韓 國 水 資 源 學 會 論 文 集
第41卷 第8號 · 2008年 8月
pp. 797～806

DOI: 10.3741/JKWRA.2008.41.8.797

Fractal 나무를 기반으로 한 배수구조의 기하학적 특성

The Geometric Properties of the Drainage Structures based on Fractal Tree

김 주 철* / 김 재 한**

Kim, Joo Cheol / Kim, Jae Han

Abstract

The geometric properties of the drainage structures are analyzed through depicting the drainage network which is composed of the whole drainage paths in the natural basin defined at the specific scale. The theoretical consideration is performed on the general structures of networks organized by ramification process based on Fractal tree and Horton's law. The drainage network is generated via ArcGIS, ordered by Strahler's ordering scheme and investigated with Strahler's order. As a results of the Richardson's method it is shown that there may exist the distinct behavioral characteristics between overland-flow and channel flow and the natural stream networks would be space-filling Fractals. As a result, it is shown that the values estimated by considering the overland-flow on being applied to the field data give the different results from the empirical method applied until now. As expected, therefore the results obtained from this study are sure to be devoted further researches on the channel networks.

keywords : drainage structure, Fractal tree, Strahler's ordering scheme, Horton's law

요 지

본 연구에서는 특정 해상도상에서 정의되는 유역의 모든 배수경로들로 구성되는 배수망을 도시하여 자연유역의 배수구조에 대한 기하학적 특성을 분석하여 보았다. 이를 위하여 Fractal 나무와 Horton의 법칙을 기반으로 분기에 의하여 조직되는 망상구조에 대하여 이론적 고찰을 수행하였다. 배수망의 작도에는 ArcGIS를 적용하였고 작도된 배수망에 대하여 Strahler의 차수기법에 따라 위상구조를 수립하여 차수별 배수구조의 기하학적 특성을 분석하고자 시도하여 보았다. Richardson의 방법에 따라 배수구조의 Fractal 특성을 분석해 본 결과 지표면유동과 하천유동 사이에는 개별적인 거동특성이 존재할 수 있음을 볼 수 있었고 자연유역의 하천망은 공간을 채워가는 Fractal 도형임을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과로부터 지표면유동을 포함한 망상구조에 대한 Fractal 이론을 실제유역에 적용하였을 경우 지금까지의 경험식에 의한 차수법칙과 상이한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 이의 결과들은 추후 망상구조의 결정에 크게 기여될 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 배수구조, Fractal 나무, Strahler의 차수기법, Horton의 법칙

* 한국수자원공사 수자원연구원 연구원
Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Daejeon 305-730, Korea
(e-mail: kjoocheol@hanmail.net)
** 충남대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea
(e-mail: kjh@cnu.ac.kr)

1. 서 론

비교적 최근 복잡한 자연현상들에 대한 체계적인 접근 수단으로서 Fractal 기하학(Mandelbrot, 1982)과 자기조직화에 의한 임계성(self-organized criticality; SOC) 이론(Bak, 1996)이 등장하였다(Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 2003). 이들은 주로 기존의 표준기하학(Euclid, Mandelbrot, 1982)이나 물리법칙만으로는 설명될 수 없는 복잡한 형태나 현상들에 대한 논리적 추론을 그 목적으로 한다. 한 가지 흥미로운 사항은 두 이론 모두 자연현상이 갖는 복잡성(complexity)에 대한 표본으로서 과거 수문학자들이 제시한 바 있는 유역의 거동특성(예를 들면, Hack의 법칙이나 Horton의 법칙 등)에 주목하고 있다는 점이다. 이는 유역이 '무수히 많은 성분들의 동적 상호작용으로 구성되는 대표적인 복잡계(complex system)들 중의 하나임'을 증명하는 것으로 볼 수 있을 것이다(Rodríguez-Iturbe, *et al.*, 1992). 실제로 수문학 분야에서 유역은 구릉지사면(hill-slope)과 하천망(stream network)의 상호작용을 통한 복합적인 강우-유출 변환계로서 정의된다. 따라서 물리적으로 기초한 강우-유출 해석은 유역의 배수구조에 대한 정확하고 객관적인 평가를 바탕으로 수행되어야 할 것이다.

최근 약 20여 년간에 걸친 수치고도모형(DEM)을 기반으로 한 지리정보처리 기술의 발달은 폭 넓은 배수구조에 대한 해석을 가능하게 하고 있다. 예를 들면 Tarboton, *et al.*(1988)은 수치고도모형으로부터 추출한 하천망에 대하여 Richardson의 방법 및 box counting 방법 등을 적용하여 Fractal 차원을 산정한 바 있다. 여기서 이들은 하천망은 각 하천구간과 전체로서의 하천망이 별개의 차원을 갖는 Fractal 도형임을 제시한다. 비슷한 시기에 La Babera and Rosso(1989)는 하천망의 Fractal 차원을 Horton의 법칙(즉 분기비와 길이비)에 대한 해석적 함수로서 유도한 결과를 발표한다. 이후 이들의 연구결과를 바탕으로 수치고도모형을 기반으로 한 하천망의 Fractal 차원과 Horton의 법칙에 대한 일련의 연구 성과들이 발표되어진다(Rosso, *et al.*, 1991; Beer and Borgas, 1993; Puente and Castillo, 1996). 주목할 만한 연구 성과로서 Agnese, *et al.*(1996)은 하천망의 Fractal 차원을 Shreve(1966)의 수로구간(link) 분류법에 따라 본류하천 선분수(basin diameter)와 수계망크기(magnitude)의 함수로서 제시한 바 있는데 이는 전술한 Horton의 법칙을 기반으로 한 연구 성과들과 함께 기존의 지형법칙과 Fractal 이론을 결합하여 하천망의 구조에 대한 일반 이론을 수립하고자 한 90년대 수문학자들의 혁신적인 시도로서 평가할 만하다. 국내에서는 전민우와 조원철(1992), 고영찬과 선우중호(1998), 전민우(2001) 등에 의하여 우리나라 유역의 하천망에 대한 Fractal 차원이 산정된 바 있다. 또한 홍일표와 고재웅(1999)은 Fractal 이론을 이용하여 Rosso(1984)의 연구 결과를 개선하고자 시도하였는데, 강우-유출모형 매개변수들의 동정과정에 하천망의 Fractal 특성이 직접 적용된 점이 주목할 만하다. 유사한 시도로서 고영찬(1999)은 Snyder 합성단위도의 관계식에 Fractal 차원을 적용한 바 있다.

최근 하천망의 구조와 관련된 연구 성과들이 갖는 주요한 특징 중의 하나로는 자기조직화에 의한 임계성(Bak, 1996)과의 밀접한 상관성을 들 수 있다(Hergarten and Neugebauer, 2001; Hergarten, 2002; Pelletier, 2007; Turcotte, 2007). 물리학 분야에서 등장한 개념인 자기조직화에 의한 임계성은 현재 각종 자연현상이 갖는 Fractal 특성의 유일한 근원으로서 해석되고 있다. 따라서 전술한 연구 경향은 지금까지 주로 각종 경험법칙(예를 들면 Horton 법칙)에 따라 형태학적으로 접근해 가던 유역의 배수구조에 대하여 보다 체계적인 접근이 시도되고 있음을 시사한다 할 수 있다. 이러한 맥락에 따라 본 저자들은 수치고도모형으로부터 신뢰성 있는 하천망을 추출하기 위한 연구를 수행한 바 있다(김주철과 김재한, 2007). 이 과정에서 얻어진 주요한 경험 중의 하나는 하천망의 동정(identification)에 사용되는 기법에 따라 동일한 유역에 대하여(심지어는 동일한 축척에 대하여) 다수의 하천망이 수집될 수 있다는 것이다. 실제로 본 저자들은 선행연구의 수행 과정에서 총 4개의 하천망을 얻을 수 있었는데, 이들은 각각 현 시점에서 이용 가능한 기성자료인 국립지리원에서 발행한 수치지도상의 하천망과 수자원 단위지도상의 하천망 그리고 본 저자들이 면적한계기준(O'Callaghan and Mark, 1984)과 경사-면적한계기준(Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995)을 적용하여 수치고도모형으로부터 직접 추출한 2개의 하천망들로 구성된다. 여기서 만약 대상유역에 대하여 호우시의 강우-유출 현상을 분석하고자 한다면 어떤 하천망이 가장 신뢰성 있는 결과를 줄 수 있을까?

본 저자들이 선행연구 과정에서 얻은 또 하나의 주요한 경험은 수집된 하천망들이 서로 완전히 일치하지는 않지만 시각적으로 유사한 형상(나뭇가지 형태의 골격)을 공유하고 있다는 점이다. 각 하천망들 사이의 가장 큰 차이점은 수원(source)에 대한 정의에서 찾을 수 있었다. 수원은 유역의 임의 지점을 하천과 지표면으로 구분하는 기준으로서 이에 따라 동일한 유역에 대하여 촘촘한 하천망이나 성긴 하천망을 추출할 수

있게 된다. 이는 수치고도모형으로부터 면적한계기준을 적용하여 하천망을 추출할 경우 한계(threshold)값에 따라 변화하는 하천망의 형상으로부터 쉽게 유추할 수 있는 사항일 것이다. 하지만 아직까지 수원에 대한 이론적 혹은 정량적 정의는 제시되어지지 않고 있다 (Montgomery and Dietrich, 1989). 불행하게도 이러한 문제나 혹은 위 단락에서 제시한 질문에 대한 해답은 향후 유역의 배수구조에 대하여 마치 Newton의 운동법칙과 같이 명확한 물리법칙이 발견되어야 가능할 수 있을 것으로 생각된다.

그렇다면 유역 내 배수경로를 하천과 지표면의 구분 없이 모두 도상에 작도할 경우 일반적인 하천망의 형상과 유사한 기하학적 특성을 발견할 수 있을까?(이는 수치고도모형으로부터 하천망을 추출할 경우 유역 내 모든 지점을 하천으로 간주하는 것과 동일한 가정이다.) 현재 지리정보처리기술은 특정 해상도상에서 정의되는 모든 배수경로들을 시각적으로 확인할 수 있는 수준에 도달하고 있다(Tarboton, 2003). 따라서 본 연구에서는 유역 내부에서 발생할 수 있는 모든 배수경로들을 하나의 도상에 도시하고 이로부터 해당유역에 대한 완전한 배수망(drainage network)을 구성하여 이에 대한 기하학적 특성을 분석해 보고자 한다. 이러한 시도의 주된 목적은 유역의 배수구조가 갖는 근본적인 특성에 보다 접근하고자 하는 것으로서 이를 위하여 우선 분기에 의하여 구성되는 망상구조에 대한 이론적 고찰을 Fractal 기하학과 Strahler의 차수기법 및 Horton의 법칙을 중심으로 수행하였다. 실제 배수망의 구성에는 지리정보체계(GIS) 중의 하나인 ArcGIS를 적용하였고 작도된 배수망에 대하여 Strahler의 차수기법에 따라 위상구조를 수립하여 배수망의 분기특성이 갖는 기하학적 특성을 체계적으로 분석하고자 시도하여 보았다.

2. 망상구조(network)에 대한 이론적 접근

2.1 Fractal 나무의 기하학적 특성

분기에 의해 형성되는 망상구조의 기하학적 특성은 Fig. 1과 같은 Fractal 나무의 단계별 성장에 대한 Hergarten(2002)의 고찰로부터 쉽게 추론할 수 있다: 여기서 길이가 1인 한 개의 Fractal 줄기(initiator)를 고려하였다. 각 성장 단계별로 길이가 $\lambda(0<\lambda<1)$배 만큼 축소된 n개의 가지가 분기한다면 k번 째 성장 단계에서의 가지의 개수 n_k와 길이 r_k는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$n_k = n^k \tag{1}$$

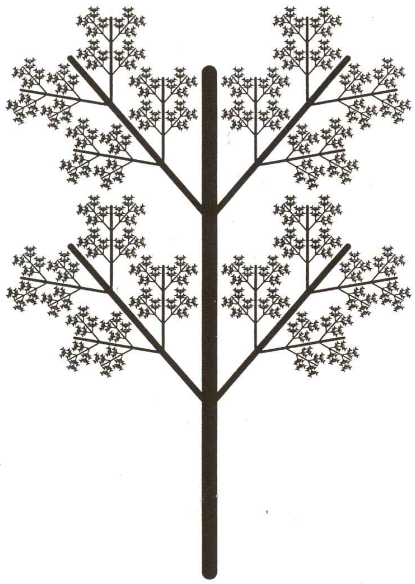

Fig. 1. Fractal 나무(Hergarten, 2002)

$$r_k = \lambda^k \tag{2}$$

여기서 길이가 r_k보다 크거나 같은 가지들의 개수 $N(r_k)$와 길이의 합 $L(r_k)$은 다음과 같이 등비급수에 대한 합의 형태로서 산정될 수 있다.

$$N(r_k) = \sum_{i=0}^{k} n^i = \frac{n^{k+1}-1}{n-1} \tag{3}$$

$$L(r_k) = \sum_{i=1}^{k} n^i \lambda^i = \frac{(n\lambda)^{k+1}-1}{(n\lambda)-1} \tag{4}$$

Eq. (2)의 관계를 Eqs. (3), (4)에 대입하여 정리하면 이들은 다음과 같이 변환된다.

$$N(r_k) = \frac{n}{n-1} r_k^{\frac{\log n}{\log \lambda}} - \frac{1}{n-1} \tag{5}$$

$$L(r_k) = \frac{(n\lambda)}{(n\lambda)-1} r_k^{1+\frac{\log n}{\log \lambda}} - \frac{1}{(n\lambda)-1} \tag{6}$$

여기서 $\frac{\log n}{\log \lambda} = -D$로 치환할 경우 Eqs. (5), (6)은 다음과 같이 멱함수 법칙(power law) 형태의 Fractal 관계식이 됨을 알 수 있다.

$$N(r_k) \propto r_k^{-D} \tag{7}$$

$$L(r_k) \propto r_k^{1-D} \tag{8}$$

여기서 D는 Fig. 1과 같은 Fractal 나무의 Fractal 차원으로 정의된다. Eqs. (7), (8)은 r_k에 대하여 $N(r_k)$ 및 $L(r_k)$를 양대수지 상에 도시할 경우 직선의 관계가 나타날 것임을 의미한다. 확정론적 Fractal 도형인 Fractal 나무의 경우 상기 관계들은 가지의 규모(scale)에 관계없이 무한히 지속적으로 이루어지게 된다.

2.2 Strahler의 차수기법과 Horton의 법칙

하천망의 위상구조를 정의하는 Strahler의 차수기법(ordering scheme)은 이미 잘 알려진 내용으로서 여기서는 아래와 같이 간단하게 소개키로 한다.

① 수원으로부터 발원한 수로는 1차 하천으로 정의된다.

② i차 하천 두 개가 만나면 $i+1$차 하천을 형성한다.

③ 서로 다른 차수의 하천이 만나면 2개 차수 가운데 큰 차수를 유지한다.

상기한 Strahler의 차수기법에 따라 하천망의 위상구조가 수립될 경우 Horton의 법칙(혹은 배수구성법칙)은 다음과 같이 정의될 수 있다(Smart, 1972).

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_\omega} \tag{9}$$

$$R_L = \frac{L_\omega}{L_{\omega-1}} \tag{10}$$

$$R_A = \frac{A_\omega}{A_{\omega-1}} \tag{11}$$

여기서 R_B, R_L, R_A는 각각 분기비, 길이비, 면적비이고 N_ω, L_ω, A_ω는 각각 ω차 하천의 개수, 평균길이, 평균배수면적이다. Eqs. (9)~(11)를 이용하여 최근 수행된 흥미로운 연구사례를 중국의 지리학자인 Chen(2007)의 논문으로부터 찾아 볼 수 있다. 여기서 그는 도시의 계층구조(hierarchy)와 하천망의 위상구조 사이의 유사성을 지적하고 Eqs. (9)~(11)과 동일한 형태의 기술자(descriptor)를 이용하여 도시체계의 자기조직화(self-organization) 경향을 분석한 바 있다.

3. 본 연구 방법

만약 자연유역의 하천망을 Fig. 1의 Fractal 나무와 같은 Fractal 도형으로서 간주할 경우, Eqs. (1), (2)와 Eqs. (9), (10)은 개념적으로 일치하게 된다. 여기서 Fractal 나무의 성장단계별 가지의 개수 n과 길이의 변화율 λ은 각각 Eqs. (9), (10)의 분기비 R_B와 길이비 R_L에 해당하게 됨을 알 수 있다. 따라서 전술한 Fractal 나무의 Fractal 차원에 대한 관계식 $\frac{\log n}{\log \lambda} = -D$로부터 하천망의 Fractal 차원은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$D = \frac{\log R_B}{\log R_L} \tag{12}$$

여기서 λ, R_L은 각각 가지와 하천의 축소율 및 신장률로서 결과적으로 양자는 반대의 부호를 취하게 된다. Eq. (12)는 La Babera and Rosso(1989)가 Horton의 법칙에 따라 제시한 하천망의 Fractal 차원에 대한 관계식과 완전히 일치하는 결과로서 선(line)의 형태(1차원 도형)로 이루어진 하천들이 면(area)의 형태(2차원 도형)로 이루어진 유역을 완전히 배수하기 위하여 분기현상에 의하여 망상구조를 조직해 나가는 규모별 거동특성, 즉 하천망의 공간-채움(space-filling)의 정도로 해석할 수 있다.

La Babera and Rosso(1989)는 Eq. (12)를 유도하는 과정에서 자연유역의 하천망을 확정론적 Fractal 도형으로서 가정하였다. 이는 Eqs. (7), (8)이나 Eq. (12)와 같은 관계가 하천망으로부터 지표면 상의 임의지점(예를 들면 잔디 사이를 흐르는 물의 경로)까지 지속적으로 성립하게 될 것임을 시사한다. 하지만 지리학자인 Hergarten(2002)은 자신의 저서에서 이와는 조금 다른 견해를 피력한 바 있다. 그는 실제 자연현상에서 발견될 수 있는 Fractal 특성은 확정론적 Fractal 도형과는 달리 특정 범위 내에서만 성립할 것이라는 의견을 제시하였다. 수문학적 관점에서 이러한 견해를 유추해 보면 유역의 배수경로는 하천유동(channel flow)과 지표면유동(overland flow) 사이의 상이한 역학기구(mechanism)에 따라 서로 다른 특성권역을 형성할 수 있음이 예상되는 것이다. 본 저자들은 이와 비슷한 결과를 수치고도모형으로부터 산정된 국부경사와 기여면적 사이의 규모에 따른 거동특성에 대한 연구로부터 얻은 바 있다(김주철과 김재한, 2007).

따라서 본 연구에서는 유역 내부에서 발생할 수 있는 모든 배수경로들로부터 하천유동과 지표면유동을 포괄할 수 있는 완전한 배수망을 구성하고 이의 Fractal 구조를 추출하여 그 특성이 하천유동 및 지표면유동 권역에서 어떻게 나타날 수 있는지를 검토/분석한다. 실제로 구성되어지는 배수망의 위상구조는 Strahler의 차수기법에 따라 수립하고 각 차수별 하천 길이의 변동성

을 Richardson의 방법과 개념적으로 결합하여 Eqs. (7), (8)에 따라 Fractal 차원을 산정한다. 또한 차수별 배수망의 분기비 R_B와 길이비 R_L을 Eq. (12)에 적용하여 Horton의 법칙에 따라 Fractal 차원을 산정하고 양자를 비교하여 종래의 차수법칙들과 어떠한 차이점을 제시하여 주는가를 알아보고자 한다. 이는 앞으로 GIUH(지형학적 순간단위도)와 같이 차수법칙을 이용하는 각종 방법들에 적용시켜 줌으로써 보다 진일보한 지형학적수문학 연구에 기여할 수 있으리라 확신하며 이에 대해서는 지면관계 상 후속 연구과제로 남겨둔다.

4. 적용사례

4.1 대상유역의 선정

본 연구에서는 대상유역으로 임진강 수계의 설마천 유역을 선정하였다. Fig. 2는 임진강 합류점을 출구로 하는 설마천에 대한 배수유역도로서 그림 중앙의 기호 ◉는 현재 시험유역이 운영 중에 있는 전적비교 지점을 나타낸다. Fig. 2 위에 표시되어 있는 하천망은 1:25000 축척의 수치지도 상의 하천망으로서 전적비교 지점 직하류에 위치한 합류점 이후부터 Strahler의 차수기법에 따라 3차 하천이 시작되고 있음을 알 수 있다. 결국 합류점 상류의 음영으로 표시된 지역은 차수가 2차인 한 그루의 나뭇가지 형태의 하천망에 의하여 배수되는 형상임을 볼 수 있다. 이러한 형태는 전술한 본 연구의 목적에 잘 부합되는 것으로 판단되어 상기한 합류점을 출구로 하는 지역을 대상유역으로 선정하였다.

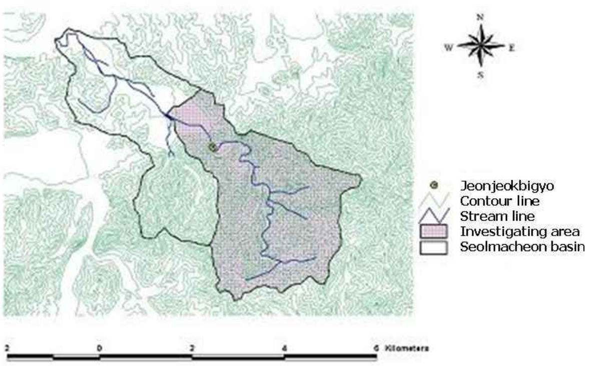

Fig. 2. Seolmacheon Basin

4.2 배수망의 작성과 위상구조의 수립

대상유역에 대하여 발생 가능한 모든 배수경로를 도시하여 배수망을 작성하여 보았다. 수치고도모형의 생성에는 1:25000 축척의 수치지도를 적용하였고 픽셀(pixel)의 해상도는 $20m \times 20m$로 하였다. 지리정보체계로는 ArcGIS 상에서 운용되는 확장자(extension)인 TauDEM(Tarboton, 2003)을 이용하였으며 각 픽셀별 흐름방향은 현재 수문학 분야에서 일반적으로 적용되는 8방향 모형을 적용하여 모의하였다. Fig. 3~8은 상기한 과정에 따라 작성된 배수망에 Strahler의 차수기법을 적용하여 위상구조를 수립한 결과를 각 차수별로 작도한 것으로서 Fig. 3의 줄기(본류)로부터 차수별 성장단계에 따라 배수경로들이 분기해 가는 과정을 시각적으로 확인할 수 있다. 대상유역의 경우 배수경로의 최대차수는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 6차로 산정되었다. Table 1은 각 차수별 배수경로들의 개수와 평균길이 및 차수별 길이의 합을 정리한 결과이다.

4.3 배수망의 Fractal 구조

Table 2는 Figs. 3~8의 총 6개의 배수망들에 대하여 1차 배수경로의 평균길이 L_1보다 크거나 같은 배수경로들의 개수 $N(L_1)$과 길이의 합 $L(L_1)$을 산정한 결과

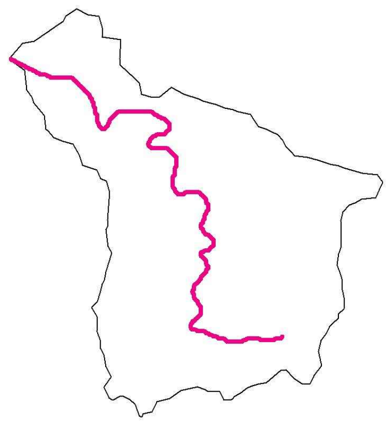

Fig. 3. 1st Order Drainage Network

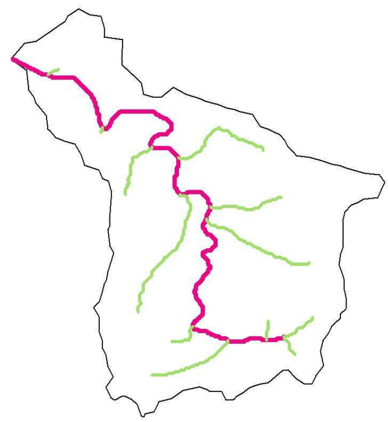

Fig. 4. 2nd Order Drainage Network

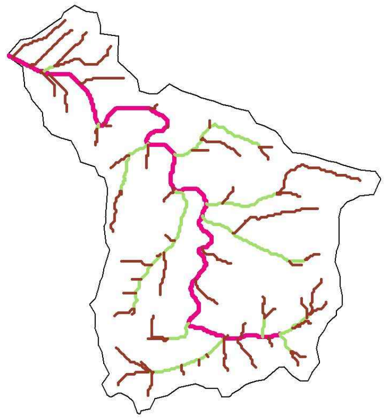

Fig. 5. 3rd Order Drainage Network

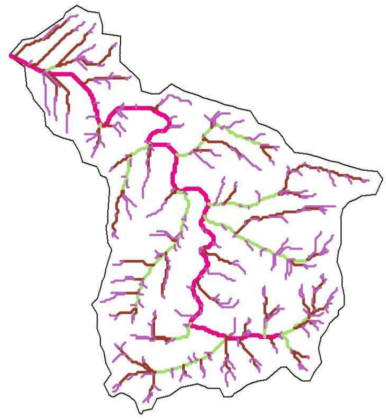

Fig. 6. 4th Order Drainage Network

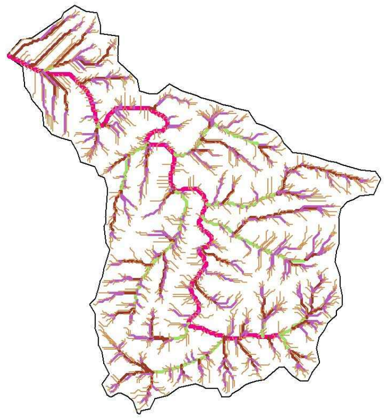

Fig. 7. 5th Order Drainage Network

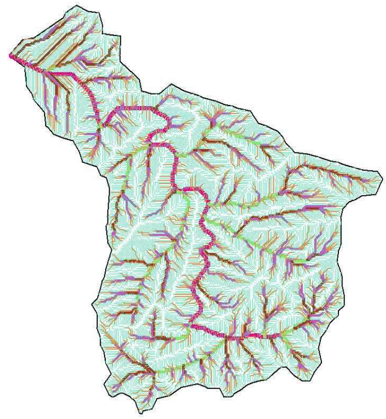

Fig. 8. 6th Order Drainage Network

Table 1. Topological Structure of Drainage Network by Strahler's Ordering Scheme

ω	N_ω	$L_\omega(m)$	$\sum L_\omega(m)$
1	5601	73	408873
2	1358	75	101850
3	284	107	30388
4	62	294	18228
5	12	722	8664
6	1	7057	7057

이다. 이는 Fractal 기하학의 관점(혹은 Richardson의 방법)에서 최소 눈금의 길이가 L_1인 자(ruler)를 이용하여 Fig. 8과 같은 배수망의 길이를 계량할 경우 자의 축척(본 연구에서는 차수별 1차 배수경로의 평균길이)이 변화함에 따라 산정될 수 있는 결과와 같은 의미를 갖게 된다. 여기서 Ω는 각 배수망들의 최고차수를 의미한다.

Figs. 9, 10은 L_1에 대한 $N(L_1)$과 $L(L_1)$을 양대수지 상에 도시한 결과로서 4차 배수경로를 기준으로 분명하게 구분되는 거동특성이 나타나고 있음을 양자 모두에서 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 각각 지표면유동(4~6차 배수경로)과 하천유동(1~4차 배수경로)의 상이한 역학기구에 따른 결과인 것으로 추론된다. 따라서 자연유역에 대한 하천망의 경우 확정론적 Fractal 도형인 Fractal 나무와는 달리 분기에 의한 망상구조의 규모불변성(scale invariance)이 성립하는 특정한 범위가 존재할 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 대상유역은 유역면적이 약 $9.7km^2$인 산악 소유역으로서 이러한 결과가 유역면적이 이보다 큰 중규모 혹은 대규모 유역에서도 나타날 수 있는지에 대한 후속연구

가 반드시 필요할 것으로 생각된다.

Figs. 9, 10의 1~4차 배수경로에 대한 회귀식의 멱수들과 Eqs. (7), (8)의 관계로부터 대상유역의 하천망은 약 1.4~1.5 정도의 Fractal 차원을 가질 수 있음이 예상된다. 그런데 이는 선행연구(La Babera and Rosso, 1989)에서 제시한 일반적인 하천망의 Fractal 차원의 범위(1.6~1.7)에 비하여 다소 작은 값임을 알 수 있다. 본 연구에서 산정한 Fractal 차원은 분기에 의하여 조직되는 전체로서의 하천망을 대상으로 한 것으로 여기에는 사행에 의한 개별적인 하천구간들의 Fractal 차원이 고려되고 있지 않다. Mandelbrot(1982)은 Hack의 법칙으로부터 일반적인 하천구간들에 대한 Fractal 차원을 약 1.2로서 제시한 바 있다. 만약 이러한 영향을 고려할 경우 대상유역의 하천망에 대한 Fractal 차원은 약 1.68~1.8 정도로서 선행연구에서 제시한 범위와 유사한 값을 갖게 된다. 이로부터 자연유역의 하천망은 2차원 평면을 배수하기 위하여 공간을 채워가는 Fractal 도형임을 확인할 수 있다.

Table 3은 Figs. 3~8의 총 6개의 배수망들에 대하여 분기비 R_B와 길이비 R_L을 산정하고 이로부터 Eq. (12)에 따라 Fractal 차원을 산정해 본 결과로서 차수가 증가함에 따라 1차원(선)으로부터 2차원(면)으로 접근해 가는 경향이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 당초 기대했던 결과와는 다소 상이한 것으로서 Eq. (12)에 의해 산정된 결과가 전술한 결과와 일관성을 갖기 위해서는 1~4차 배수망들의 Fractal 차원은 서로 유사한 값으로 나타나야 한다. 하지만 Table 3의 결과에서는 이러한 경향을 찾을 수 없다. Beer and Borgas(1993)는 Horton의 법칙을 일종의 수리변환(mathematical transformation)으로서 정의한 바 있다. 이는 복잡한 하천망의 망상구조를 Horton의 법칙이 명확하게 성립하는 확정론적 망상구조 혹은 Horton의 망상구조(Hortonian network)로 변환하는 것을 의미하는 것으로서 만약 자연유역의 하천망이 확정론적 망상구조로부터 상당한 편의(bias)를 가질 경우 그 적용성의 한계가 나타날 수 있음을 의미하는 것이다. 이로부터 본 연구의 대상유역(전술한 바와 같이 매우 작은 소유역이다.)은 Horton의 망상구조로부터 상당히 벗어난 거동특성을 보이고 있는 것으로 추론될 수 있다.

한 가지 주목되는 사항은 Table 3에서 4차 배수망에 대한 Fractal 차원이 1.38로 산정된 것으로 전술한 결과와 유사하게 나타나고 있는 점이다. 이로부터 본 연구의 대상유역에서는 최대 4차 하천들이 존재할 수 있는 것으로 판단된다. 그런데 측량성과를 기반으로 한 Fig. 2의 수치지도 상에는 최대 2차(또한 매우 적은 개수의) 하천까지만이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이로부터 Figs. 5, 6에 표시된 상당수의 3, 4차 배수경로들이 간헐천의 형태로 유역내 존재하고 있는 것이 아닐까 판단된다.

Table 2. Fractal Structure of 6 Drainage Networks with Stream Order

Ω	$L_1(m)$	$N(L_1)$	$L(L_1)(m)$
1	7057	1	7057
2	722	13	15721
3	294	75	33949
4	107	359	64337
5	75	1717	166187
6	73	7318	575060

Table 3. Horton Ratio and Fractal Dimensions of 6 Drainage Networks

Ω	R_B	R_L	D
1	-	-	1.000
2	12.000	9.775	1.090
3	7.874	4.899	1.299
4	6.417	3.844	1.380
5	5.808	3.003	1.600
6	5.375	2.402	1.920

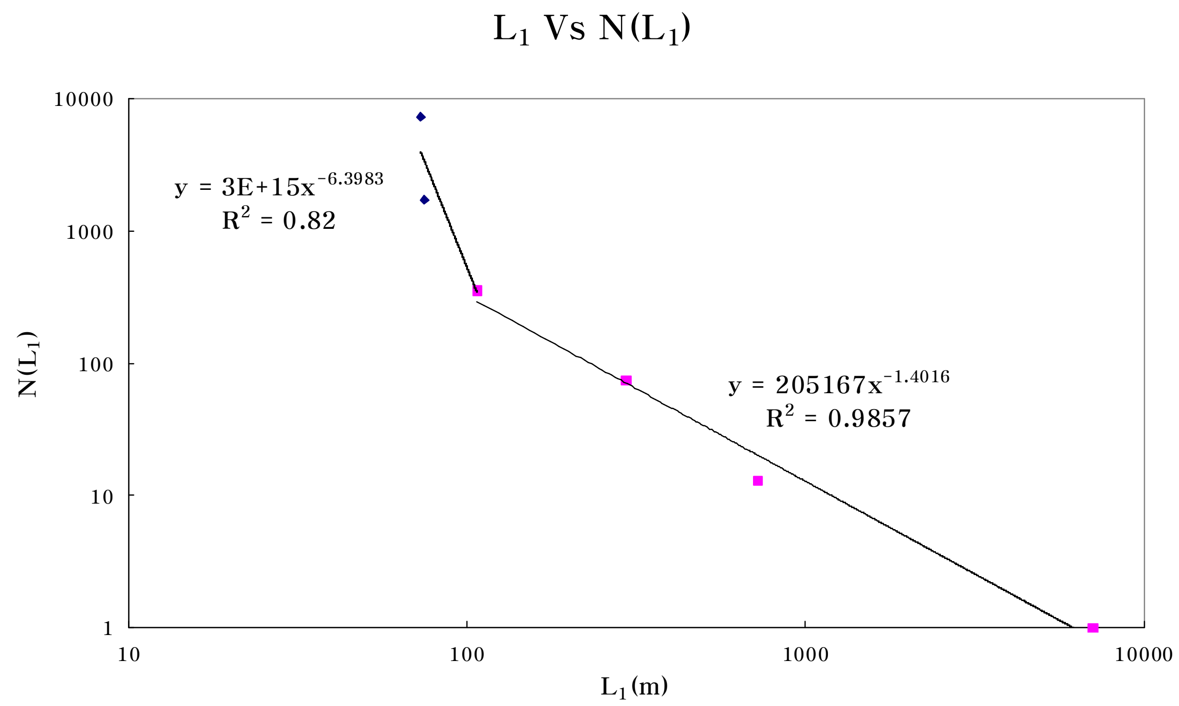

Fig. 9. Scaling Property of $N(L_1)$ with L_1

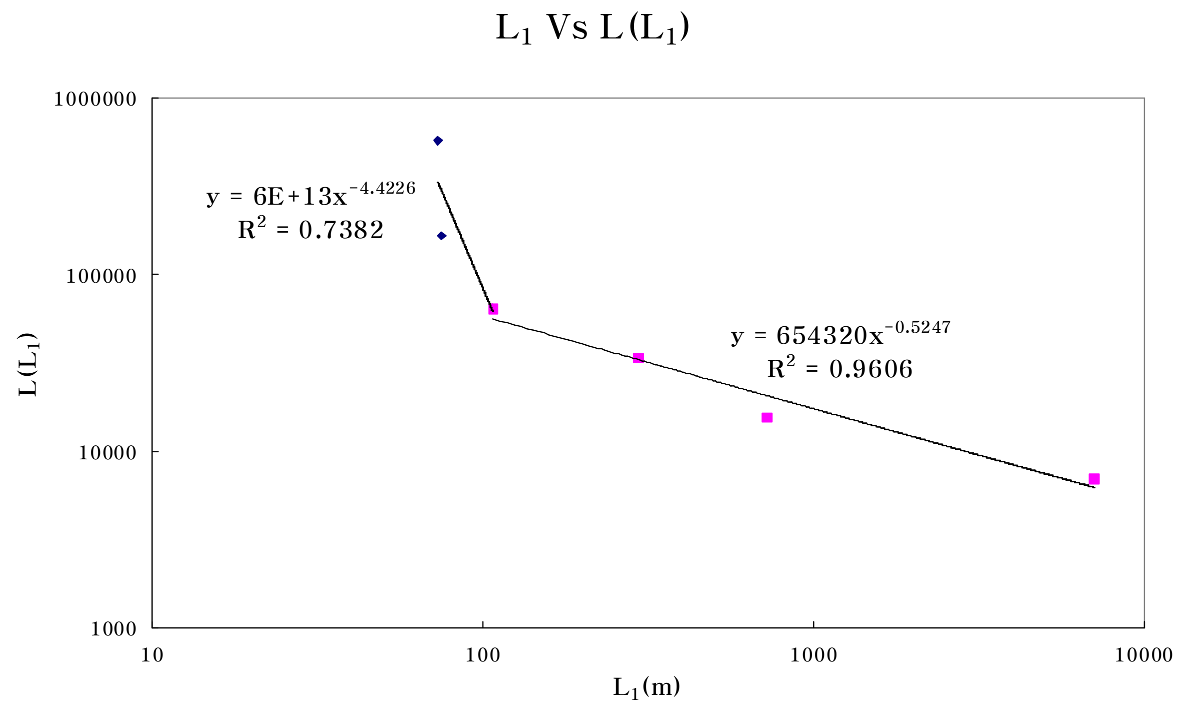

Fig. 10. Scaling Property of $N(L_1)$ with L_1

5. 결 론

본 연구에서는 특정 해상도상에서 정의되는 유역의 모든 배수경로들을 지리정보체계(GIS)를 이용하여 도시하고 이로부터 구성된 배수망에 대하여 Strahler의 차수기법에 따라 위상구조를 수립하여 각 차수별 배수구조의 기하학적 특성을 Fractal 기하학을 기반으로 분석하여 보았다. 이상으로부터의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 차수별 배수경로의 평균길이를 기반으로 Richardson의 방법에 따라 대상유역의 배수망에 대한 Fractal 특성을 분석해본 결과 자연유역의

배수구조는 지표면유동과 하천유동 사이의 상이한 역학구조에 따라 개별적인 거동특성을 보일 수 있음을 확인할 수 있었다. 이로부터 하천망의 망상구조가 갖는 규모불변성은 확정론적 Fractal 도형과는 달리 특정한 범위 내에서만 성립할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 대상유역의 경우 하천망의 Fractal 차원은 약 1.4~1.5 정도의 값을 가질 것이 예상이 된다. 이는 분기에 의한 전체로서의 하천망에 대한 Fractal 차원으로서 여기에 Mandelbrot(1982)이 제시한 사행에 의한 하천구간의 Fractal 차원을 고려할 경우 선행연구에서 제시한 일반적인 하천망에 대한 Fractal 차원의 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 이로부터 자연유역의 하천망은 2차원 평면을 배수하기 위하여 공간을 채워가는 Fractal 도형임을 확인할 수 있었다.

3) 각 차수별 배수망에 대하여 분기비와 길이비를 이용하여 Fractal 차원을 산정하여 본 결과 Richardson의 방법에 따른 결과와는 다소 상이한 경향이 나타남을 볼 수 있었다. 이는 대상유역의 배수구조가 Horton의 망상구조와는 상당한 편의를 갖기 때문에 발생하는 것으로 추론된다. 실제로 여러 학자들이 수행한 Fractal 차원과 Horton의 법칙에 대한 연구 사례에서 각 학자별로 개별적인 Fractal 차원 산정식을 제안한 것(Beer and Borgas, 1993)을 볼 수 있는데 이 역시 상기한 원인에 의한 것으로 판단된다. 따라서 추후 이와 관련된 후속연구가 필요한 것으로 생각된다.

4) 본 연구 결과와 대상유역의 수치지도상의 하천망을 비교해 볼 경우, 상당수의 배수경로들이 간헐천의 형태로 존재할 수 있음이 예상된다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교의 2007학년도 교원 연구력 강화사업으로부터 지원받아 수행되었습니다. 이에 감사의 말씀 드립니다.

참 고 문 헌

고영찬, 선우중호 (1998). “이목정 소유역의 하천차수를 고려한 프랙탈 차원의 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제5호, pp. 587-597.

고영찬 (1999). “프랙탈 차원을 이용한 스나이더 합성단위유량도 관계식 유도.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제3호, pp. 291-300.

김주철, 김재한 (2007). “DEM을 이용한 수로망의 형태학적 표현.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제4호, pp. 287-297.

김주철, 김재한 (2007). “배수밀도와 수원유역의 기하학적 특성을 기반으로 한 배수구조에 대한 해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제5호, pp. 373-382.

전민우, 조원철 (1992). “지형도 축척에 따르는 하천 수로망과 본류 하천길이에 관한 Fractal Dimension.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제12권, 제4-1호, pp. 97-106.

전민우 (2001). “Shreve의 수계망크기에 의한 하천유역의 프랙탈특성.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제2-B호, pp. 111-117.

홍일표, 고재웅 (1999). “하천의 프랙탈 특성을 고려한 지형학적 순간단위도의 개발(Ⅰ).” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제5호, pp. 565-577.

Agnese, C., D'Asaro, F., Grosso, G. and Rosso, R. (1996). "Scaling properties of topologically random channel network." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 183-193.

Bak, P. (1996). How nature works, *Coperincus/Springer-Verlag*, *New York*.

Beer, T. and Borgas, M. (1993). "Horton's law and the Fractal nature of streams." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 1475-1487.

Chen, Y. (2007). "Analogies between urban hierarchies and river networks: Fractals, symmetry, and self-organized criticality." *Chaos, Solitons & Fractals*, doi:10.1016/j.chaos.2007.09.059.

Hergarten, S. and Neugebauer, H.J. (2001). "Self-Organized Critical Drainage Networks." *Physical Review Letters*, Vol. 86, pp. 2689-2692.

Hergarten, S. (2002). Self-organized criticality in earth system, *Springer-Verlag*, *New York*.

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.

Pelletier, J.D. (2007). "Fractal behavior in space and time in a simplified model of fluvial landform evolution." *Geomorphology*, Vol. 91, pp. 291-301.

La Barbera, P. and Rosso, R. (1989). "On the Fractal dimension of stream networks", *Water Resources*

Research, Vol. 25, No. 4, pp. 735-741.

Mandelbrot, B.B. (1982). The Fractal geometry of nature, *W. H. Freeman, New York*.

Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1989). "Source area, drainage density, and channel initiation." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 1907-1918.

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.

Puente, C.E.. and Castillo, P.A. (1996). "On the Fractal structure of networks and dividers within a watershed." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 173-181.

Rodríguez-Iturbe, I., Ijjasz-Vasquez, E.J., Bras, R.L. and Tarboton, D.G. (1992). "Power law distribution of discharge mass and energy in river basins." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1089-1093.

Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A. (2003). Fractal river basins, Chance and self-organization, *Cambridge*.

Rosso, R. (1984). "Nash model relation of horton order ratios." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 914-920.

Rosso, R., Bacchi, B. and La Barbera, P. (1991). "Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 381-387.

Smart, J.S. (1972). "Channel networks." *Advanced in Hydrosciense*, Vol. 8, pp. 350-346.

Tarboton, D.G., Bras, R.L. and Rodríguez-Iturbe, I. (1988). "The Fractal nature of river networks." *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 8, pp. 1317-1322.

Tarboton, D.G. (2003). "Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology." *23rd ESRI International Users Conference*, *San Diego, California*.

Turcotte, D.L. (2007). "Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models." *Geomorphology*, Vol. 91, pp. 302-310.

(논문번호:08-35/접수:2008.03.12/심사완료:2008.06.13)