J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 5 (2021), pp. 289-299
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.5.289
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Analysis of bifurcation characteristics for the Seolmacheon experimental catchment based on variable scale of source basin

Kim, Joo-Cheol[a] · Jung, Kwan Sue[b]*

[a]Chief Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[b]Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

Paper number: 21-012
Received: 23 February 2021; Revised: 10 March 2021; Accepted: 10 March 2021

Abstract

This study analyzes bifurcation characteristics of the Seolmacheon experimental catchment by extracting the shape variation of channel network due to variable scale of source basin or threshold area. As the area of source basin decreases, a bifurcation process of channel network occurs within the basin of interest, resulting in the elongation of channel network (increase of total channel length) as well as the expansion of channel network (increase of the source number). In the former case, the elongation of channel reaches overwhelms the generation of sources, whereas, in the latter case, the drainage path network tends to fulfill the inner space of the basin of interest reflecting the opposite trend. Therefore, scale invariance of natural channel network could be expressed to be a balanced geomorphologic feature between the elongation of channel network and the expansion of channel network due to decrease of source basin scale. The bifurcation structure of the Seolmacheon experimental catchment can be characterized by the coexistence of the elongation and scale invariance of channel network, and thus a further study is required to find out which factor is more crucial to rainfall transformation into runoff.

Keywords: Source basin, Threshold area, Channel network, Bifurcation, Scale invariance

수원 유역의 변동성 규모를 기반으로 한 설마천 시험유역의 분기 특성 해석

김주철[a] · 정관수[b]*

[a]충남대학교 국제수자원연구소 수석연구원, [b]충남대학교 토목공학과 교수

요 지

본 연구에서는 수원 유역 혹은 한계지지면적의 변동성 규모에 따른 하천망의 형상 변화를 추출하여 설마천 시험유역의 분기 특성에 대한 해석을 수행하였다. 수원 유역의 면적이 감소함에 따라 대상 유역의 내부에는 하천망의 분기 현상이 발생하며, 그 결과로서 하천망의 신장(총 하천 길이의 증가)과 함께 하천망의 확장(수원의 개수 증가)이 동시에 나타남을 볼 수 있었다. 하천망이 신장되는 경우 하천 구간의 길이가 증가하는 경향이 새로운 수원이 생성되는 경향보다 우세하게 나타나는 반면, 하천망이 확장되는 경우 반대 거동에 따라 배수망이 유역 내부의 공간을 채워가는 과정으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이로부터 자연 유역의 하천망들이 가지는 규모 불변성은 수원 유역의 규모가 감소함에 따라 나타나는 하천망의 신장 특성과 하천망의 확장 특성이 상호 균형을 이루면서 발현되는 지형학적 특성으로 기술될 수 있었다. 설마천 시험유역의 분기 구조는 하천망의 신장 특성과 규모 불변성이 공존하는 형태로 판단되며 강우로 인한 유출 현상에 보다 지배적인 역할을 하는 요인에 대한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

핵심용어: 수원 유역, 한계지지면적, 하천망, 분기, 규모 불변성

***Corresponding Author.** Tel: +82-42-821-5675
E-mail: ksjung@cnu.ac.kr (K. S. Jung)

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

신뢰할 수 있는 강우-유출 현상에 대한 해석은 하천망의 범위(extent of channel network)나 지표면의 규모(scale of hillslope)와 같은 유역의 지형학적 구조에 대한 정확하고 객관적인 평가를 기반으로 수행되어야 한다(Brutsaert and Nieber, 1977; Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979; Paik and Kumar, 2004). 유역은 지표면과 하천 사이의 상호작용을 통하여 강우로 인한 유입량을 효율적으로 배수하기 위해 끊임없이 진화하는 자연계의 일종으로서, 다수의 하천 구간들이 하천망을 조직하여 유출량을 배수하는 역할을 수행한다. 따라서 Horton (1945)의 연구를 기원으로 수문학과 지형학 분야에서는 하천망의 형상(shape)을 중심으로 한 유역의 지형학적 구조에 대한 접근이 활발하게 이루어져 왔다(Strahler, 1952; Shreve, 1966; Smart, 1972).

과거 약 40여 년간에 걸친 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM)을 기반으로 한 지리정보체계(Geographic Information System, GIS)의 발달은 하천망의 형상에 대한 새로운 방식의 접근을 가능케 하고 있다(Moussa and Bocquillon, 1996; Moussa, 2003). 특히, O'Callaghan and Mark (1984)가 하천을 형성하기 위한 한계지지면적(threshold area)의 개념을 제시한 이래 DEM을 이용하여 하천망을 모의하기 위한 다양한 모형들이 제시되어 왔다(Tarboton *et al*., 1992; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995; Tarboton, 2003). 현재 이러한 기술적 진보는 하천망의 공간채움(space filling) 구조를 정량적으로 계량할 수 있는 수준에까지 이르고 있는바, 대표적인 예로서 Tarboton *et al*. (1988)은 DEM으로부터 추출한 하천망에 대하여 fractal 차원(dimension)을 추정한 바 있다. 여기서 fractal 차원이란 자기상사성(self-similarity)의 원리에 따라 정의되는 분수(分數) 형태의 차원(Yang and Paik, 2017)을 의미하는 것으로서 이들은 자연 유역의 하천망은 개별 하천 구간과 망상(network) 구조로서의 하천망이 별개의 차원을 갖는 fractal 도형의 일종임을 제시하였다.

DEM을 기반으로 하천망을 동정(identification)하는 방법들은 대개 DEM을 구성하는 pixel을 지표면 성분과 하천 성분으로 분류하는 기준에 따라 면적한계기준(O'Callaghan and Mark, 1984; Tarboton *et al*., 1992)과 경사-면적한계기준(Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Ijjasz-Vasquez and Bras, 1995)으로 구분될 수 있다. 여기서 면적한계기준이란 유역 내에서 하천을 형성하기 위한 최소한의 배수면적, 즉 전술한 한계지지면적을 의미하는 것으로서 DEM 상에서 적용되는 한계지지면적의 크기는 실제 지표면 위에서는 내부에 하천 구간을 포함하지 않는 수원 유역(source basin)의 면적에 해당하게 됨을 알 수 있다. 이와 관련하여 Kim and Kim (2007)은 하천망의 동정에 사용되는 방법에 따라 단일 유역에 대해서도 다수의 하천망들이 추출될 수 있음을 제시한 바 있다. 이들은 추출된 하천망들은 서로 완전히 일치하지는 않지만 시각적으로 유사한 형상을 공유하고 있으며 각 하천망들 사이의 가장 큰 차이점은 수원 유역의 면적에서 찾을 수 있음을 지적하였다. 이는 수원 유역의 면적에 따라 동일한 유역에 대하여 촘촘한 형태의 하천망이나 성긴 하천망을 추출할 수 있음을 의미하는 것으로 신뢰할 수 있는 하천망의 범위를 결정하기 위해서는 수원 유역의 규모에 대한 정보가 필수적임을 암시한다. 하지만 아직까지 수원 유역의 규모에 대한 이론적 혹은 정량적 정의는 제시되지 않고 있다(Montgomery and Dietrich, 1989). 이에 따라 최근 Kim and Jung (2021)은 수원 유역의 규모에 대한 특별한 고려 없이 유역 내부에서 발생할 수 있는 모든 배수 경로들을 DEM으로부터 추출하여 하천 유동과 지표면 유동을 포괄할 수 있는 완전한 배수망을 구성하고 해당 망상 구조의 위상(topology) 분석을 통하여 유역의 지형학적 특성에 접근하고자 시도하였다. 이들의 방법론은 단일 유역의 내부에 존재하는 서로 다른 위상을 갖는 유동 권역을 Strahler의 차수 분류법을 이용하여 구분하고 이를 기반으로 해당 하천망의 fractal 차원을 추정할 수 있는 체계적인 수단을 제공한다. 하지만 이들의 연구는 주로 하천망이 가지는 위상 구조에만 집중되었기 때문에, 하천의 개시(channel initiation)와 관련된 유량의 규모에 대한 고려가 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 선행 연구가 가지는 단점을 보완하기 위해 하천 개시에 필요한 유량의 대리 변수(surrogate variable)로서 수원 유역의 면적을 선정하여(Moussa and Bocquillon, 1996; Moussa, 2008) DEM을 기반으로 다양한 형상의 하천망을 추출하고 해당 형상의 변동에 영향을 주는 주요한 요인을 파악하여 유역의 배수 구조를 보다 신뢰성 있게 계량할 수 있는 수단을 제시해 보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 수원 유역과 한계지지면적

배수 면적이 A인 단일 유역에 대하여 DEM을 기반으로 다양한 한계지지면적 S를 적용할 경우, 각 S에 대응하는 다수의 하천망을 추출할 수 있다. 여기서, 추출된 하천망들의 형상이 갖는 변동성은 다음과 같이 수원의 개수 μ와 총 하천 길이 Z를 S와 A에 대한 무차원 함수의 형태로 구성하여 정량화할 수 있다(Moussa and Bocquillon, 1996).

$$\mu(S,A)=\Psi\left(\frac{S}{A}\right) \tag{1}$$

$$Z(S,A)A^{-\frac{1}{2}}=\Phi\left(\frac{S}{A}\right) \tag{2}$$

Eqs. (1) and (2) 좌변의 $\mu(S,A)$와 $Z(S,A)$는 각각 배수 면적이 A인 단일 유역이 평균 배수 면적이 S인 수원 유역을 가질 경우, 해당 유역의 μ와 Z로 해석할 수 있다. 또한 Eqs. (1) and (2) 우변의 $\Psi(\cdot)$와 $\Phi(\cdot)$는 Moussa and Bocquillon (1996)이 고안한 S/A를 독립변수로 하는 무차원 함수이다. 여기서 만약 최초의 분기 현상이 나타나는 $S(=S_0-\epsilon)$를 고려할 경우, 해당 분기 현상에 따른 하천망의 형상 특성을 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$S_0-\epsilon=\max[S \mid \mu(S,A)=2] \tag{3}$$

$$\mu(S_0,A)=1 \tag{4}$$

$$Z(S_0,A)=A^{\frac{1}{2}}\Phi\left(\frac{S_0}{A}\right)=L_0 \tag{5}$$

Eq. (3) 좌변의 S_0는 유역 내부에 하천이 오직 한 개만 존재할 수 있는 S의 최소값(Eq. (4))으로서 이에 따라 ϵ은 유역 내부에서 최초의 분기 현상을 발생시키는 S의 변동량에 해당하고 Eq. (5) 우변의 L_0는 $S=S_0$의 조건을 만족하는 단일 하천 구간의 길이를 나타내게 된다.

2.2 수원 유역의 규모에 따른 수원 개수의 변동성

Moussa (2008)는 S의 감소에 따른 하천망의 분기 과정을 규모 불변성(scale invariance)으로 가정하여 Eq. (1) 우변의 $\Psi(\cdot)$를 다음과 같이 공식화하였다.

$$\mu(S,A)=\lambda\left(\frac{S}{A}\right)^{-\alpha} \tag{6}$$

여기서 λ와 α는 각각 $\Psi(\cdot)$를 멱함수(power function)의 형태로 구성하기 위한 비례상수(proportional constant)와 지수(exponent)로서 S의 규모에 따른 하천망의 분기 과정을 모형화한다. 이에 따라 Z의 변동량 역시 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$Z(S-\Delta S,A)=Z(S,A)+\mu(S-\Delta S,A)Z(S-\Delta S,S) \tag{7}$$

여기서 ΔS는 S의 변동량으로서 Eq. (7) 우변의 두 번째 항은 Z의 증분을 나타냄을 알 수 있다. 주목할 사항은 μ의 변동량으로서 S의 감소에 따른 기존 하천 구간의 신장(伸長) 및 새로운 수원의 생성(生成)을 의미하게 된다.

S에 대한 Z의 변동성을 공식화하기 위하여 Eq. (2)를 기반으로 Z의 도함수 $Z'(\cdot,\cdot)$를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Z'(S,A)=\lim_{\Delta S\to 0}\frac{Z(S-\Delta S,A)-Z(S,A)}{\Delta S}=A^{-\frac{1}{2}}\Phi'\left(\frac{S}{A}\right) \tag{8}$$

$$Z'(S,S)=\lim_{\Delta S\to 0}\frac{Z(S-\Delta S,S)-Z(S,S)}{\Delta S}=S^{-\frac{1}{2}}\Phi'(1) \tag{9}$$

Eq. (8)은 유역 전반에 걸친 S에 대한 Z의 변화율을 의미하고 Eq. (9)는 수원 유역 내부에서 발생하는 S에 대한 Z의 변화율을 나타냄을 알 수 있다. 또한 Eq. (9) 우변의 $\Phi'(1)$는 $S/A=1$인 경우의 미분계수이다. 따라서 Eqs. (7) ~ (9)를 결합하고 $Z(S,S)=0$의 조건을 대입하여 정리하면 Eq. (2) 좌변의 $\Phi(\cdot)$에 대한 도함수를 다음과 같이 유도할 수 있게 된다.

$$\Phi'\left(\frac{S}{A}\right)=\lambda\Phi'(1)\left(\frac{S}{A}\right)^{-\alpha-\frac{1}{2}} \tag{10}$$

2.3 수원 유역의 규모에 따른 총 하천 길이의 변동성

Eq. (2)의 완전한 형태를 유도하기 위하여 Eq. (10)을 적분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi\left(\frac{S}{A}\right)=\frac{\lambda\Phi'(1)}{-\alpha+\frac{1}{2}}\left(\frac{S}{A}\right)^{-\alpha+\frac{1}{2}}+C_Z \tag{11}$$

여기서 C_Z는 적분상수이다. 최초의 분기 현상을 전후하여 $\Phi(\cdot)$가 연속성을 가지기 위하여 Eq. (11)에 Eq. (5)의 조건을 대입하면 다음과 같은 관계를 유도할 수 있게 된다.

$$A^{\frac{1}{2}}\frac{\lambda\Phi'(1)}{-\alpha+\frac{1}{2}}=\left(L_0-A^{\frac{1}{2}}C_Z\right)\left(\frac{A}{S_0}\right)^{-\alpha+\frac{1}{2}} \tag{12}$$

결국 Eq. (12)를 Eq. (11)에 대입하여 정리하면 Z에 대한 일반식과 C_Z에 대한 관계식을 다음과 같이 최종적으로 유도할 수 있게 된다.

$$Z(S,A)=\left(L_0-A^{\frac{1}{2}}C_Z\right)\left(\frac{S}{S_0}\right)^{-\alpha+\frac{1}{2}}+C_Z A^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

$$C_Z=\frac{L_0\left(\frac{S}{S_0}\right)^{-\alpha+\frac{1}{2}}-Z(S,A)}{A^{\frac{1}{2}}\left(\frac{S}{S_0}\right)^{-\alpha+\frac{1}{2}}-A^{\frac{1}{2}}} \tag{14}$$

Moussa (2008)는 Eq. (14)의 C_Z를 하천망의 분기 특성을 정량화하는 일종의 형상 지수(shape index)로서 정의하였다.

3. 방법론

3.1 대상 유역

본 연구에서는 대상 유역으로 임진강 수계의 설마천 시험유역을 선정하였다. 설마천 시험유역은 영국군 전적비교(JJB) 지점을 출구로 하는 유역면적이 약 8.5 km^{2}인 소규모 산악유역으로서 유역 내부에 다수의 수문 관측 시설이 설치되어 운용되고 있다(Kim and Lee, 2011). 이는 유역의 지형학적 특성을 기반으로 한 수문학적 순환과정(hydrologic cycle)에 대한 연구가 용이한 환경을 제공하는 것을 의미하는 것으로서 이에 따라 본 연구의 사례분석에 이용코자 하였다.

Fig. 1은 대상 유역에 대한 배수 유역도를 도시한 것으로 좌측 상단의 기호 ⊙는 JJB 지점의 위치를 나타낸다. Fig. 1에 도시한 하천망(Blue Line)은 국립지리원에서 발행한 1:25,000 축척의 수치 지도에서 추출한 결과이다. DEM의 생성에도 역시 국립지리원에서 발행한 1:25,000 축척의 수치 지도를 적용하였다. 등고선과 표고점 layer가 포함된 수치지도를 기반으로 불규칙 삼각망(triangulated irregular network, TIN)을 형성하여 등고선 사이에 표고를 내삽한 후 그 위에 격자(grid)를 중첩하였다. 여기서 pixel의 해상도는 20 × 20 m로 하였다. 지형분석 도구로는 Arc GIS 상에서 운용되는 TauDEM (Tarboton, 2003)을 적용하였으며 각 pixel별 흐름 방향은 8방향 모형을 이용하여 모의하였다. 또한, Fig. 1에 도시한 하천망과 보다 유사한 형상의 망상구조를 추출하기 위하여 DEM의 전처리에 Stream Burning (Saunders and Maidment, 1996) 방법을 적용하였다.

3.2 분기 구조의 변동성 평가

Eqs. (6) and (13)을 기반으로 S의 변화에 따른 분기 구조의 변동성을 평가하기 위하여 다음과 같이 두 단계의 절차에 따라 지형분석을 수행하였다.

1) DEM 상에서 Eqs. (3) ~ (5)를 만족하는 S_0를 시행 착오법에 따라 추정하고 대상 유역 내에서 발생하는 최초의 분기 현상을 특성화하기 위하여 L_0를 산정한다.
2) $0 < S < S_0$의 범위 내에서 일련의 S를 선정하고 각 사례별로 $\mu(S, A)$와 $Z(S, A)$를 산정하여 분기 구조의 변동성 평가에 적용한다.

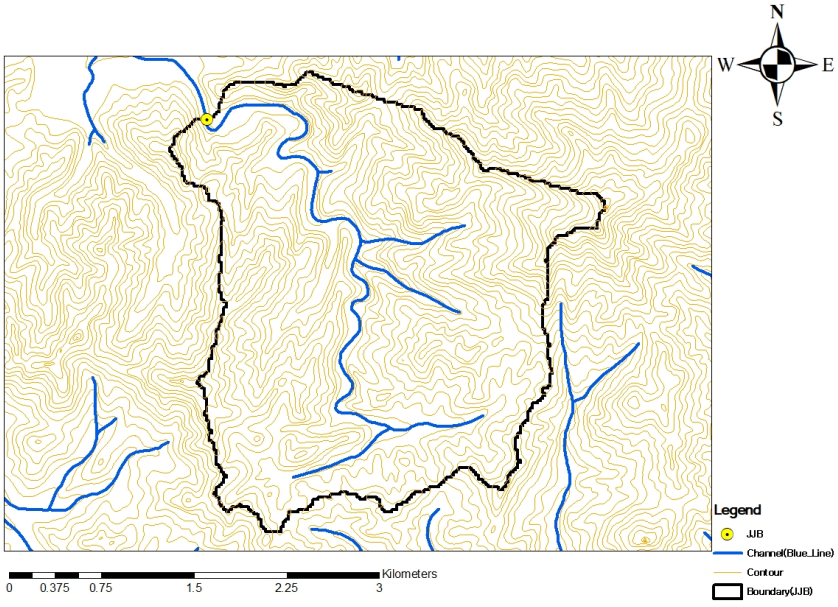


Fig. 1. The Seolmacheon experimental catchment

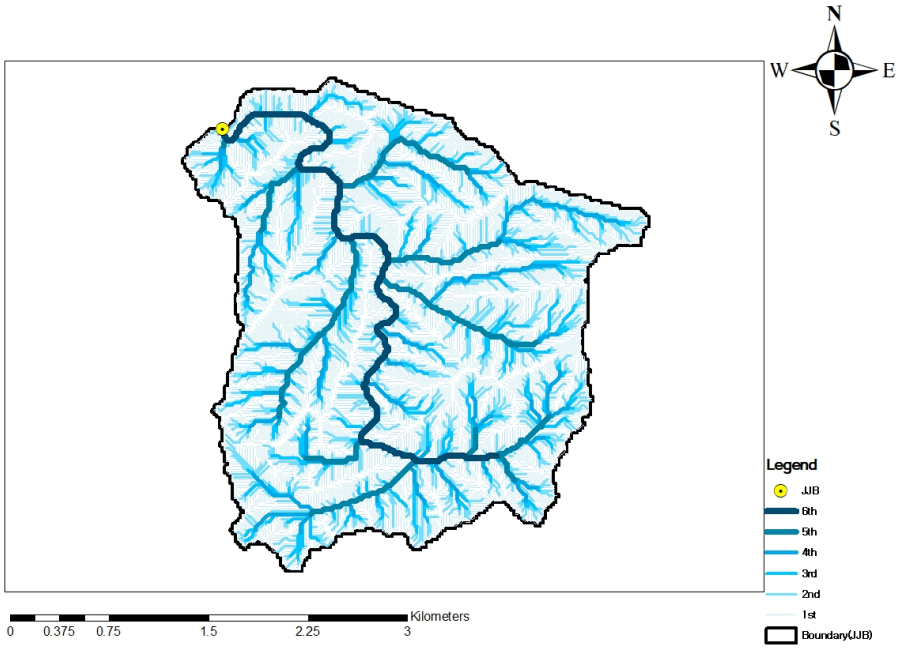


Fig. 2. Classification of the Seolmacheon experimental catchment by strahler's stream order (Kim and Jung, 2021)

여기서 한 가지 고려할 사항은 Eq. (13)이 Eq. (6)과 유사하게 규모 불변성을 가지기 위해서는 Eq. (14)의 C_Z가 반드시 상수여야 하는 점이다. Moussa (2008)는 프랑스 유역을 대상으로 한 연구에서 C_Z가 대부분 일정한 값을 가진다고 보고한 바 있다. 하지만 S가 감소함에 따라 C_Z가 증가할 경우, 이는 하천망의 형상이 신장됨을 의미하고 반대로 S가 감소함에 따라 C_Z 역시 감소할 경우, 이는 하천망의 형상이 압축됨을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 S의 최소값을 단일 pixel의 면적에 해당하는 400 m^2로 하여 최대한 다양한 배수망을 추출하고 이에 따른 C_Z의 변동 특성을 살펴보았다.

또한 Eqs. (6) and (13)에 대한 용이한 해석을 위하여 Kim and Jung (2021)의 접근법에 따라 대상 유역 내부에 하천과 지표면의 구분 없이 배수망을 구성한 후, 이를 Strahler의 차수 분류법에 따라 분류하고, 각 차수별로 도시되는 자료 점들이 양대수지 상에서 비교적 균일한 간격으로 나타날 수 있도록 S를 선정하였다. 본 연구에서 배수망의 위상 구조(topology)를 규정하기 위하여 적용한 Strahler의 차수 분류법은 다음과 같다(Smart, 1972).

1) 수원으로부터 발원한 배수 경로는 1차 하천으로 정의된다.
2) 두 개의 ω차 하천이 만나면 합류점(confluence) 직하류에는 $\omega+1$차 하천이 생성된다.
3) 서로 다른 차수의 두 하천이 만나면 합류점 직하류 구간은 두 개 차수 가운데 큰 차수를 유지한다.

Fig. 2는 Kim and Jung (2021)이 본 연구의 대상 유역인 설마천 시험유역의 분기 특성을 파악하기 위하여 유역 내부에서 발생 가능한 배수 경로를 하천과 지표면의 구분 없이 모두 도시해 본 결과로서 Strahler의 차수 분류법에 따라 배수 경로의 최고 차수는 6임을 Fig. 2의 범례로부터 확인할 수 있다. 이는 설마천 시험유역의 배수 구조는 Strahler의 차수 분류법의 틀 내에서 최대 다섯 단계의 분기 과정을 통하여 형성될 수 있음을 의미하는 것으로서 Kim and Jung (2021)은 이를 Fractal 나무(Newman *et al*., 1997)의 성장 과정을 이용하여 기술한 바 있다.

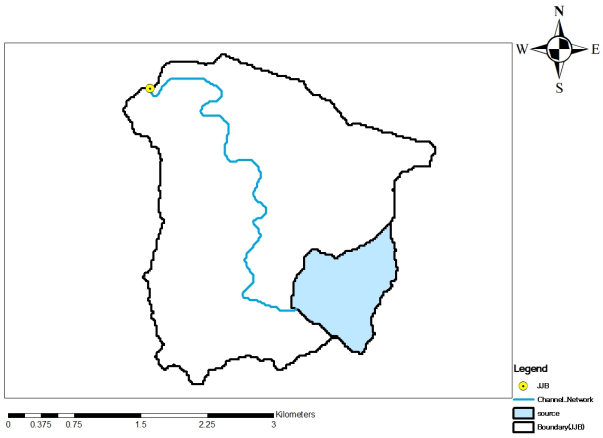
4. 적용사례

4.1 대상 유역의 최초 분기 특성

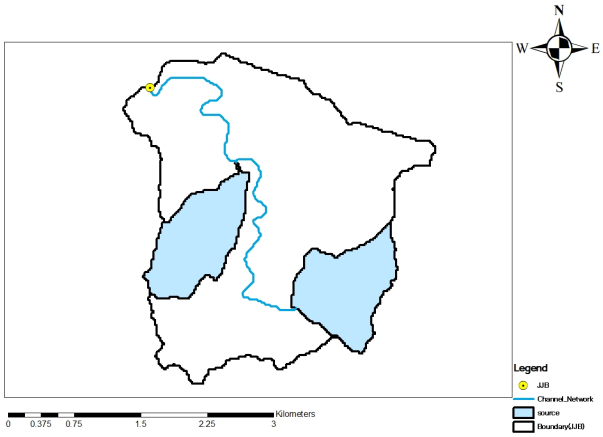
Fig. 3은 Eq. (3)의 조건에 따라 대상 유역 내부에서 발생하는 최초의 분기 현상을 도시한 것으로서 해당 조건을 만족하는 $S_0 = 0.9904$ km^2이고 $\epsilon = 0.0096$ km^2로 산정되었다. 또한 Eq. (5)를 만족하는 $L_0 = 5.166$ km로 산정되었다. 이는 $S \geq 0.9904$ km^2의 조건에서 설마천 시험유역 내부에서는 하천망의 분기 현상이 발생하지 않음을 의미하는 것으로서, 단지 S가 감소함에 따라 유역의 출구로부터 상류 방향으로 단일 하천 구간의 신장 특성만이 나타나게 됨을 확인할 수 있다.

4.2 수원 유역의 규모에 따른 하천망의 형상 변화

Table 1은 Fig. 2에 도시한 설마천 시험유역의 분기 특성을 기반으로 각 차수별 하천망의 S_{max}와 S_{min}을 정리한 것이다. 여기서 $\Omega(=1, \cdots, 6)$는 Strahler의 차수 분류법에 따라 분기 과정을 통하여 출현하는 배수 경로(혹은 하천망)의 최고 차수를 나타내는 것으로서 이에 따라 S_{max}와 S_{min}는 각 Ω차 하천망을 구성하는 수원 유역의 평균 면적이 가지는 범위(최대값과 최소값)를 의미하게 된다. Table 1로부터 Fig. 3(a)의 S_0는 $\Omega=1$의 조건에서 S_{min}에 해당하고 Fig. 3(b)의 $S_0-\epsilon$은 $\Omega=2$의 조건에서 S_{max}에 해당함을 확인할 수 있다.



(a) S = S_0



(b) S = $S_0-\varepsilon$

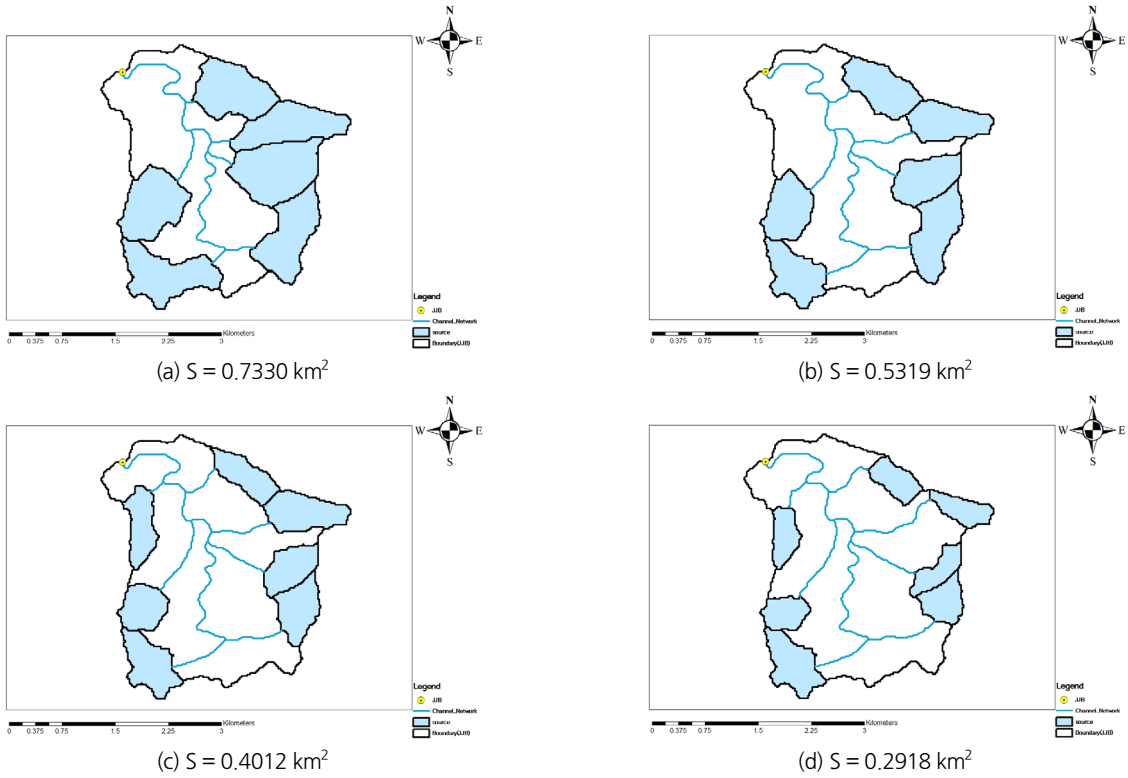
Fig. 3. The first bifurcation process of the Seolmacheon experimental catchment

본 연구에서는 3.2절에서 소개한 바와 같이 Table 1의 각 차수별 경계값 사이의 구간이 양대수지 상에서 비교적 균일한 간격으로 나뉠 수 있도록 일련의 S를 선정하고 각 사례별로 $\mu(S, A)$와 $Z(S, A)$를 산정하였다. Figs. 4 and 5는 각각 $\Omega=2$와 $\Omega=3$의 조건에서 나타날 수 있는 몇 가지 하천망의 형상을 도시해 본 것으로 특히 Figs. 4(d) and 5(d)는 양자 모두 S_{min}의 조건에 해당하는 결과이다. 두 사례 모두에서 S가 감소함에 따라 하천 구간의 길이가 점차 신장되고 새로운 수원 유역이 지속적으로 나타남을 볼 수 있다. 다시 말해서, 수원 유역의 감소는 유역의 내부에서 하천망의 분기 현상을 발생시키며, 그 결과로서 하천망의 신장(elongation of channel network : $Z(S, A)$의 증가)과 함께 하천망의 확장(expansion of channel network : $\mu(S, A)$의 증가)이 동시에 나타남을 확인할 수 있는 것이다. 이것은 또한 단일 유역 내에서 동일한 위상 수준에서도 적용하는 한계지지면적 S(혹은 수원 유역)의 규모에 따라 다양한 형상의 하천망이 출현할 수 있음을 의미하는 것으로서 DEM을 기반으로 신뢰할 수 있는 하천망의 범위를 결정하기 위해서는 적절한 DEM의 해상도에 대한 고려와 함께 수원 유역의 규모에 대한 정확한 정보가 필수적임을 확인할 수 있다.

Figs. 6 and 7은 $\mu(S, A)$와 $Z(S, A)$를 S/A축 상에 Table 1의 각 차수별 S의 범위와 중첩하여 도시한 것으로 그림 내부에 표시된 수치는 Ω를 의미한다. 여기서, 주목할 만한 사항으로 두 곡선 모두 S/A의 규모에 따라 몇 가지 개별적 특성 권역으로 구분될 수 있음을 볼 수 있다. 우선 두 곡선의 중심 부분($\Omega=3$과 $\Omega=4$)은 양자 모두 양대수지 상에서 비교적 선형에 가까운 분포 양상을 보여 Eqs. (6) and (13)에 따른 수원 유역의 규모 불변성 거동이 예상된다. 하지만 두 곡선의 꼬리 부분($\Omega=1$과 $\Omega=2$)에서는 S/A의 감소에 따라 최초의 분기 현상(Fig. 3)과 유사하게 하천망의 신장 특성이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, $\Omega=1$의 조건에서는 Strahler의 차수 분류법에 따라 $\mu(S, A)$는 도시된 모든 자료 점에서 1의 값을 유지하지만 $Z(S, A)$는 양대수지 상에서 비선형적으로 증가하는 특성을 보이고, $\Omega=2$의 조건에서는 $\mu(S, A)$와 $Z(S, A)$ 양자 모두 증가하지만 곡선의 중심 부분과는 상이한 분포 양상, 특히 $\mu(S, A)$의 경우 제한적인 증가 특성이 나타남을 확인할 수 있다. 이에 따라 해당 구간에서는 S/A의 감소에 따라 하천망의 신장이 지배적으로 나타나는 것으로 판단된다. 마지막으로 두 곡선의 원점

Table 1. The range of source basin area by strahler's stream order (Ω)

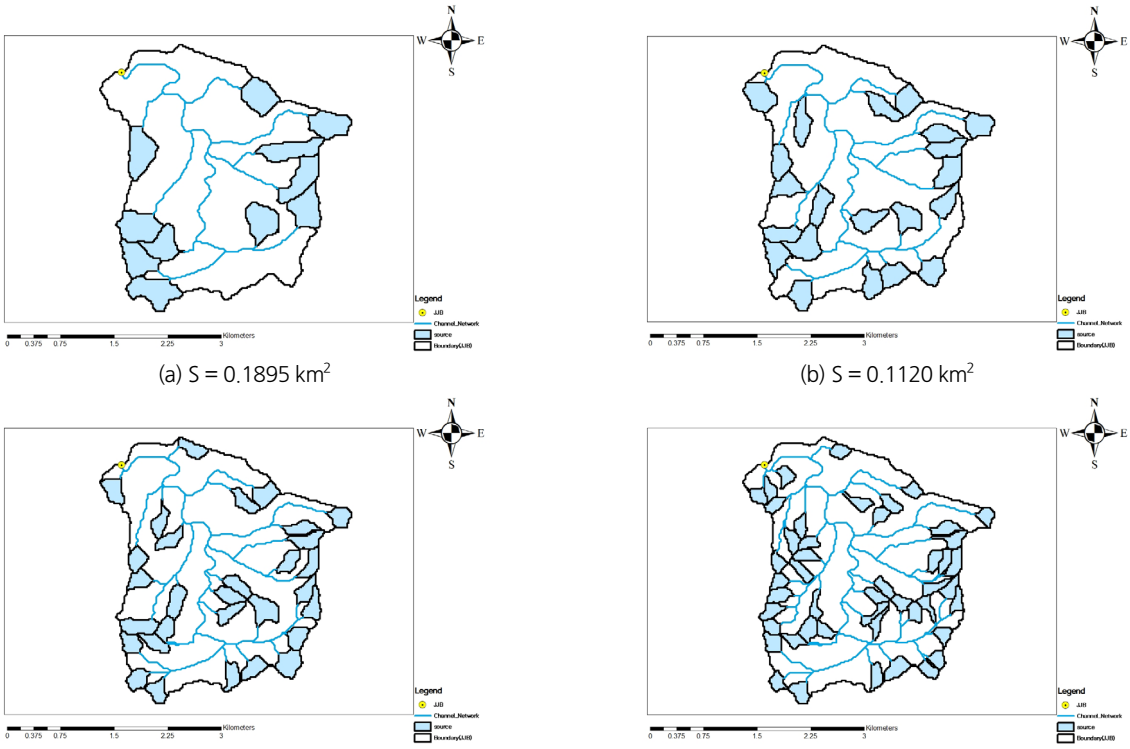
S \ Ω	1	2	3	4	5	6
S_{max} (km^2)	8.4592	0.9808	0.2865	0.0475	0.0085	0.0027
S_{min} (km^2)	0.9904	0.2918	0.0479	0.0089	0.0032	0.0004



(a) S = 0.7330 km^2 (b) S = 0.5319 km^2

(c) S = 0.4012 km^2 (d) S = 0.2918 km^2

Fig. 4. The bifurcation process of the second order channel network in the Seolmacheon experimental catchment



(a) S = 0.1895 km^2 (b) S = 0.1120 km^2

(c) S = 0.0739 km^2 (d) S = 0.0479 km^2

Fig. 5. The bifurcation process of the third order channel network in the Seolmacheon experimental catchment

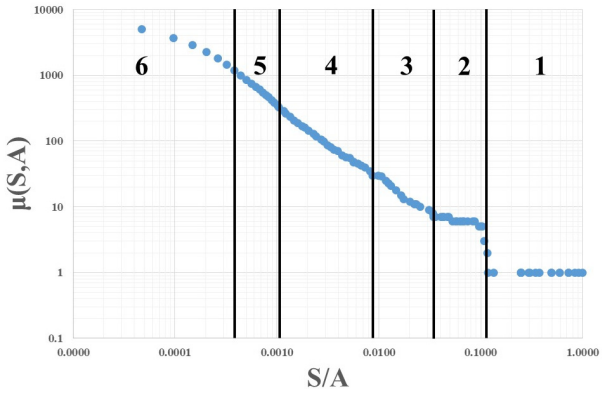


Fig. 6. μ(S,A) of the Seolmacheon experimental catchment

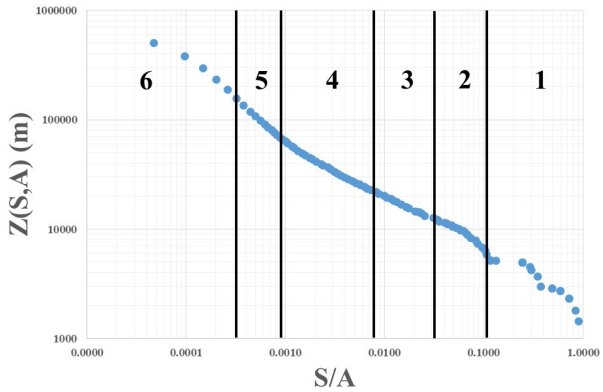


Fig. 7. Z(S,A) of the Seolmacheon experimental catchment

부근($\Omega=5$와 $\Omega=6$)의 형태는 역 S자형의 분포 양상을 보이며 특히 $Z(S,A)$의 경우 곡선의 중심 부분과는 뚜렷이 다른 경사를 나타냄을 볼 수 있다. 이는 하천망과는 별개로 지표면 위에 형성되는 배수망의 형상에 기인하는 결과인 것으로 판단된다 (Kim and Jung, 2021).

4.3 Fractal 차원에 대한 추론

Eq. (6)은 fractal 차원의 도해적 추정에 이용되는 Richardson의 방법이나 box counting 방법과 개념적으로 유사한 형태를 취함을 알 수 있다. 즉, 비록 두 방법처럼 하천망의 총 길이가 갖는 변화를 눈금자의 축척(scale of ruler) r의 변화에 따라 직접 계량할 수는 없지만, 일련의 S에 대응하는 하천망의 변화 양상을 $\mu(S,A)$의 형태로 제공할 수 있는 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 Eq. (6)의 S가 위의 두 방법에서 정방형 box나 원형 디스크(disc)의 면적과 유사한 역할을 하는 것($S \propto r^2$)으로 가정하여 다음과 같은 관계를 수립하였다.

$$\mu(S,A) \propto r^{-2\alpha} \tag{15}$$

Table 2. The relation of $\mu(S,A)$ and S/A by strahler's stream order(Ω)

$\Omega \leq$	Regression	R^2	d_N^α	d_N
2	$\mu(S,A)=1.0796\left(\frac{S}{A}\right)^{-0.600}$	0.5546	1.200	
3	$\mu(S,A)=0.5445\left(\frac{S}{A}\right)^{-0.841}$	0.9434	1.682	
4	$\mu(S,A)=0.3857\left(\frac{S}{A}\right)^{-0.946}$	0.9820	1.892	1.440
5	$\mu(S,A)=0.3068\left(\frac{S}{A}\right)^{-1.008}$	0.9853	2.016	1.609
6	$\mu(S,A)=0.2957\left(\frac{S}{A}\right)^{-1.017}$	0.9882	2.034	

d_N : Kim and Jung (2021)

Eq. (15)를 하천망에 대한 fractal 차원의 관계식(Tarboton *et al*., 1988; Tarboton, 1996; Kim and Jung, 2021)과 비교해 보면 우변의 지수 2α가 분기 과정에 의한 망상구조의 fractal 차원 d_N과 유사한 형태로 나타남을 확인할 수 있다.

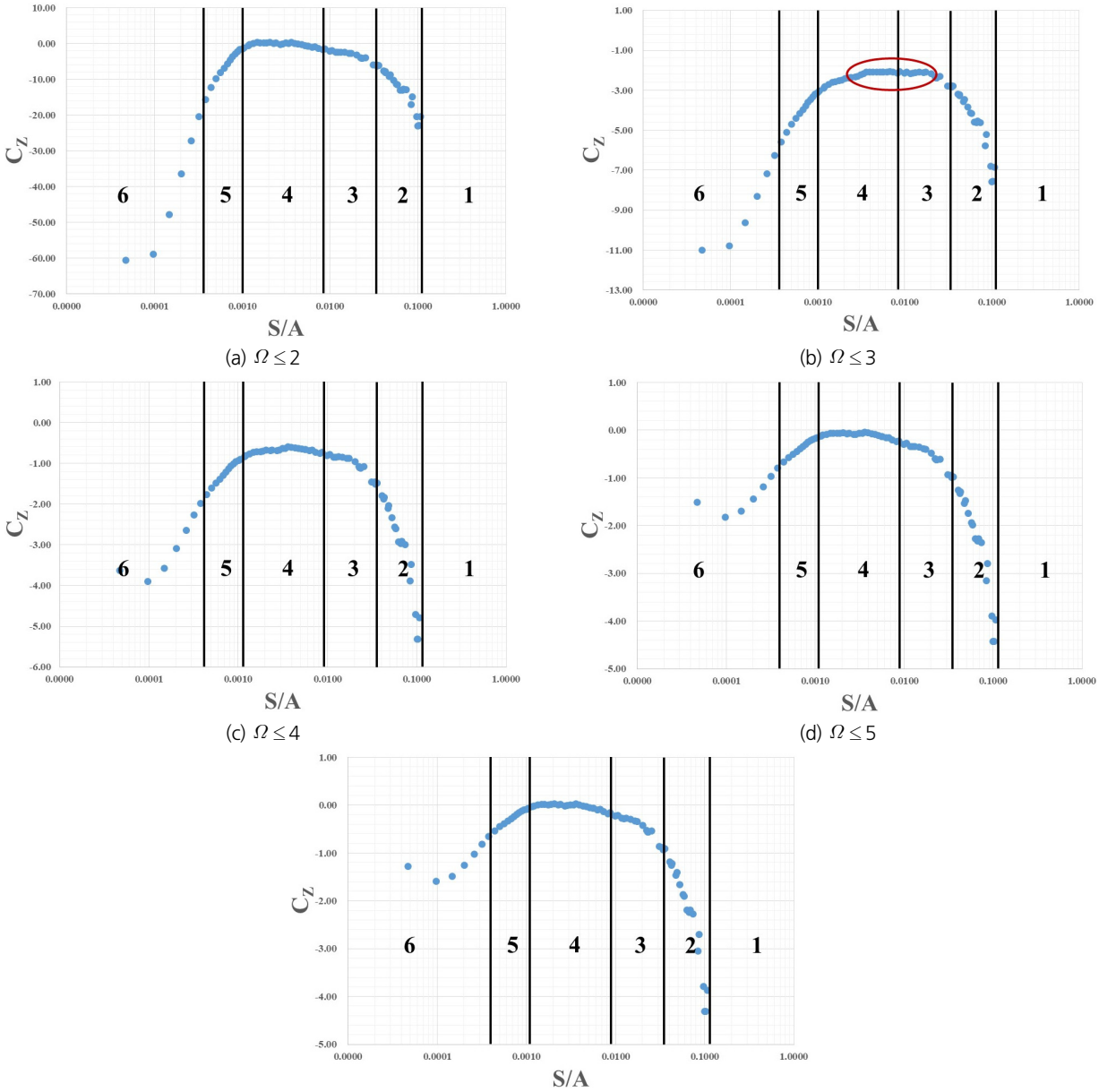
Table 2는 Fig. 6을 기반으로 본 연구의 대상 유역에 대하여 Eq. (6)의 관계를 추정해 본 결과이다. 여기서 제1열의 기호 $\Omega \leq$는 Fig. 6에 표시된 Ω보다 작거나 같은 구간에 포함되는 자료 점들을 의미하는 것으로서(단, $\Omega=1$의 조건에서는 분기 현상이 발생하지 않기 때문에 해당 자료 점들은 제외) 이에 따라 각 차수별 회귀식은 해당 구간($\Omega \leq$)에 포함되는 자료들을 대상으로 산정한 결과이다. 제4열의 d_N^α는 Eq. (15)를 기반으로 본 연구에서 추론해 본 각 차수별 fractal 차원에 대한 추정치로서 Kim and Jung (2021)이 fractal 나무의 개념을 이용하여 본 연구의 대상 유역에 대하여 제시한 제5열의 d_N보다 큰 수치로 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 수원 유역의 형상에 대한 Eq. (15)의 가정에 기인하는 것으로 판단되는바, 해당 수원 유역들의 형상에 대한 체계적인 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

주목할 만한 사항은 d_N^α을 기반으로 추론되는 차수별 하천망의 변동 특성으로서, 선(線)에 가까운 형상에서 출발하여 차수가 증가함에 따라 면(面)을 채워가는 과정을 볼 수 있다. 이는 Figs. 6 and 7에서도 역시 확인할 수 있는 경향으로서, 우선 $\Omega=1$과 $\Omega=2$의 조건에서는 전술한 바와 같이 하천망의 신장과정이 지배적으로 나타나기 때문에 해당 형상이 선에 가깝게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 하지만 $\Omega=5$와 $\Omega=6$의 조건에서는 하천망의 확장과정이 하천망의 신장과정을 압도하여 fractal 차원에 대한 추정치가 면을 초과하는 결과($d_N^\alpha>2$)를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 전술한 바와 같이 수원 유역의 감소에 따른 하천망의 분기 특성은 하천망의 신장(또는

$Z(S, A)$의 증가) 및 하천망의 확장(또는 $\mu(S, A)$의 증가)으로 구분할 수 있으며 본 연구의 대상 유역인 설마천 시험유역의 경우 $\Omega = 3$과 $\Omega = 4$의 조건에서 Eq. (6)에 따른 규모 불변성을 만족하는 배수 구조를 가지는 것으로 예상된다. 또한, 전술한 차수별 하천망의 변동 특성은 유역의 상류에 위치한 하천(혹은 저차수 하천)과 중류 및 하류에 위치한 하천(혹은 고차수 하천) 사이의 고도 및 경사와 같은 지리학적 특성들의 차이와 밀접한 관련이 있을 것이 예상됨으로 해당 인자들이 미치는 영향에 대한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.4 하천망의 형상 지수

2.2절 및 2.3절에서 소개한 논거에 따라 Eq. (13)은 Eq. (6)에 종속적인 수리구조(數理構造)를 가짐을 확인할 수 있다. 특히 Eq. (13)이 규모 불변성을 가지기 위해서는 3.2절에서 언급한 바와 같이 Eq. (14)의 C_Z가 상수여야 하는 조건을 만족해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Table 2의 각 사례별($\Omega \leq$) 회귀 분석 결과를 이용하여 S의 감소에 따른 C_Z의 변화를 Fig. 8과 같이 산정하였다. 모든 그림에서 $\Omega = 2$의 조건에서는 S/A가 감소함에 따라 C_Z가 증가하지만, $\Omega = 5$와 $\Omega = 6$의 조건에서는 S/A가



(a) $\Omega \leq 2$ (b) $\Omega \leq 3$ (c) $\Omega \leq 4$ (d) $\Omega \leq 5$ (e) $\Omega \leq 6$

Fig. 8. The relation of C_Z and S/A for the Seolmacheon experimental catchment

감소함에 따라 C_Z 역시 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Moussa (2008)가 제시한 C_Z의 거동 특성에 따라 $\Omega = 2$의 조건에서는 하천망의 형상이 신장되고 $\Omega = 5$와 $\Omega = 6$의 조건에서는 하천망의 형상이 압축되고 있음으로 해석할 수 있다. 다시 말해서, 전자의 경우 S의 감소에 따라 하천 구간이 신장되는 현상이 새로운 수원이 생성되는 현상보다 우세하게 나타나 하천망의 총 길이가 증가하는 과정(하천망의 신장)을 발생시키고, 후자의 경우 반대의 양상이 지배적으로 나타나면서 배수망이 지표면 위의 공간을 채워가는 과정(하천망의 확장)을 발생시키는 것으로 판단된다.

주목할 만한 사항으로, Figs. 8(a), 8(c) ~ 8(e)에서 비록 $\Omega = 2$의 조건보다 양대수지 상에서의 기울기는 작지만 S/A의 감소에 따른 C_Z의 증가 특성이 $\Omega = 3$과 $\Omega = 4$의 조건에서도 지속적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 해당 구간 내에서 C_Z가 S/A의 규모에 종속성을 가짐을 의미하는 것으로서 결국 Table 2의 $\Omega \leq = 2, 4, 5, 6$에 해당하는 회귀 분석 결과는 Eq. (13)의 관계에 규모 불변성을 적절하게 부여하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 Fig. 3(b)의 경우 빨간색 box로 표시된 $\Omega = 3$과 $\Omega = 4$의 조건 내에서 $C_Z(\simeq -2.10)$가 비교적 일정하게 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 Eq. (6)과 Eq. (13)이 동시에 성립하는 범위($S = 0.0272 \sim 0.1332\ \mathrm{km}^2$)를 명시적으로 나타내는 것으로서, S의 변동성에 대한 규모 불변성을 의미하는 것으로 볼 수 있을 것이다. 이에 따라 자연 유역의 하천망들이 가지는 규모 불변성(혹은 자기 상사성)은 수원 유역의 감소에 따라 동시에 나타나는 하천망의 신장 특성과 하천망의 확장 특성이 상호 균형을 이루면서 발현되는 지형학적 특성으로 판단된다.

여기서 한 가지 고려해 볼 사항은 Fig. 1에 도시한 설마천 시험유역에 대한 하천망(Blue Line)의 범위로서 Figs. 6 ~ 8로부터 $\Omega = 2$의 조건, 즉 하천망의 신장 특성이 지배적인 구간에 해당하는 점이다. 이는, 만약 해당 하천망의 범위를 상시(常時) 하천망(perennial channel network)으로 간주할 경우, 본 연구의 대상 유역 내에서 규모 불변성의 배수 구조는 상시 하천망의 범위를 넘어 임시(臨時) 하천(ephemeral channel)의 형태로 나타날 수 있음을 의미한다(Kim and Jung, 2021). 이에 따라 Fig. 1에 도시한 상시 하천망은 random walk을 기반으로 한 유출응집구조(runoff aggregation structure) (Rodriguez-Iturbe *et al*., 1992)보다는 해당 지역의 지질 특성이나 지각운동의 이력을 반영한 결과일 것으로 추론된다. 결국 설마천 시험유역의 분기 구조는 하천망의 신장 특성과 규모 불변성이 공존하는 형태로 판단되며 강우로 인한 유출 현상에 어느 요인이 보다 결정적인 역할을 할 수 있을지에 대해서는 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구 과정을 통해 얻어진 주요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) DEM을 기반으로 다수의 한계지지면적을 적용할 경우 다양한 형상의 하천망을 추출할 수 있으며 이에 따른 수원 유역(혹은 한계지지면적)의 감소는 유역의 내부에서 하천망의 분기 현상을 발생시켜, 그 결과로서 하천망의 신장(총 하천 길이의 증가)과 함께 하천망의 확장(수원의 개수 증가)이 동시에 나타남을 확인할 수 있었다.
2) 수원 유역의 규모와 수원의 개수 사이의 상관성은 배수 구조의 계량에 적용할 수 있는 분기 현상을 기반으로 한 망상 구조의 fractal 차원과 유사한 관계를 제공한다. 해당 관계에 따라 설마천 시험유역의 하천망은 선에 가까운 형상에서 출발하여 면을 채워가는 과정을 나타냄을 확인할 수 있었다. $\Omega = 1$과 $\Omega = 2$의 조건에서는 하천망의 신장 과정이 지배적으로 나타나기 때문에 해당 형상이 선에 가깝게 나타나는 것으로 볼 수 있으며 $\Omega = 5$와 $\Omega = 6$의 조건에서는 하천망의 확장과정이 하천망의 신장 과정을 압도하여 면에 가까운 형상이 나타나는 것으로 판단된다.
3) 수원 유역의 감소에 따라 하천 구간이 신장되는 현상이 새로운 수원이 생성되는 현상보다 우세하게 나타나는 경우 하천망의 신장을 유발하고, 반대의 양상이 지배적으로 나타나는 경우 배수망이 지표면 위의 공간을 채워가는 형태의 하천망의 확장을 발생시키는 것으로 판단된다.
4) 자연 유역의 하천망들이 가지는 규모 불변성(혹은 자기 상사성)은 수원 유역의 감소에 따라 나타나는 하천망의 신장 특성과 하천망의 확장 특성이 상호 균형을 이루면서 발현되는 지형학적 특성으로 기술될 수 있다.
5) 설마천 시험유역의 분기 구조는 하천망의 신장 특성과 규모 불변성이 공존하는 형태로 판단되며 강우로 인한 유출 현상에 어느 요인이 결정적인 역할을 하는가에 대한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교의 학술연구비 지원 및 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2019R1I1A1A01063063)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Brutsaert, W., and Nieber, J.L. (1977). "Regionalized drought flow hydrogaphs from a matured glaciated plateau." *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 637-643.

Horton, R.E. (1945). "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 56, No. 3, pp. 275-370.

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.

Kim, D., and Lee, N. (2011). "The operation of the Seolmacheon experimental catchment of the 2010." *2011 Conference of Korea Water Resources Association,* Daegu.

Kim, J.C., and Jung, K. (2021). "Estimation of fractal dimension for Seolma creek experimental basin on the basis of fractal tree concept." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 1, pp. 49-60.

Kim, J.C., and Kim, J.H. (2007). "Morphological representation of channel network by dint of DEM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 287-297.

Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1989). "Source areas, drainage density, and channel initiation." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 8, pp. 1907-1918.

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.

Moussa, R. (2003). "On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response." *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 33-58.

Moussa, R. (2008). "Effect of channel network topology, basins segmentation and rainfall spatial distribution on the geomorphologic instantaneous unit hydrograph transfer function." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 395-419.

Moussa, R., and Bocquillon, C. (1996). "Fractal analyses of tree-like networks from digital elevation model data." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 157-172.

Newman, W.I., Turcotte, D.L., and Gabrielov, A.M. (1997). "Fractal trees with side branching." *Fractals*, Vol. 5, No. 4, pp. 603-614.

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.

Paik, K., and Kumar, P. (2004), "Hydraulic geometry and the nonlinearity of the network instantaneous response." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 3, W03602. doi: 10.1029/2003WR002821

Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.

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

Saunders, W.K., and Maidment, D.R. (1996). *A GIS assessment of nonpoint source pollution in the San Antonio-Nueces Coastal basin*. Center for Research in Water Resources, University of Texas, Austin, TX, U.S.

Shreve, R.L. (1966). "Statistical law of stream numbers." *Journal of Geology*, Vol. 74, pp. 17-37.

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

Strahler, A.N. (1952). "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 63, No. 11, pp. 1117-1142.

Tarboton, D.G. (1996). "Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 105-117.

Tarboton, D.G. (2003). "Terrain analysis using digital elevation models in hydrology." *23rd ESRI International Users Conference,* San Diego, CA, U.S.

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

Tarboton, D.G., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1992). "A physical basis for drainage density." *Geomophology*, Vol. 5, pp. 59-75.

Yang, S., and Paik, K. (2017). "New findings on river network organization: Law of eigenarea and relationships among Hortonian scaling ratios." *Fractals*, Vol. 25, No. 3, 1750029.