geometric Characteristics of Drainage Density and Source-Basin

김 주 철* / 김 재 한**

Kim, Joo Cheol / Kim, Jae Han

Abstract

The exact resolution of channel initiation points is not so easy because of the dynamic behaviors of water movement on the hillslope. To this end, Kim, Joocheol and Kim, Jaehan(2007) have represented the channel network in real world basins for slope-area regimes using DEM. This study is its sequential content and then proposes the reliabilities of the hypothetical channel networks identified from DEM, which are assessed based on the geometric characteristics of drainage density and source-basin. The resulting drainage structures on the natural basin can be found to be depicted remarkably depending on the hypothetical channel network applied by slope-area threshold criterion. In addition, it is shown that there is a wonderful geometric similarity between the shapes of source-basin in a geomorphologically homogeneous region. Area threshold criterion could have restricted the shape of source-basin, so that it might bring about the incorrect drainage structures. But the hypothetical channel networks identified from DEM deserves special emphasis on expressing the space-filling structures nonetheless.

keywords : channel network, drainage density, source-basin

요 지

수로가 시작되는 지점의 정확한 위치를 찾는 것은 구릉지 사면상의 물의 동적거동으로 인하여 매우 어렵다. 이러한 목적을 위하여, 김주철과 김재한(2007)은 DEM을 이용한 경사와 면적 사이의 규모에 따른 거동특성에 따라 실제 유역내 수로망을 제시한 바 있다. 본 연구는 이들의 연구 성과의 연장으로서, 배수밀도와 수원유역의 기하학적 특성을 기반으로 하여 DEM으로부터 동정된 가설수로망의 신뢰성을 평가하여 보았다. 그 결과 경사-면적한계기준에 의한 가설수로망이 자연유역의 배수구조를 매우 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 지형학적 동질성을 가진 지역내 수원유역의 형상들 사이에는 훌륭한 기하학적 상사성이 존재함을 추론할 수 있었다. 면적한계기준은 수원유역의 형상을 구속하여 왜곡된 배수구조를 야기할 수도 있었다. 그럼에도 불구하고 DEM으로부터 동정된 가설수로망들이 공간-채움 구조를 잘 표현하고 있는 점이 특히 주목된다.

핵심용어 : 수로망, 배수밀도, 수원유역

* 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)

1. 서론

물리적으로 기초한 강우-유출 해석은 유역의 배수구조(예를 들면, 지표면(overland)의 규모; 수로망(channel network)의 범위)에 대한 정확하고 객관적인 평가를 바탕으로 수행되어야만 한다(Brutsaert and Nibber, 1977; Rodríguez-Iturbe and Valdes, 1979). 과거, 이와 관련된 각종 연구사례들이 주로 수로망 형상의 체계적인 묘사를 중심으로 제시되어 왔다(Smart, 1972; Abraham, 1984). 특히 수로망의 생성이력(historic processes)은 무시되었을지라도, 자연유역에서 발생가능한 수로망의 위상구조(topology)에 주목한 통계적 혹은 확률적 접근법들이 오래전부터 시도되어 왔다(Strahler, 1964; Shreve, 1966). 하지만 지형도(topographic map)를 기반으로 한 배수구조 분석과정에 있어 각종 지형인자들(예를 들면, 유역의 특성경사)에 대한 객관적 정의나 계량이 갖는 난점(Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 2003)은 수문학 및 지형학 분야의 심도 깊은 발전을 저해하는 요소가 되어 왔다.

최근 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. 현재 이러한 기술적 진보는 수로망의 공간-채움(space-filling) 구조를 정량적으로 계량할 수 있는 fractal 차원의 산정 수준에까지 이르고 있다(Tarboton et al., 1988; La Barbera and Rosso, 1989). 하지만 DEM으로부터 동정된 가설수로망의 형상에 따른 배수구조의 신뢰성을 객관적으로 평가하고자 한 연구사례는 쉽게 찾아볼 수 없다. 이는 수로망의 동정과정이 갖는 복합적인 성격에 기인하는 것으로 판단된다. 실제로 이러한 작업은 수문학 및 지형학 분야의 지식만을 필요로 하는 것이 아니라 수리학과 측량학 더 나아가 computer를 기반으로 한 정보처리기술의 발달 수준까지 망라하고 있다. 따라서 연구자의 관심분야나 혹은 수로망의 동정에 적용한 기법의 종류에 따라 동일한 유역에 대하여 개별적인 가설수로망이 제시될 수 있는 실정인 것이다.

현재 수로망의 동정에 적용되는 기법들은 대개 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 범주

로 구분되어진다. 이와 관련하여 주목할 만한 연구 성과로서, Ijjasz-Vasquez and Bras(1995)는 DEM으로부터 산정한 국부경사(local slope)와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성권역을 이용하여 경사-면적한계기준을 수문학적 관점에서 적용할 수 있는 방법론을 제안하였다. 또한 김주철과 김재한(2007)은 이를 기초로 하여 면적한계기준과 경사면적한계기준이 상호보완적인 형태의 수로망 동정절차를 수립하고 국내 유역에 대한 적용사례를 발표한 바 있다.

본 연구는 이들의 연구 성과의 연장선상에서 출발한다. 즉 개별적인 기법에 의하여 DEM으로부터 동정된 가설수로망들의 형상이 동일한 유역의 배수구조에 미치는 영향을 분석하여 보다 합리적인 수로망 동정절차를 찾고자 하는 것이 본 연구의 주된 목적인 것이다. 이를 위하여 대표적인 지형인자들 중의 하나인 배수밀도(drainage density)의 특성을 기반으로 하여 배수구조에 대한 체계적인 분석절차를 수립하고자 하였다. 특히 배수밀도의 산정에는 Horton의 고전적 모형과 함께 최근 Turker et al.(2001)이 제안한 지표면유동경로에 대한 통계학적 접근법을 동시에 적용하여 보다 일반적인 결과를 유도하고자 하였다. 또한 Montgomery and Dietrich(1989)에 의하여 수행된 정밀한 측량성과를 바탕으로 한 수원유역에 대한 분석결과를 기반으로 하여 가설수로망의 형상에 따른 수원유역의 기하학적 변동성을 고려하여 배수구조의 신뢰성을 평가해보고자 하였다. 유역의 기하학적 특성은 포괄적으로 형태적 표현뿐만 아니라 물리적인 양에 대한 개념도 포함한 것으로서 이로부터 수문곡선의 해석이 가능함이 최근에 널리 알려져 있다(김재한, 2005; 김주철 등, 2005; Brierley and Fryirs, 2005). 따라서 본 연구를 통하여 얻어지는 결과들은 자연유역의 배수구조 및 이를 통한 강우-유출 현상의 근본적인 특성에 대한 이해를 한층 더 향상시킬 수 있는 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 유역의 기하학적 특성에 대한 이론적 배경

2.1 형상계수와 link분류법

집수평면(catchment plan-form, Eagleson, 1970)에 대한 형상디스크립터인 Horton의 형상계수(form factor) F 는 다음과 같이 정의된다(Gregory and Wailling, 1973).

$$F = \frac{A}{L^2} = \left(\frac{A}{L} \right) \frac{1}{L} \quad (1)$$

여기서 A 는 유역면적이고 L 은 유역의 특성길이(주로 본류의 연장)이다. Eq. (1)은 유역의 평균폭과 특성길이 사이의 비로서, 유역의 전반적인 유동방향에 대한 집수 평면의 신장도(elongation)를 계량한다. 따라서 유역의 평균폭 w 는 Eq. (2)와 같이 평가할 수 있다.

$$w = \frac{A}{L} \quad (2)$$

수지상으로 분기하는 수로망의 형상을 정량화하기 위하여 Shreve에 의해 제안된 link분류법은 다음과 같다(Smart, 1972).

- ① 수원과 그 하류방향의 첫 번째 합류점 사이의 수로구간은 exterior link로 정의된다.
- ② 합류점과 합류점 혹은 합류점과 출구 사이의 수로구간은 interior link로 정의된다.
- ③ link의 위상을 나타내는 magnitude는 해당 link에 기여하는 수원의 개수로 정의된다.

여기서 exterior link의 magnitude는 1이고 interior link의 magnitude는 상류 합류점에서 만나는 두 link의 magnitude의 합이 된다. 이에 따라 수원의 개수가 μ 인 유역의 경우 exterior link와 interior link의 개수 N_e, N_i 는 Eqs. (3), (4)와 같이 일정하게 결정된다.

$$N_e = \mu \quad (3)$$

$$N_i = \mu - 1 \quad (4)$$

2.2 배수밀도와 지표면유동경로

수로에 의해 지면(landscape)이 절개되는 정도를 나타내는 배수밀도 D 는 다음과 같이 단위면적 당 수로의 총길이를 정의된다(Bras, 1990).

$$D = \frac{L_T}{A} \quad (5)$$

여기서 L_T 는 수로의 총길이이다. Eq. (5)는 집수평면내 수로망의 성장정도를 나타내는 지형인자로서, 만약 이를 유역전반에 걸쳐 일정하게 가정할 경우 유역내 물 입자의 지표면유동경로의 평균길이 \bar{l} 는 다음과 같이 산정할 수 있다(Bras, 1990).

$$\bar{l} = \frac{1}{2D} \quad (6)$$

Eq. (6)으로부터 유역의 단위면적 당 평균폭 w_u 는 다음과 같이 추론될 수 있다.

$$w_u = 2\bar{l} \quad (7)$$

이에 따라 유역의 단위면적 당 형상계수 F_u 는 Eq. (1)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$F_u = \frac{w_u}{D} \quad (8)$$

Eqs. (1), (8)은 각각 유역의 전반적인 형상 및 국부적인 형상에 대한 계량치로서 동일한 유역의 경우 동질적인(homogeneous) 특성을 가져야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Eqs. (7), (8)을 유의한(significant) 지형인자로서 가정하고 유역의 형상평가에 적용해 보도록 한다.

최근 배수밀도와 지표면유동경로의 공간적 변동성을 시사하는 연구사례가 다수 발표되고 있다(Turker et al., 2001; Giannoni et al., 2005). 이에 따라 유역내 임의의 지점의 지표면유동경로의 길이 l 을 확률변수(random variable)로 취급할 경우, 이에 대한 n 차 통계학적 적률(statistical moment)을 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있게 된다(Turker et al., 2001).

$$E[l^n] = \int_0^\infty l^n p_l(x) dx \quad (9)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기대치연산자이고 $p_l(x)$ 는 l 의 확률밀도함수이다. Eq. (9)는 지표면유동경로의 길이와 배수밀도의 공간적 변동성에 대한 통계학적 분석의 기초를 제공한다. 특히 Eq. (9)의 1차 적률이 Eq. (6)의 좌변에 해당함이 눈길을 끈다. Turker et al.(2001)은 지표면유동경로의 길이를 DEM을 이용하여 계량하는 방법을 Fig. 1과 같이 제안하였다. 여기서 pixel 내부의 화살표는 8방향 pixel windows상에서 정의되는 흐름방향이고

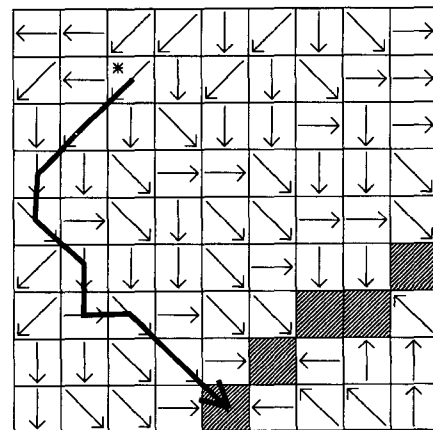


Fig. 1. hillslope flow path distance (Turker, et al, 2001)

아래 부분의 검은 pixel들은 수로를 나타낸다. 이로부터 굵은 선으로 표시된 화살표는 *지점의 지표면유동경로임을 알 수 있다.

2.3 수원유역의 기하학적 특성

Montgomery and Dietrich(1989)는 미국 서부의 Tennessee valley에 위치한 소규모 산악지역(약 $2km^2$)에 대한 정밀한 측량성과를 바탕으로 수원유역의 특성길이 l_s 와 배수면적 a_s 사이의 관계를 다음과 같이 제시한 바 있다.

$$l_s = 1.48a_s^{0.5} \quad (10)$$

여기서 l_s 는 수원유역의 계곡 축(axis of hollow)을 따라 측정된 수원으로부터 분수경계까지의 거리로 정의된다(Montgomery and Dietrich, 1989). Eq. (10)은 Hack의 법칙 Eq. (11)과 유사한 형태임을 확인할 수 있다.

$$L = 1.4A^{0.6} \quad (11)$$

여기서 주목되는 사항은 Eq. (10) 우변의 멱수 0.5로서, 수원유역의 특성길이와 배수면적 사이에는 기하학적 상사성이 존재함을 시사하고 있다. 이는 본류의 연장과 유역면적 사이에 존재하는 규모에 따른 신장 특성을 나타내는 Eq. (11) 우변의 멱수 0.6과는 구별되는 경향임을 알 수 있다. 이로부터 수로를 포함하지 않은 수원유역의 형상은 일반적인 유역의 형상과는 개별적인 기하학적 특성을 나타낼 수 있음이 예상된다.

Montgomery and Dietrich(1989)는 Fig. 2와 같이 exterior link유역과 수원유역의 평균폭을 동일하게 가정하여(즉, $w_e = w_s$) 수원유역의 기하학적 특성과 배수밀도 사이의 관계에 대한 가설을 다음과 같이 제시한 바 있다. 우선 Fig. 2로부터 exterior link유역의 배수면적 a_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_e = l_e w_s + a_s \quad (12)$$

여기서 l_e 는 exterior link의 평균길이이다. Eq. (12)의 양변을 a_s 로 나누고 이를 정리하면 Eq. (13)과 같은 exterior link의 평균길이와 수원유역의 특성길이 사이의 관계를 유도할 수 있다.

$$l_e = (Y-1)l_s \quad (13)$$

여기서 $Y = a_e/a_s$ 이다.

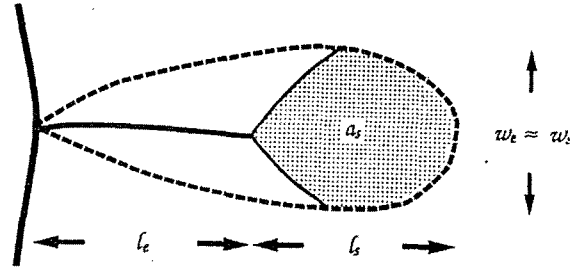


Fig. 2. exterior link area and source area (Montgomery and Dietrich, 1989)

Shreve의 link분류법에 따라 수원의 개수가 μ 인 유역의 배수밀도는 Eq. (5)로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$D = \frac{\mu l_e + (\mu - 1)l_i}{\mu a_e + (\mu - 1)a_i} \quad (14)$$

여기서 l_i , a_i 는 각각 interior link의 평균길이와 평균배수면적이다. exterior link유역과 interior link유역의 형상계수를 각각 k_e , k_i 로 할 경우 Eq. (14)는 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$D = \frac{\mu + (\mu - 1)\alpha}{\mu k_e + (\mu - 1)k_i \alpha^2} \frac{1}{l_e} \quad (15)$$

여기서 $\alpha = l_i/l_e$ 이고 $k_e = a_e/l_e^2$, $k_i = a_i/l_i^2$ 이다. Eq. (15)에 Eq. (13)을 적용할 경우 배수밀도와 수원유역의 특성길이 사이의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$D = \frac{\mu + (\mu - 1)\alpha}{\mu k_e + (\mu - 1)k_i \alpha^2} \frac{1}{(Y-1)l_s} \quad (16)$$

Montgomery and Dietrich(1989)는 Eq. (16)에 포함된 각종 매개변수들에 대한 광범위한 선행연구 성과($Y=2$; $k_e = k_i = \alpha = 1$)를 바탕으로 다음과 같은 배수밀도와 수원유역의 특성길이 사이의 관계를 제안하였다.

$$D = \frac{1}{l_s}; \mu \gg 1 \quad (17)$$

Eq. (6)과 Eq. (17)로부터 수원유역의 특성길이와 지표면유동경로의 평균길이 사이에는 Eq. (18)과 같은 관계가 추론될 수 있다.

$$l_s = 2\bar{l} \quad (18)$$

3. 대상유역에 대한 지형분석결과

본 연구에서는 설마천 시험유역의 전적비교 유역을 대상유역으로 선정하였다. DEM의 생성에는 국립지리원에서 발행한 1:25,000 축척의 수치지도를 적용하였고 pixel의 해상도는 20m×20m로 하였다. 지형분석 S/W로는 Arc Info와 Arc View를 적용상의 편의에 따라 병용하였다.

3.1 가설수로망의 동정

대상유역의 수로망을 김주철과 김재한(2007)이 제시한 면적한계기준과 경사-면적한계기준 절차에 따라 개별적으로 동정하였다. 본 연구에서 수행된 동정절차를 간략히 소개하면 다음과 같다. Fig. 3은 전적비교 유역의 국부경사와 기여면적 사이의 거동특성에 따른 권역도로서 I, II역의 pixel들은 각각 발산지형과 수렴지형에 해당하는 지표면성분이고 IV역의 pixel들은 수로성분에 해당한다(Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995; 김주철과 김재한, 2007). 이에 따라 III, IV역의 경계에 해당하는 기여면적 0.224km²(흐름누적 : 560)을 한계지지면적으로 하여 면적한계기준에 의한 수로성분을 추출하였다. III역은 지표면성분과 수로성분 pixel들이 공존하는 구간으로서 Fig. 3의 중앙에 도시된 4변형의 대각선

($A_{III}^{0.655} S_{III} = 0.025$)을 하천두부의 경사-면적한계기준으로 하여 해당 역에 포함된 수로성분을 추출하였다. Fig. 4는 진술한 절차에 따라 추출된 수로성분 pixel들의 유역내 분포도로서 면적한계기준에 의하여 추출된 IV역의 pixel 분포도에 경사-면적한계기준에 의하여 추출된 III역의 pixel을 추가하여 작성하였다. 본 연구에서는 Fig. 4에서 수지상의 형태로 단일한 수로망을 형성하는 pixel들만을 수로성분으로 하였다. Fig. 5는 수치지도의 수로망이고 Figs. 6 and 7은 각각 면적한계기준과 경사-면적한계기준에 의하여 작성된 가설수로망이다. Table 1은 이들 3개 수로망의 주요한 지형특성인자들이다. 여기서 2란의 Ω 는 Strahler의 차수분류법에 따른 유역의 차수이다.

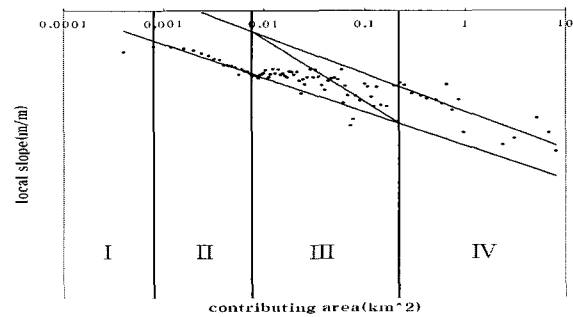


Fig. 3. slope-area scaling regimes

Table 1. main characteristics of channel network

	μ	Ω	$L_T(km)$	$L(km)$
topographic map	5	2	8.810	5.857
area threshold	9	3	12.378	5.087
slope-area threshold	15	3	13.990	5.087



Fig. 4. distribution of channel pixels

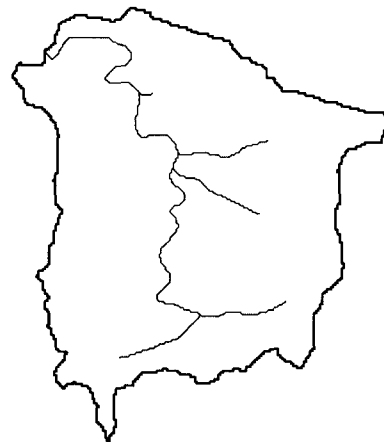


Fig. 5. channel network(topographic map)



Fig. 6. channel network(area)



Fig. 7. channel network(slope-area)

3.2 지표면유동길이의 산정

대상유역의 지표면유동길이를 Turker et al.(2001)의 방법(Fig. 1)을 이용하여 pixel별로 계량하였다. Figs. 8 and 9는 각각 Fig. 7의 경사-면적한계기준 수로망에 대한 지표면유동길이의 산정결과와 길이에 따른 pixel의 도수분포도이다. Table 2는 이로부터 추정된 지표면유

동길이에 대한 주요한 통계특성으로서 4, 5란은 Eq. (9)로부터 산정하였다. 주지할 만한 사항은 6란의 변동계수(표준편차와 평균의 비)에 대한 산정결과로서 3개 수로망 모두에서 지표면유동경로의 공간적 변동성을 확인할 수 있다. 이로부터 배수밀도는 공간적 변동성을 무시할 수 없는 지형학적인자임을 추론할 수 있다.

Table 2. statistical characteristics of hillslope length

	$l_{min}(km)$	$l_{max}(km)$	$E[l](km)$	$Var[l](km^2)$	C_v
topographic map	0.020	2.203	0.523	0.203	0.863
area threshold	0.020	1.336	0.304	0.053	0.756
slope-area threshold	0.020	1.191	0.280	0.047	0.775

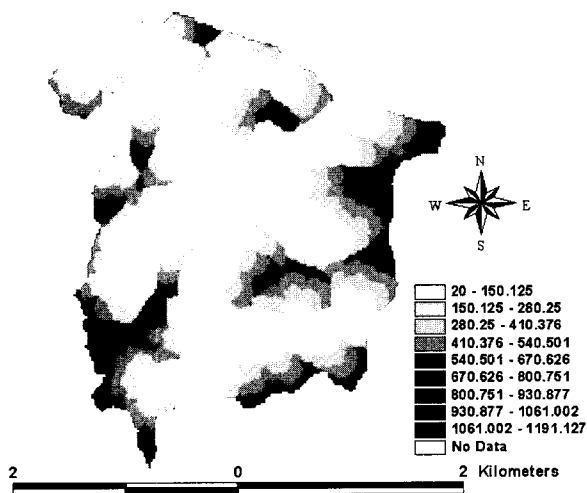


Fig. 8. hillslope length to channel (slope-area)

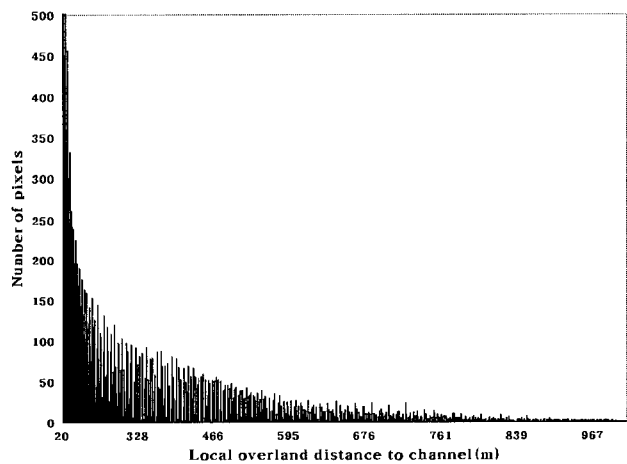


Fig. 9. frequency distribution of hillslope length(slope-area)

3.3 link분류법에 의한 유역의 배수구조

Shreve의 link분류법에 따른 대상유역의 배수구조를 Figs. 10~12와 같이 수로망별로 도시하여 보았다. 여기서 점선은 link유역의 경계이고 짙게 채색된 부분은 수원유역을 나타낸다. 흥미로운 사항은 3개의 그림이 마치 자연유역의 진화과정(예를 들면, 유년기, 청년기, 장년기)과 유사하게 나타나는 점으로서, 수로망의 성장에 따라 기존 수원유역의 규모는 감소하고 새로운 수원유역(혹은 exterior link)이 출현하는 양상과 같이 보여진다. 이들이 동일한 시점에 대한 집수평면과 등고선을 기반으로 하고 있음을 감안할 때 DEM으로부터 동정한

가설수로망 Figs. 11 and 12가 수로망의 공간채움 구조를 보다 신뢰성 있게 묘사하고 있는 것으로 판단된다.

Tables 3 and 4는 각각 link 분류법에 따라 산정된 대상유역의 지형인자와 형상인자들에 대한 평균치 산정 결과로서 Table 3의 5란의 수원유역의 특성길이는 전절에서 산정한 해당 수원유역의 지표면유동경로의 최대 길이를 기초로 하였다. 여기서 Table 4의 결과는 Montgomery and Dietrich(1989)가 제시한 대표치들과는 다소 차이를 보임을 확인할 수 있다. 하지만 본 연구의 결과는 한정된 범위(표본 유역)의 지형분석으로부터 얻은 결과로서 추후 국내 유역에 대한 광범위한 조사를 기반으로 그 신뢰성을 검증하여야 할 것으로 보인다.

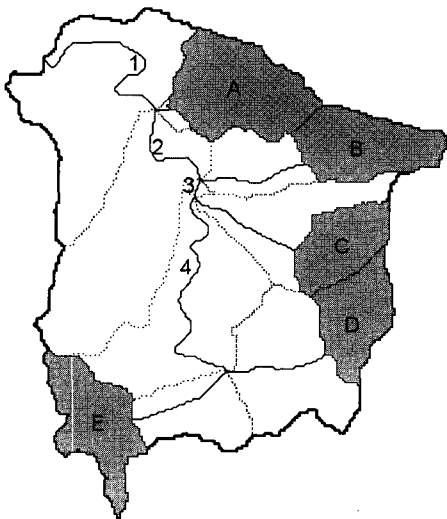


Fig. 10. drainage structure with channel network of topographic map

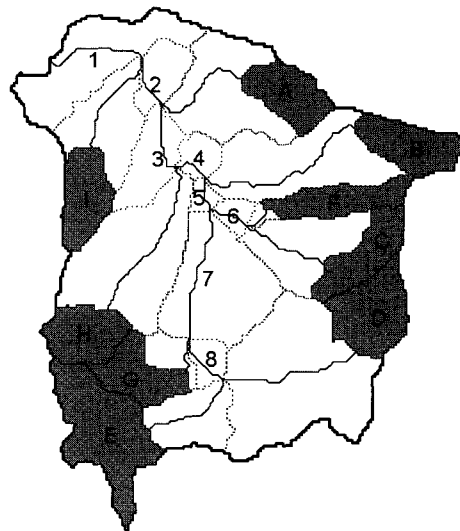


Fig. 11. drainage structure with channel network by area threshold

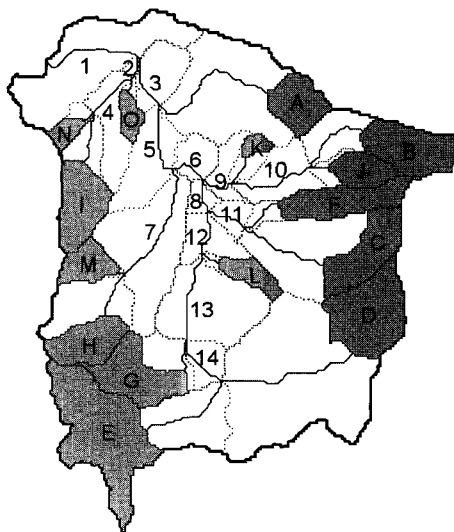


Fig. 12. drainage structure with channel network by slope-area threshold

Table 3. geometric properties of channel network

	$\bar{a}_e(km^2)$	$\bar{l}_e(km)$	$\bar{a}_s(km^2)$	$\bar{l}_s(km)$	$\bar{a}_i(km^2)$	$\bar{l}_i(km)$
topographic map	0.928	0.778	0.497	1.224	0.954	1.230
area threshold	0.727	0.900	0.277	0.954	0.239	0.535
slope-area threshold	0.379	0.471	0.178	0.702	0.198	0.495

Table 4. shape factors of channel network

	Y	α	k_e	k_i
topographic map	1.869	1.581	1.533	0.630
area threshold	2.629	0.595	0.899	0.833
slope-area threshold	2.131	1.051	1.711	0.807

4. 수로망의 형태별 배수구조의 비교

본 연구의 대상유역인 전적비교유역의 유역면적은 $20m \times 20m$ 해상도(pixel의 규모)의 격자 상에서 $8.455km^2$ (pixel의 개수 : 21,138)로 산정되었다(김주철과 김재한, 2007).

4.1 배수밀도에 의한 유역의 형상 평가

Table 1의 4, 5란의 결과를 이용하여 대상유역의 형상계수, 배수밀도 그리고 지표면유동경로의 평균길이를 수로망별로 Table 5의 2~4란과 같이 산정하였다. 2란의 결과로부터 전적비교 유역의 형상은 전반적으로 상당히 신장된 경향을 보임을 확인할 수 있다. 체계적인 분석을 위하여 3란의 배수밀도(즉, 단위면적 당 수로의 길이)로부터 단위면적 당 평균폭 w_u 와 단위면적 당 형상계수 F_u 를 Table 5의 5, 6란과 같이 산정하였다. 주목할 만한 사항은 수치지도 수로망의 F_u 에 대한 산정 결과(0.921)로서 2란의 F (0.246)와는 달리 거의 정방형의 형상을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 유역의 전반적인 형상과 국부적인 형상을 개별적으로 평가하는

모순된 결과로서 판단된다. 흥미로운 사항은 면적한계 기준과 경사-면적한계기준 수로망들에 대한 F_u 의 산정 결과로서 시각적으로 매우 유사한 형태의 망상구조(Figs. 6 and 7)임에도 불구하고 개별적인 결과를 보임을 알 수 있다. 이로부터 2란의 F 와 4란의 F_u 가 거의 유사한 값을 보이는 경사-면적한계기준에 의한 수로망이 대상유역의 배수구조를 가장 잘 묘사하고 있는 것으로 판단된다.

Table 2의 4란의 지표면유동경로의 평균길이를 Table 3의 5란의 수원유역의 평균특성길이를 이용하여 Eqs. (6), (17)로부터 배수밀도를 각각 산정하고 이에 따른 유역의 형상을 Tables 6, 7과 같이 추정하였다. 여기에서도 Table 5와 유사한 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 수원유역의 기하학적 특성에 의한 유역의 형상 평가

수원유역의 특성길이를 배수면적 사이의 관계를 Eq. (10)에 따라 회귀분석을 통하여 Eqs. (19)~(21)과 같이 산정하였다.

Table 5. evaluation of basin shape according to geomorphologic law

	F	$D(km/km^2)$	$\bar{l}(km)$	$w_u(km)$	F_u
수치지도	0.246	1.042	0.480	0.960	0.921
면적한계	0.327	1.464	0.342	0.683	0.467
경사-면적한계	0.327	1.655	0.302	0.604	0.365

Table 6. evaluation of basin shape according to hillslope length

	$E[l] = \bar{l}(km)$	$D(km/km^2)$	$w_u(km)$	F_u
수치지도	0.523	0.956	1.046	1.093
면적한계	0.304	1.643	0.608	0.370
경사-면적한계	0.280	1.780	0.562	0.316

Table 7. evaluation of basin shape according to geometric properties of source area

	$\bar{l}_s(km) = w_u$	$D(km/km^2)$	$\bar{l}(km)$	F_u
수치지도	1.224	0.817	0.612	1.499
면적한계	0.954	1.048	0.477	0.910
경사-면적한계	0.702	1.425	0.351	0.492

① 수치지도 : $l_s = 1.840a_s^{0.591}$; $R^2 = 0.413$ (19)

② 면적한계기준 : $l_s = 0.980a_s^{0.031}$; $R^2 = 0.002$ (20)

③ 경사-면적한계기준 :
 $l_s = 1.8698a_s^{0.540}$; $R^2 = 0.869$ (21)

상기결과에서 볼 수 있듯이 Eq. (20)의 결정계수는 양자 사이에는 상관성이 거의 없음을 시사하고 있다. 이는 본 연구에서 적용한 면적한계기준의 한계지지면적 ($0.224km^2$)에 기인하는 것으로 면적한계기준에 의한 수원유역들(Fig. 11)은 대부분 이와 유사한 배수면적(평균 $0.277km^2$)을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 면적한계기준의 경우 수원유역의 형상을 구속하여 왜곡된 배수구조를 모의할 수 있음을 예상할 수 있다. 고무적인 결과로서, Eq. (21)의 멱수(0.540)는 경사-면적한계기준에 의한 수원유역들(Fig. 12)의 형상이 Montgomery and Dietrich(1989)가 주장한 바와 같이 기하학적 상사성을 가질 수 있음을 제시한다. 이로부터 보다 합리적인 유역의 배수구조를 모의하기 위한 수단으로는 경사-면적한계기준이 타당할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 배수밀도와 수원유역의 기하학적 특성을 기반으로 하여, 전적비교 유역에 대한 수치지도 수로망 및 면적한계기준과 경사-면적한계기준에 따라 각각 동정된 가설수로망 등, 총 3개 수로망의 형태에 따른 배수구조를 분석하여 보았다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 대상유역의 지표면유동거리를 pixel별로 산정해본 결과, 3개 수로망 모두에서 지표면유동경로의 공간적 변동성을 확인할 수 있었다. 이로부터 배수밀도는 공간적 변동성을 무시할 수 없는 지형학적인자임을 추론할 수 있다.
- 2) Shreve의 link분류법에 따라 대상유역의 배수구조를 도시하여본 결과, 3개의 수로망이 마치 자연유역의 진화과정과 유사하게 나타나는 것을 볼 수

있었다. 이들이 동일한 시점에 대한 집수평면과 등고선을 기반으로 하고 있음을 감안할 때 본 연구에서 DEM으로부터 동정한 가설수로망이 수로망의 공간-채움 구조를 보다 신뢰성 있게 묘사하고 있는 것으로 판단할 수 있었다.

- 3) 배수밀도를 이용하여 산정된 단위면적 당 평균폭 및 형상계수로부터 경사-면적한계기준에 의한 수로망이 대상유역의 배수구조를 가장 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 면적한계기준과 경사-면적한계기준에 의한 수로망들은 시각적으로 매우 유사한 형태의 망상구조를 보임에도 불구하고 개별적인 배수구조를 가질 수 있음을 볼 수 있었다.
- 4) 수원유역의 특성길이와 배수면적 사이의 상관성에 대한 분석 결과, 면적한계기준의 경우 수원유역의 형상을 구속하여 왜곡된 배수구조를 모의할 수 있음을 확인할 수 있었다. 경사-면적한계기준에 의한 수원유역들의 형상은 Montgomery and Dietrich(1989)가 주장한 바와 같이 기하학적 상사성을 가질 수 있음이 예상되었다. 따라서 보다 합리적인 유역의 배수구조를 모의하기 위한 수단으로는 경사-면적한계기준이 타당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김재한(2005), 수문계의 수학적 모형, 선형계를 중심으로, 도서출판새론, 373-375.
 김주철, 김재한(2007), "DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현", 한국수자원학회논문집, 40(4), 287-297.
 김주철, 윤여진, 김재한(2005), "Nash 모형의 지체시간을 이용한 GIUH유도", 한국수자원학회논문집, 38(10), 801-810.
 Abraham, A. D.(1984), "Channel network: A geomorphological perspective", *Water Resources Research*, 20(2), 161-188.
 Bras, R. L.(1990), *Hydrology, An introduction to*

- hydrologic science, *Addison Wesley*, 574.
- Brierley, G. J. and Fryirs(2005), Geomorpholgy and river management, Application of the river styles framework, *Blackwell Publ*, 22.
- Brutsaert, W. and Nieber, J. L.(1977), "Regionalized drought flow hydrographs from a matured glaciated plateau", *Water Resources Research*, 13(3), 637-643.
- Eagleson, P. S.(1970) *Dynamic Hydrology, McGraw-Hill*.
- 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, 567-581.
- Gregory, K. J. and Walling, D. E.(1973), *Drainage basin form and process, A geomorphological approach, Edward Arnold*, 51.
- Ijjasz-Vasquez, E. J. and Bras, R. L.(1995), "Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models", *Geomorphology*, 12, 299-311.
- La Barbera, P. and Rosso, R.(1989), "On the fractal dimension of stream networks", *Water Resources Research*, 25(4), 735-741.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.(1989), "Source area, drainage density, and channel initiation", *Water Resources Research*, 25(8), 1907-1918.
- Montgomery, D. R. and Foufoula-Georgiou, E.(1993), "Channel network source representation using digital elevation models", *Water Resources Research*, 29(12), 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, 324-344.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Valdes, J. B.(1979), "The geomorphologic structure of hydrologic response", *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A.(2003), *Fractal river basins, Chance and self-organization, Cambridge*, 27.
- Shreve, R. L.(1966), "Statistical law of stream numbers", *Journal of Geology*, 74, 17-37.
- Smart, J. S.(1972), "Channel Networks", *Advances in Hydrosience*, 8, 305-346.
- Strahler, A. N.(1964), "Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks", pp. 4.39-4.76, In: *Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill*.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I.(1988), "The fractal nature of river networks", *Water Resources Research*, 24(8), 1317-1322.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. and Rodríguez-Iturbe, I.(1992) "A physical basis for drainage density", *Geomorphology*, 5, 59-76.
- Turker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A. and Bras, R. L.(2001) "Statistical analysis of drainage density from digital terrain data", *Geomorphology*, 36, 187-202.

(논문번호:07-17/접수:2007.02.21/심사완료:2007.04.25)