

DEM을 기반으로 한 흐름방향 모의기법에 따른 배수구조의 변동성 해석

박혜숙* · 김주철**

*대전보건대학교 환경보건과 교수

**충남대학교 국제수자원연구소 전임연구원

Analysis of Variation for Drainage Structure with Flow Direction Methods on the Basis of DEM

Hye-Sook Park* · Joo-Cheol Kim**

*Department of Health Environmental, Daejeon Health Science College

**International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

(Received 30 April 2018, Revised 10 July 2018, Accepted 17 July 2018)

Abstract

The main purpose of this study is to suggest and recommend the more reliable flow direction methods within the framework of DEM and power law distribution, by investigating the existing methodologies. To this end SFD (single flow direction method), MFD (multiple flow direction method) and IFD (Infinite flow direction method) are applied to analyze the determination of a flow direction for the water particles as seen in the Jeonjeokbigyo basin, and then assessed with respect to the variation of flow accumulation in that region. As the main results revealed, the study showed the different patterns of flow accumulation are found out from each applications of flow direction methods utilized in this study. This brings us to understand that as the flow dispersion on DEM increases, in this case the contributing areas to the outlet grow in sequence of SFD, IFD, MFD, but it is noted that the contribution of individual pixels into outlet decreases at that time. In what follows, especially with the MFD and IFD, the result tends to make additional hydrologic abstraction from rainfall excess, as noted due to the flow dispersion within flow paths on DEM. Based on the parameter estimation for a power law distribution, which is frequently used for identify the aggregation structure of complex system, by maximum likelihood flow accumulation can be thought of as a scale invariance factor. In this regard, the combination of flow direction methods could give rise to the more realistic water flow on DEM, as revealed through the separate flow direction methods as utilized for dispersion and aggregation effects of water flow within the available different topographies.

Key words : DEM, Flow Accumulation, IFD, MFD, Power Law Distribution, SFD

1. Introduction

DEM을 기반으로 한 지리정보처리 기술의 발전은 유역의 각종 지형학적 인자들에 대한 자동추출을 가능하게 하였다. 특히 O'Callaghan and Mark (1984)가 수로를 형성하기 위한 한계지지면적(critical threshold area)의 개념을 제시한 이래 DEM 상에서 물 입자의 유동을 모의하기 위한 다양한 기법들이 지속적으로 제시되어 오고 있다.

현재 대부분의 수문학적 실무에서 DEM을 이용한 물 입자의 유동 모의에는 주로 8-흐름방향방법(8-flow direction method)이 적용되고 있다. 이 방법은 흐름의 분할방식에 따라 단일흐름방향방법(single flow direction method, SFD)

(O'Callaghan and Mark, 1984)과 다중흐름방향방법(multiple flow direction method, MFD)(Quinn et al, 1991)의 범주로 분류되는데 전자의 경우 완만한 경사 지역에서는 흐름의 분산(dispersion)을 모의하는데 한계가 있으며 후자는 급경사 지역에서 흐름의 분산이 과도하게 계산되는 문제점을 가지고 있는 것으로 알려져 왔다. Tarboton (1997)은 이러한 문제점들에 대한 주요한 원인으로 8-흐름방향방법이 갖는 구조적인 단점을 언급한 바 있는데 특히 물 입자의 흐름방향을 각기 45°씩 떨어진 8개의 고정된 방향으로 이산화(discretization)함으로써 계곡(valley)과 같이 오목한 형태의 수렴지형(convergent topography)의 모의에는 비교적 적합하지만 구릉지사면(hillslope)과 같이 볼록한 형태의 발산지형(divergent topography)의 모의에는 한계를 가짐을 보고한 바 있다.

8-흐름방향방법의 단점을 보완하기 위하여 Tarboton (1997)이 개발한 ∞-흐름방향방법(infinite flow direction method, IFD)은 각도(angle)의 형태로 흐름방향을 산정하여 고정된

* To whom correspondence should be addressed.

kjoocheol@hanmail.net

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

흐름방향에 대한 구속에서 벗어남과 동시에 최소 흐름의 분산을 허용하여 유역규모의 포화과정을 효율적으로 모의할 수 있는 수단으로 간주되어 왔다. 이와 관련하여 Gregory et al. (2001)은 DEM으로부터 추출한 하천망을 이용하여 배수밀도의 통계학적 특성에 대하여 해석한 바 있는데 여기서 지형분석 도구로서 IFD의 효율성을 입증한 바 있다. 또한 사면안전해석을 위하여 개발된 software인 SINMAP에서도 IFD의 적용을 찾아볼 수 있다.

본 연구의 주목적은 전술한 SFD, MFD 및 IFD를 실제 유역의 배수 구조 추출과정에 적용하고 각 방법별 차이점을 정량적으로 검토하여 보다 신뢰성 있는 흐름방향 모의 기법을 찾아보고자 하는 것이다. 이를 위하여 각 흐름방향 방법에 대한 이론적 검토와 함께 이를 기반으로 산정되는 흐름누적(flow accumulation)의 변동성에 주목하여 보았다. 특히 본 연구에서는 각 흐름방향방법별 흐름누적산정 결과를 멱함수 법칙분포(power law distribution)에 적합하여 해당 흐름방향 모의기법들이 가지고 있는 유출응집구조의 특성을 검토해 보고자 하였다. 또한 세 가지 흐름방향방법의 조합을 통하여 흐름의 분산효과와 응집효과를 지표면의 형상에 따라 구분하여 모의함으로써 보다 실제 물 입자의 유동에 가까운 흐름 모의를 시도해 보고자 하였다. 지금까지 흐름방향방법별 차이점에 대한 검토가 선행 연구과정(Rampi et al., 2014; Vicente et al., 2014; Wolock and McCabe, 1995)을 통하여 꾸준히 제시되어 왔으나 복잡계의 기본 원리인 멱함수 법칙분포를 기반으로 한 평가는 본 연구에서 처음 제안되어지는 것으로서 유역특성을 해석하기 위한 새로운 도구를 제시할 수 있을 것으로 판단한다. 대상 유역으로는 설마천 시험유역 내 전적비교 유역을 선정하였으며 DEM의 처리과정에는 Hamburg 대학을 중심으로 독일에서 개발된 open source 형태의 free software인 System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)를 적용하였다.

2. Materials and Methods

2.1 흐름방향 모의기법

2.1.1 8-흐름방향방법

8-흐름방향방법은 Fig. 1과 같이 3×3 pixel window를 기반으로 하여 운용된다. 여기서 $Z_i(i=0,1,2,\dots,8)$ 는 각 pixel의 표고를 나타내는 것으로 중앙에 위치한 pixel의 표고 Z_0 을

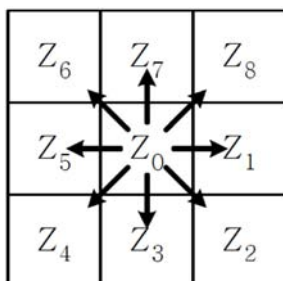


Fig. 1. 8-Flow Direction.

중심으로 다음과 같이 이웃한 8개 pixel들과의 경사 S_j 을 산정하여 흐름방향을 결정하게 된다.

$$S_j = \frac{Z_0 - Z_j}{L}; j = 1, 2, \dots, 8 \quad (1)$$

여기서 L 은 중앙 pixel과 이웃한 pixel들의 중심 간 거리이다.

이 방법은 흐름의 분할방식에 따라 SFD와 MFD의 두 가지 개별적인 범주로 분류될 수 있는데 그 개요는 다음과 같다. 우선 상대적으로 단순한 방법인 SFD는 대상 pixel과 이웃한 8개 pixel들 사이의 S_j 을 Eq. (1)에 따라 산정하고 최급하향경사(steepest descent slope)를 갖는 한 개의 pixel을 선정하여 전체 흐름을 할당하게 된다(O'Callaghan and Mark, 1984). Quinn et al. (1991)이 제안한 MFD는 전술한 SFD와 달리 대상 pixel 주위의 8개 방향에 대하여 Eq. (1)에 따라 S_j 을 산정하고 이중 해당 pixel보다 표고가 낮은 모든 방향에 대하여 일정한 비율을 가지고 흐름을 분할한다. 전술한 두 범주의 방법은 양자 모두 흐름방향이 축 방향과 대각선 방향으로 고정되어 있어 실제 물 입자의 유동을 구속할 수 있으며 특히 SFD의 경우 수렴지형(convergent topography)에서의 유동은 비교적 잘 모의하지만 발산지형(divergent topography)의 유동 모의에는 한계를 가지는 것으로 알려져 왔다. 또한 MFD의 경우 이와는 반대로 발산지형에서 나타나는 흐름의 분산효과를 고려할 수 있지만 수렴지형의 경우 흐름이 과도하게 분산되는 한계점이 보고되어 왔다.

2.1.2 ∞-흐름방향방법

8-흐름방향방법의 대안으로 제시된 바 있는 IFD의 개요는 다음과 같다(Tarboton, 1997). DEM을 기반으로 흐름방향을 산정하기 위하여 Fig. 1과 유사하게 3×3 pixel window를 Fig. 2(a)와 같이 고려하여 본다. 여기서 각 pixel 중앙의 점은 해당 pixel의 표고를 의미하는 것으로 이들을 Fig. 2(a)와 같이 서로 연결할 경우 개별 측면(facet)의 형상이 삼각형으로 이루어진 8면체를 구성할 수 있다. 또한 각 측면의 경사는 Eq. (2)와 같이 정의되는 경사벡터로서 특성화할 수 있게 된다(Fig. 2(b)).

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1; s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (2)$$

여기서 s_1, s_2 는 각각 경사벡터의 x, y성분이고 e_0, e_1, e_2 는 Fig. 2(b)와 같이 삼각형 측면의 꼭지점에 해당하는 표고이며 d_1, d_2 는 이들 사이의 거리이다. 이 경사벡터의 방향 r 과

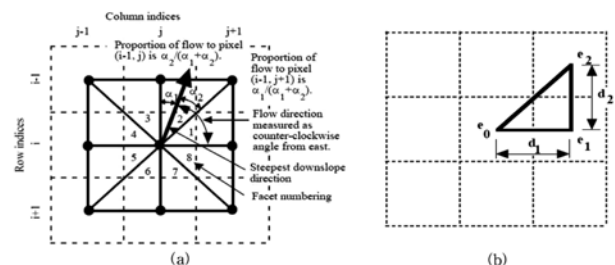


Fig. 2. ∞-Flow direction Method.

크기 s 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1); s = (s_1^2 + s_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

만약 Eq. (3)에 따라 산정된 r 이 $0 \sim \tan^{-1}(d_2/d_1)$ 의 범위 내에 있지 않을 경우 흐름의 과도한 분산을 방지하기 위하여 해당 단면의 경사는 다음과 같이 평가되어 진다(Tarboton, 1997).

$$\begin{cases} r < 0: & r = 0; s = s_1 \\ r > \tan^{-1}(d_2/d_1): & r = \tan^{-1}(d_2/d_1); s = (e_0 - e_2)/(d_1^2 + d_2^2)^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

이상의 과정에 따라 산정되는 8면의 경사 중 최급하경사를 선택하여 그에 해당하는 r 과 s 를 중앙 pixel 지점의 흐름방향 및 경사로 하는 것이 IFD의 핵심을 이룬다. IFD에 따른 흐름누적의 모의는 흐름방향 r 에 따라 1) 한 개의 하류방향 pixel로 배수하는 경우와 2) 두 개의 하류방향 pixel로 분산하여 배수하는 경우의 두 가지 형태로 나타나게 된다. 전자의 경우 흐름누적의 산정은 SFD와 일치하게 된다. 하지만 후자의 경우 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 경사벡터가 두 pixel과 이루는 교각 α_1, α_2 의 상대적인 크기를 가중치로 하여 흐름을 분할하게 된다.

2.2 멱함수 법칙분포

Kim et al. (2016)은 배수면적(drainage area) A 에 대한 멱함수 법칙분포의 기본 관계를 Clauset et al. (2009)의 방법론에 따라 다음과 같이 2매개변수 확률밀도함수(probability density function)의 형태로 제시한 바 있다.

$$f(A) = \frac{\alpha - 1}{A_{\min}} \left(\frac{A}{A_{\min}} \right)^{-\alpha} \quad (5)$$

여기서 α 는 지수(exponent)이고 A_{\min} 은 멱함수 법칙분포가 성립하는 정의역의 하한계이다. Eq. (5)는 유역의 유출(혹은 질량) 응집구조를 특성화하는 관계식으로서 이를 기반으로 A 의 통계모멘트에 대한 관계식을 다음과 같이 해석적으로 표현할 수 있게 된다.

$$E[A^Z] = \int_{A_{\min}}^{\infty} A^Z f(A) dA = \begin{cases} \infty & ; \alpha < Z + 1 \\ \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha - 1 - Z} \right) A_{\min}^Z & ; \alpha > Z + 1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자이고 Z 는 통계모멘트의 차수(order)로서 멱함수 법칙분포의 경우 차수별 통계모멘트의 정의가 α 에 종속적임을 Eq. (6)의 우변으로부터 확인할 수 있다. 특히 만약 α 의 값이 2보다 작을 경우 모든 차수에 대한 통계모멘트들이 발산하게 됨을 알 수 있다. 이는 해당 확률변수의 대표적인 규모를 규정할 수 없는 복잡계의 전형적인 특성을 나타낸다. 또한 멱함수 법칙분포의 초과확률(exceedance probability) $F(A)$ 역시 Eq. (5)를 기반으로 다음과 같이 해석적인 형태로 나타낼 수 있게 된다.

$$F(A) = \left(\frac{A}{A_{\min}} \right)^{-(\alpha-1)} \quad (7)$$

한 가지 흥미로운 사항은 $F(A)$ 가 $f(A)$ 와 마찬가지로 멱함수의 형태를 취하는 것으로 이들은 양자 모두 양대수지 상에서 직선의 형태로 나타나게 됨을 확인할 수 있다.

2.3 대상유역

본 연구에서는 설마천 시험유역 내 전적비교 유역을 대상 유역으로 선정하였다(Fig. 3). 해당 유역은 동경 $126^{\circ}54'57'' \sim 126^{\circ}55'54''$ 및 북위 $37^{\circ}54'57'' \sim 37^{\circ}56'23''$ 에 위치하고 있으며 유역면적이 약 8.5 km^2 , 주하천 연장은 약 5.8 km 정도의 미개발 지대로서 대부분이 산림지역이고 유역 내부에 약간의 전답이 포함되어 있다. DEM의 생성에는 국립지리원에서 발행한 1/25,000 수치지형도를 적용하였고 pixel의 해상도는 $20 \times 20 \text{ m}$ 로 하였다. 실제 DEM의 처리과정에는 Hamburg 대학을 중심으로 개발된 SAGA를 적용하였다. SAGA는 open source 형태의 free software로서 유역의 지형분석을 위하여 개발된 다양한 모의기법들을 조합하여 순차적으로 운용할 수 있도록 구성된 지형분석 tool kit의 일종이다. 이에 따라 본 연구에서는 전술한 세 가지 흐름방향방법(SFD, MFD, IFD)을 교차 적용하여 동일한 유역의 배수구조가 가질 수 있는 변동성을 검토하여 보았다. Fig. 4는 SAGA를 이용하여 sink를 제거한 대상 지역의



Fig. 3. Jeonjeokbigyo Basin.

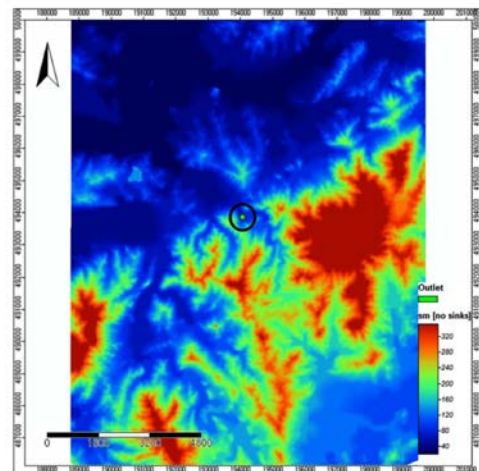


Fig. 4. DEM with No Sinks.

DEM으로서 중앙 원 내부의 녹색 점은 전적비교 영역의 출구지점의 위치를 나타낸다.

2.4 멱함수 범칙분포의 적합

본 연구에서는 Eq. (5)의 두 매개변수 A_{min} 과 α 의 추정에 다음과 같이 최우도법(method of maximum likelihood)을 적용하였다. A 에 대하여 n 개의 관측치($A_i \geq A_{min}, i = 1, 2, \dots, n$)가 주어질 경우 Eq. (5)에 따른 해당 변수의 우도는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$p(A|\alpha) = \prod_{i=1}^n \frac{\alpha-1}{A_{min}} \left(\frac{A_i}{A_{min}} \right)^{-\alpha} \quad (8)$$

여기서 \prod 는 다중곱 연산자이다. 분석의 편의를 위하여 Eq. (8)의 양변에 대수를 취하고 α 에 대한 1계 도함수 ($\partial \ln p(A|\alpha) / \partial \alpha = 0$)의 형태로 정리할 경우 해당 우도를 최대화하는 매개변수의 추정치 $\hat{\alpha}$ 에 대한 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있게 된다.

$$\hat{\alpha} = 1 + n \left[\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{A_i}{A_{min}} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

Eq. (9)를 이용하여 $\hat{\alpha}$ 를 추정하기 위해서는 A_{min} 에 대한

합리적인 결정이 요구된다. 이를 위하여 Clauzet et al. (2009)은 다음과 같이 Kolmogorov-Smirnov(KS) 통계량 D 의 적용을 제안하였다.

$$\min D = \max_{x \geq x_{min}} |S(x) - F(x)| \quad (10)$$

여기서 $S(A)$ 와 $F(A)$ 는 각각 관측치와 Eq. (7)로부터 산정되는 초과확률(exceedance probability)로서 만약 특정한 A_{min} 을 가정할 경우 Eqs. (9) and (10)로부터 그에 대응하는 $\hat{\alpha}$ 와 A_{min} 가 추정될 수 있다. 이러한 과정을 A_{min} 에 대한 모든 가정치 혹은 모든 A_i 에 대하여 수행할 경우 D 를 최소화하는 $\hat{\alpha}$ 와 A_{min} 을 찾을 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 전술한 방법론을 적용하여 A 에 대한 멱함수 범칙분포 적합을 수행하여 보았다.

3. Results and Discussion

3.1 흐름방향방법의 개별적용

대상 지역(Fig. 4)에 대하여 세 가지 흐름방향방법을 개별적으로 적용하여 흐름누적을 산정하여 보았다. 여기서 흐름누적은 SFD의 경우 상류배수면적 A 와 동일한 의미를 갖지만 MFD와 IFD의 경우 흐름의 분산으로 인하여 A 보다는

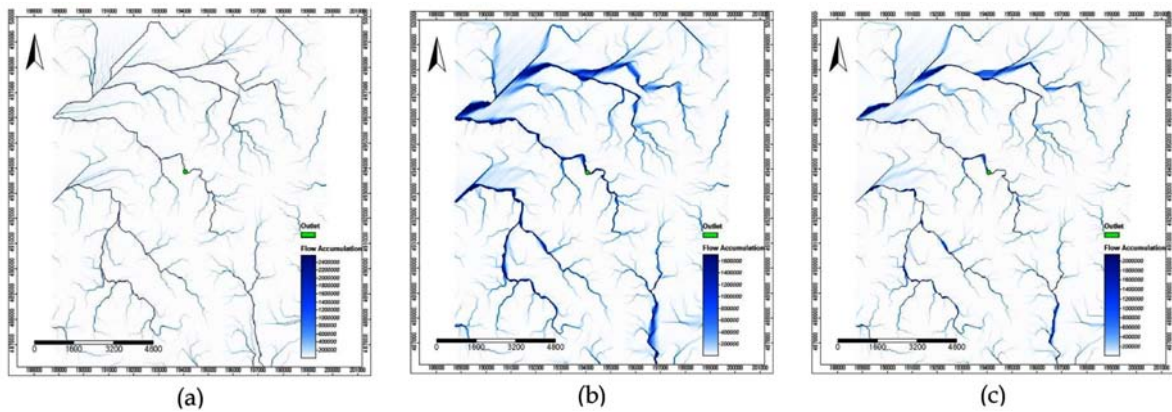


Fig. 5. Flow Accumulation Map: (a) SFD, (b) MFD, (c) IFD.

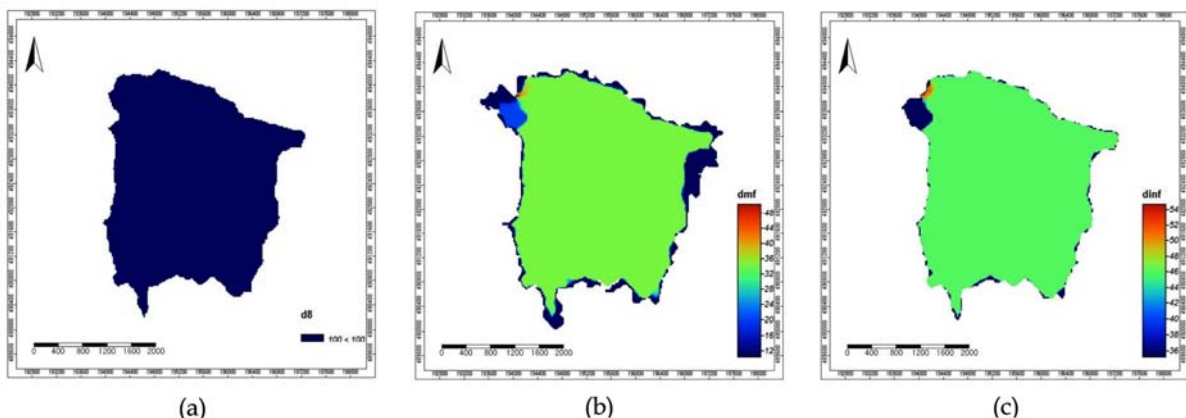


Fig. 6. Flow Contribution to Outlet: (a) SFD, (b) MFD, (c) IFD.

Table 1. Contribution of Pixels to the Outlet by Various Flow Direction Methods

	Contributing Area (km ²)	Contribution of Each Pixel		
		Minimum (%)	Mean (%)	Maximum (%)
SFD	8.51	100	100	100
MFD	9.62	1.64×10^{-33}	30.34	100
IFD	8.78	3.14×10^{-6}	44.90	100

응집된 유량에 보다 가까운 개념을 가짐을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 MFD와 IFD에 따른 흐름누적 역시 지점별 A 와 동일한 의미로 가정하여 분석을 수행하였다. Fig. 5는 각 pixel별 흐름누적(m²)에 대한 산정결과를 도시해 본 것으로 흐름방향방법에 따라 상이한 양상들이 나타남을 확인할 수 있다. 특히 SFD(Fig. 5(a))의 경우 선명한 하천선(혹은 하천망)의 형태가 출현함을 볼 수 있지만 MFD(Fig. 5(b))와 IFD(Fig. 5(c))의 경우 마치 Fig. 5(a)에 따라 종이 위에 잉크로 그린 하천선이 번져나가는 것과 같은 형상을 보여 흐름의 분산이 흐름누적에 미치는 영향을 시각적으로 확인할 수 있다.

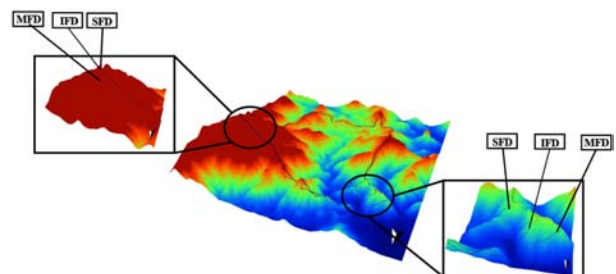
Fig. 6은 전적비교 유역의 출구를 통해 배수되는 유량에 대한 개별 pixel들의 기여도(contribution)를 흐름방향방법에 따라 백분율의 형태로 표시한 것이다. 여기서 기여도라 함은 유역 내 임의 지점(혹은 해당 pixel)에 떨어진 초과강우(rainfall excess)가 흐름 경로(flow path)를 통하여 출구에 도착하는 정도를 나타내는 것으로, 임의 pixel의 기여도가 50% 일 경우 해당 지점에 발생한 1 mm의 초과강우 중 절반(0.5 mm)은 유역의 출구를 통하여 지표유출(surface runoff)의 형태로 배수되지만 나머지 절반은 흐름의 분산을 통하여 유역 경계 밖으로 손실됨을 의미한다. 흥미로운 사항은 흐름방향방법에 따라 출구지점에 기여하는 공간적 범위가 변화하는 것으로 SFD, IFD, MFD의 순서로 기여 면적(Contributing Area)이 성장해 감을 볼 수 있다. 이는 각 방법의 운용과정 내에서 흐름의 분산을 허용하는 정도에 기인하는 것임을 알 수 있다.

Table 1은 Fig. 6에 도시된 흐름방향방법별 주요 결과를 요약한 것이다. 여기서 제 2열은 기여도가 0%를 초과하는 모든 pixel들의 면적의 합(즉 총 기여 면적)을 나타내는 것으로 전술한 흐름의 분산에 따른 기여 면적의 성장을 정량적으로 확인할 수 있다. 주목되는 사항은 흐름방향방법에 따른 pixel별 기여도의 변동성으로서 SFD의 경우 모든 pixel들이 동일하게 100%의 값을 갖지만 MFD와 IFD는 각각 $1.64 \times 10^{-33} \sim 100\%$ 및 $3.14 \times 10^{-6} \sim 100\%$ 의 범위를 가짐을 볼 수 있다. 특히 흐름의 분산을 허용하는 두 방법의 경우 기여도가 100%인 지점은 오직 출구지점 하나뿐인 것으로 나타났다. 또한 각 방법별 평균 기여도의 경우 SFD는 100%이지만 MFD와 IFD는 각각 30.34% 및 44.90%임을 볼 수 있다. 이는 초과강우의 유출율과 동일한 의미를 갖는다. 수문학 분야에서 초과강우는 총강우로부터 증발산(evapotranspiration)이나 침투(infiltration)와 같은 수문학적 손실을 제외한 강우부분으로 정의된다. 이에 따라 SFD의 경우 일반적인 유역의 정의에 따라 기여 면적 내 발생한 모든 초과강우가 직접유출의 생성에 기여하게 되지만 MFD

나 IFD의 경우 흐름 경로 내의 분산을 통하여 추가적인 손실을 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 연구의 대상 유역인 전적비교 유역의 경우 Table 1의 평균 기여도에 대한 산정결과로부터 유역 전반에 걸쳐 MFD나 IFD를 적용할 경우 과도한 흐름의 분산을 초래할 수 있음을 정량적으로 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 흐름의 분산 정도에 따라 출구지점에 대한 기여 면적은 증가하지만 지점별 기여도는 감소하게 됨을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 전적비교 유역의 흐름방향방법별 기여 면적의 경계(Fig. 6)를 DEM(Fig. 4)과 중첩하여 3차원 공간상에 도시한 것으로 SFD의 경우 일반적인 유역 경계의 정의와 동일하게 능선의 궤적을 따라 구성되지만 MFD와 IFD의 경우 흐름 분산의 정도에 따라 능선을 넘어 기여 면적이 확장되어 가는 경향을 확인할 수 있다.

3.2 유출응집구조의 변동성

전적비교 유역에 대한 A 의 여누가 분포(complementary cumulative distribution)를 흐름방향방법별로 Fig. 8과 같이 양대수지 상에 도시하고 Eqs. (9) and (10)에 따라 멱함수 법칙분포로의 적합을 수행하였다. Table 2는 흐름방향방법별 매개변수에 대한 추정결과로서 이에 따라 작도된 $F(A)$ 곡선을 Fig. 8에 중첩하여 도시하여 보았다. Table 2에서 주목할 만한 사항은 제 2열의 $\hat{\alpha}$ 로서 세 가지 방법 모두 2보다 작은 값으로 나타남을 볼 수 있다. 이는 Eq. (6)에 따라 모든 차수에 대하여 A 의 통계모멘트가 정의되지 않음을 의미하는 것으로서 흐름누적의 경우 흐름방향방법에 관계없이 대표적인 규모를 정량적으로 결정할 수 없는 규모 불변성(scale invariance) 지형인자임을 입증하는 것이다. Kim et al. (2016)은 SFD를 기반으로 국내 유역에 대한 분석을 통하여 이러한 형태의 거동이 다수의 유역에 대한 결과에서 공통적으로 나타날 수 있음을 제시한 바 있다. 따라서 Table 2의 결과는 본 연구에서 고려한 세 가지 흐름방향

**Fig. 7.** 3D View of the Jeonjeokbigyo Basin with Various Catchment Divides.

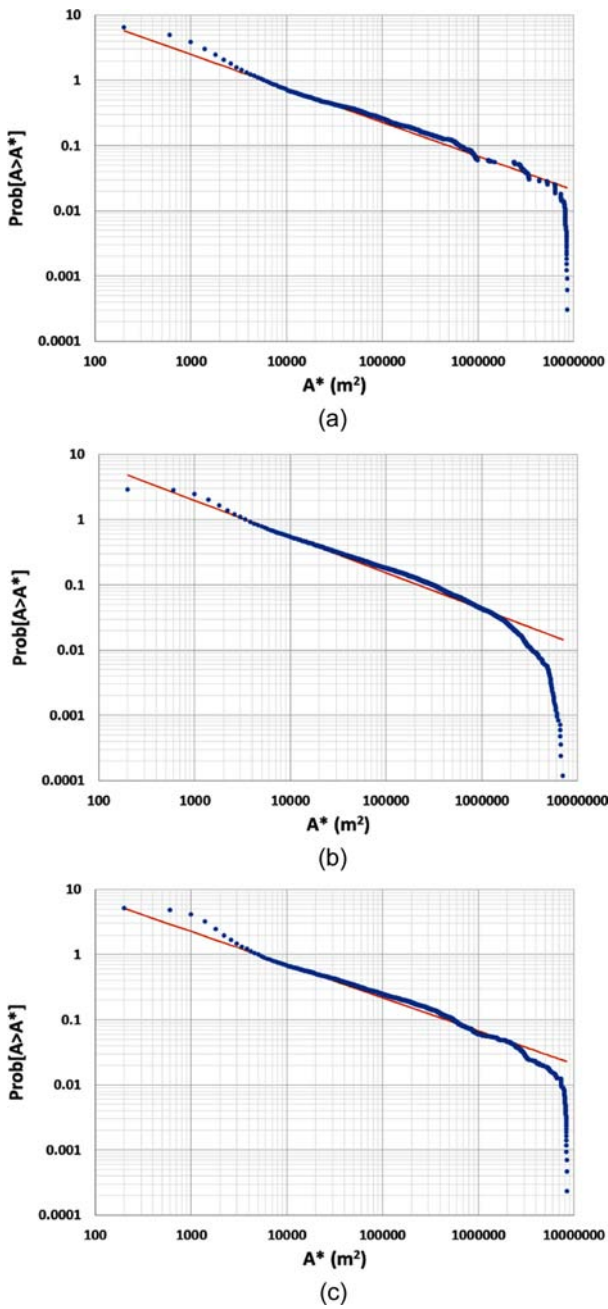


Fig. 8. Power Law Distribution of the Drainage Area: (a) SFD, (b) MFD, (c) IFD.

Table 2. Fitting Result by the Various Flow Direction Methods

	$\hat{\alpha}$	A_{min} (m ²)
SFD	1.520	5,800
MFD	1.555	3,400
IFD	1.509	5,000

법이 유역 내 물 입자의 유동을 비교적 합리적으로 모의하고 있음을 반증하는 것으로 판단할 수 있다.

Moglen and Bras (1995)는 Fig. 8과 같은 A 에 대한 멱함수법칙분포 곡선을 그 형태에 따라 1) 원점 부근의 역 S자형구간, 2) 곡선 중심부의 직선구간 그리고 3) 끝부분의 급락(急落)구간 등 총 3개의 개별적인 구간으로 구분한 바 있다. 특히 이들은 1) 구간과 2) 구간 사이에 위치한 곡선의 굴절이 구릉지사면(hillslope)과 계곡(valley) 사이의 유출응집구조의 차이를 나타냄을 지적하였는데 특히 자신들이 개발한 지면진화모형 SIBERIA를 기반으로 유역 내 주도적인 침식(erosion) 현상이 fluvial process에서 hillslope process로 변화할 경우 굴절이 발생하는 위치가 원점을 기준으로 오른쪽으로 이동하게 됨을 보여주었다. 따라서 Table 2의 A_{min} 에 대한 추정치는 흐름방향방법에 따른 구릉지사면과 계곡 사이의 유출응집거동을 구분하는 일종의 임계값(threshold)으로 판단할 수 있다.

3.3 흐름방향방법의 조합적용

MFD와 SFD (MFD with SFD) 및 IFD와 SFD(IFD with SFD)를 조합하여 흐름누적을 산정하여 보았다. 이러한 시도의 주목적은 발산지형과 수렴지형에서 각각 발생하는 흐름의 분산효과와 응집효과를 지표면의 형상에 따라 구분하여 동시에 모의해 보고자 하는 것으로 본 연구에서는 1) $A_i \leq A^*$ 인 지점에서는 MFD나 IFD를 2) $A_i > A^*$ 인 지점에서는 SFD를 적용하여 각 pixel별 흐름방향을 할당하고 흐름누적을 산정토록 하였다. 여기서 A_i 는 유역 내 i 번째 지점의 흐름누적을 의미하고 A^* 는 지표면의 형상에 대한 임계값이다. A^* 와 관련하여 Kim and Kim (2007)은 전적비교 유역의 국부경사와 배수면적 사이의 관계에 대한 선행연구를 통하여 해당 유역 내 발산지형과 수렴지형 사이의 임계값으로 800 m²를 제시한 바 있다. 따라서 본 연구

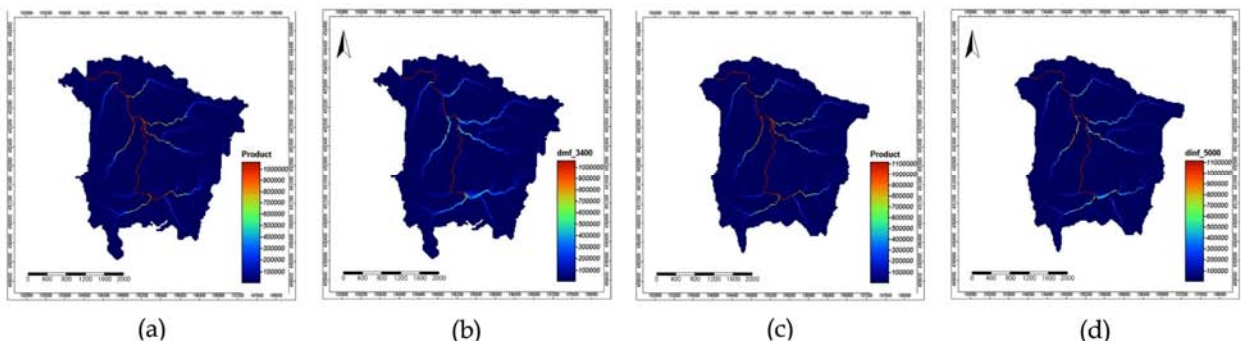


Fig. 9. Flow Accumulation: (a) MFD w/t SFD by $A^* = 800$ m² (b) MFD w/t SFD by $A^* = 3,400$ m² (c) IFD w/t SFD by $A^* = 800$ m² (d) IFD w/t SFD by $A^* = 5,000$ m².

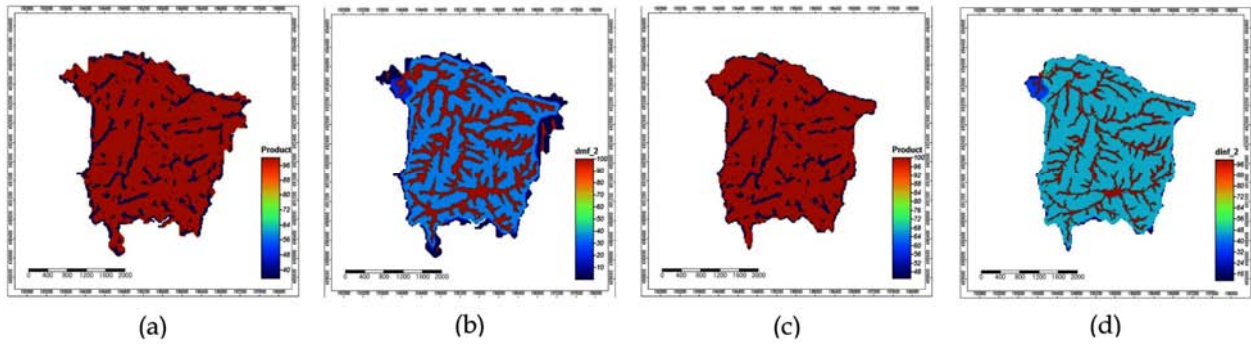


Fig. 10. Flow Contribution to Outlet: (a) MFD w/t SFD by $A^*=800 \text{ m}^2$, (b) MFD w/t SFD by $A^*=3,400 \text{ m}^2$, (c) IFD w/t SFD by $A^*=800 \text{ m}^2$, (d) IFD w/t SFD by $A^*=5,000 \text{ m}^2$.

Table 3. Mean Contribution of Pixels to the Outlet by a Combined Flow Direction Methods

	$A^*=800 \text{ m}^2(\%)$	$A^*=3400 \text{ or } 5000 \text{ m}^2(\%)$
MFD with SFD	89.01	52.58
IFD with SFD	91.12	55.06

에서는 이 값을 이용하여 흐름방향방법을 조합하여 적용하여 보았다. 또한 Table 2에서 제시한 MFD와 IFD에 대한 A_{\min} (즉 구릉지사면과 계곡 사이의 임계값)을 A^* 로 교차 적용하여 보다 합리적인 지형분석 결과를 도출할 수 있는 방법을 모색코자 하였다.

Fig. 9는 전적비교 유역을 대상으로 흐름방향방법을 조합하여 흐름누적을 산정한 결과로서 기여 면적의 범위는 MFD with SFD(Fig. 9(a) and (b))와 IFD with SFD(Fig. 9(c) and (d))가 각각 Fig. 6(b) and (c)와 동일하게 나타나지만 Fig. 5에 비하여 흐름의 분산효과가 상당히 감소하여 산정되고 있음을 시각적으로 확인할 수 있다. 이것은 유역 내에서 발생하는 흐름의 분산효과와 응집효과를 동시에 모의한 결과로서 3.1절에서와 같이 세 가지 흐름방향방법을 각기 개별적으로 적용하는 것 보다 신뢰성 있는 지형분석 결과인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 Fig. 6과 유사하게 전적비교 유역의 출구를 통해 배수되는 유량에 대한 개별 pixel들의 기여도를 도시한 것으로 흐름방향방법의 조합에 따른 기여도의 변화를 확인할 수 있다. Table 3은 Fig. 10의 결과를 정량적으로 평가하기 위하여 평균 기여도에 대하여 정리한 것으로서 Table 2에서 제시한 A_{\min} 을 A^* 로 적용한 경우 두 방법 모두 절반에 가까운 흐름 경로를 통한 손실이 발생하여 여전히 과도한 흐름의 분산이 나타나지만 A^* 가 800 m^2 일 경우 두 방법 모두 약 10% 내외의 손실만이 발생하여 보다 신뢰성 있는 방법론인 것으로 판단할 수 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 SFD, MFD 및 IFD를 설마천 시험유역 내 전적비교 유역의 흐름방향 모의에 적용하고 각 방법별 차

이점을 흐름누적의 변동성에 주목하여 검토하여 보았다. 흐름누적산정 결과에 대하여 먹힘수 법칙분포 적합을 수행하여 각 방법별 유출응집구조의 특성을 검토해 보았으며 흐름방향방법들의 조합을 통하여 보다 실제 흐름에 가까운 흐름모의를 시도해 보았다. 이상으로부터 얻어진 주요한 결론을 요약해 보면 다음과 같다.

1) 흐름방향방법의 종류에 따라 흐름누적에 대한 산정결과가 상이한 양상으로 나타남을 확인할 수 있었다. 특히 SFD의 경우 선명한 하천선의 형태가 출현함을 볼 수 있었지만 MFD와 IFD의 경우 마치 SFD로부터 얻어진 결과를 기반으로 종이 위에 잉크로 그린 하천선이 번져나가는 것과 같은 형상을 보여 흐름의 분산이 흐름누적에 미치는 영향을 시각적으로 확인할 수 있었다.

2) 흐름방향방법별로 흐름의 분산 정도가 증가함에 따라 출구지점에 대한 기여 면적은 SFD, IFD, MFD의 순서로 성장하지만 지점별 기여도는 감소하게 됨을 확인할 수 있었다. SFD의 경우 일반적인 유역의 정의에 따라 기여 면적 내 발생한 모든 초과강우가 직접유출의 생성에 기여하게 되지만 MFD나 IFD의 경우 흐름 경로 내의 분산을 통하여 증발산이나 침투 외에 추가적인 수문학적 손실을 발생시킬 수 있음을 알 수 있었다.

3) 흐름누적에 대한 먹힘수 법칙분포의 적합을 수행한 결과 해당지형인자는 흐름방향방법에 관계없이 대표적인 규모를 정량적으로 결정할 수 없는 규모 불변성 지형인자로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 고려한 세 가지 흐름방향방법들은 모두 유역 내 물 입자의 유동을 비교적 합리적으로 모의하고 있는 것으로 판단할 수 있었다.

4) 발산지형과 수렴지형에서 발생하는 흐름의 분산효과와 응집효과를 지표면의 형상에 따라 구분하여 동시에 모의할 경우 보다 실제에 가까운 물의 흐름을 DEM 상에서 구현함과 함께 흐름의 분산에 따른 수문학적 손실을 10% 내외로 줄일 수 있어 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다.

Acknowledgement

이 논문은 2017학년도 대전보건대학교 교내연구비 지원

에 의한 논문임(This paper was supported by Daejeon Health Institute of Technology in 2017).

References

- Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E. J. (2009). Power-Law Distributions in Empirical Data, *Siam Review*, 51(4), 661-703.
- Gregory, E. T., Catani, F., Rinaldo, A., and Bras, R. L. (2001). Statistical Analysis of Drainage Density from Digital Terrain Data, *Geomorphology*, 36, 187-202.
- Kim, J. C., Kang, H., and Jung, K. S. (2016). Analysis of Drainage Structure for River Basin on the Basis of Power Law Distribution, *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(6), 495-507. [Korean Literature]
- Kim, J. C. and Kim, J. H. (2007). Morphological Representation of Channel Network by Dint of DEM, *Journal of Korea Water Resources Association*, 40(4), 287-297. [Korean Literature]
- Moglen, G. E. and Bras, R. L. (1995). The Importance of Spatially Heterogeneous Erosivity and the Cumulative Area Distribution Within a Basin Evolution Model, *Geomorphology*, 12, 173-185.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Ddigital Elevation Data, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 324-344.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models, *Hydrological Processes*, 5, 59-79.
- Rampi, L. P., Knight, J. F., and Lenhart, C. F. (2014). Comparison of Flow Direction Algorithms in the Application of the CTI for Mapping Wetlands in Minnesota, *Wetlands*, 34(3), 513-525.
- Tarboton, D. G. (1997). A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- Vicente, M. L., Bielsa, C. P., Montero, T. L., Lamban L. J., and Navas, A. (2014). Runoff Simulation with Eight Different Flow Accumulation Algorithms: Recommendations Using a Spatially Distributed and Open-source Model, *Environmental Modelling & Software*, 62, 11-21.
- Wolock, D. M. and Gregory, J. M. Jr. (1995). Comparison of Single and Multiple Flow Direction Algorithms for Computing Topographic Parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31(5), 1315-1324.