

수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘

A Digital Elevation Analysis: Spatially Distributed Flow Apportioning Algorithm

김 상 현* / 김 경 현** / 정 선 희***

Kim, Sanghyun / Kim, Kyunghyun / Jung, Sunhee

Abstract

A flow determination algorithm is proposed for the distributed hydrologic model. The advantages of a single flow direction scheme and multiple flow direction schemes are selectively considered to address the drawbacks of existing algorithms. A spatially varied flow apportioning factor is introduced in order to accommodate the accumulated area from upslope cells. The channel initiation threshold area(CIT) concept is expanded and integrated into the spatially distributed flow apportioning algorithm in order to delineate a realistic channel network. An application of a field example suggests that the linearly distributed flow apportioning scheme provides some advantages over existing approaches, such as the relaxation of over-dissipation problems near channel cells, the connectivity feature of river cells, the continuity of saturated areas and the negligence of the optimization of few parameters in existing algorithms. The effects of grid sizes are explored spatially as well as statistically.

keywords : flow apportioning, CIT, topography index

요 지

단일 흐름 기법과 다방향 흐름 기법의 장점을 선택적으로 고려하여 기존 알고리즘의 약점을 보완하기 위한 분포형 수문모형의 흐름 분배 알고리즘을 제안하였다. 상경사(upslop) 격자로부터의 누적 면적을 조절하기 위해 공간적으로 변화된 흐름 분배 상수가 도입되었다. 또한 실제 수로망을 표현하기 위해 수로형성면적(channel initiation threshold area; CIT) 개념을 확장하여 흐름 분배 알고리즘에 결합시켰다. 실제 유역에 대한 적용 결과, 선형적으로 분포된 흐름 분배 기법이 기존의 접근방법에 대한 몇가지 장점을 보였는데, 예를 들어 수로 근처 격자에서의 과도한 흐름 분산 문제의 완화, 수로 격자의 연결성, 포화면적의 연속성과 기존 알고리즘에서의 매개변수 보정의 무시와 같은 것이다. 그리고 격자 크기의 영향이 통계적으로 뿐만아니라 공간적으로 검토되었다.

핵심용어 : 흐름 분배, CIT, 지형지수

* 부산대학교 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ. S. Korea(E-mail : kimsangh@pnu.edu)

** 부산대학교 환경기술·산업개발연구센터 연구원

Research Assistant, IETI Pusan National Univ. S. Korea(E-mail : validity@pnu.edu)

*** 한국환경정책평가연구원 연구원

Research Associate, Korea Environment Institute, 주소 (E-mail : shjung@keins.kei.re.kr)

1. 서 론

유역 지형에 대한 흐름 방향 분석은 분포형 수문 모형의 필수적인 과정이다(Beven 과 Kirkby, 1979; O'Lounhlin, 1986; Vertessy 와 Elsenbeer, 1999; Kuo 등, 1999). 최근에 수치지형모형에 대한 접근은 격자 기반의 분포형 모형을 지리정보시스템(GIS)으로 결합시키는 것을 가속시켰다. 몇몇 연구에 의해 사면 스케일에서 수문학적 거동에 대한 지형의 영향에 대해 검토되었다(Jenson과 Dominique, 1988; Quinn 등, 1991; Costa-Cabral과 Burges, 1994; Grayson 등, 1996). 이러한 연구 방향에 따라 흐름 분배 알고리즘은 합리적인 흐름 분산 특성을 반영하기 위해 발전되어 왔다(Mendicino과 Sole, 1997). 함몰(depression) 지형과 평탄 지형에서 흐름 분배의 문제 또한 연구되었다(Gurbrecht와 Martz, 1997). 지형지수의 통계적 분포를 평가하기 위해(Quinn 등, 1995; Zhang과 Montgomery, 1994), 스케일과 TOPMODEL의 매개변수의 의존도를 파악하기 위해(Saulnier 등, 1998; Brasington와 Richards, 1998) 그리고 불포화 흐름으로써 격자 기반의 가변기여면적(variable source area) 모형을 시험하기 위해서(Kuo 등, 1999) 분포형 수문 모형에 대한 격자 크기의 영향이 연구되었다. TOPMODEL의 정상 상태 가정이 비판받아왔음(Wigmosta와 Lettenmaier, 1999; Gunter 등, 1999; Vertessy와 Elsenbeer, 1999)에도 불구하고 지표 토양 수문과 지형과의 관계는 DEM 수문학의 해석인자로서 $\ln(a/\tan \beta)$ 지수의 공간적 잠재성을 보였다(Crave와 Gascuel-Oudou, 1997; Western 등, 1999).

$\ln(a/\tan \beta)$ 를 계산하는 절대적인 방법은 없는데 그것은 흐름 계산 알고리즘들간의 차이가 매개변수 보정에 의해 상쇄될 수 있기 때문(Beven K.J., 1993; Quinn 등, 1995; Frank 등, 1998)이 아니라 흐름 방향 알고리즘의 현재 수준이 자연적인 지형 형상을 완전하게 반영해내지 못하기 때문이다. 오목한 지형과 볼록한 지형의 혼합은 DEM에서의 오차(Walker와 Willgoose, 1999) 뿐만 아니라 합리적인 흐름 분배를 어렵게 한다. DEM 수문학에서 사면 수문(hillslop hydrology)과 수로발생지점과의 사이의 경계가 논리적으로 고려되는 것이 필요할 것이다. 본 연구에서는 수로 형성을 위한 흐름의 분산과 수렴의 특성을 고려

하는 새로운 흐름 분배 알고리즘을 개발, 제안하고 그 적용성을 검토하였다. 제안된 알고리즘은 유역에서의 격자 위치에 따라 인접한 격자에 대한 흐름 분배의 정도가 조정될 수 있다는 가정에 기반하고 있다. 제안된 알고리즘이 흐름 교차, 과다한 분산 그리고 비합리적인 수로격자 형성과 같은 기존 방법의 한계를 합리적으로 극복할 수 있음이 제시되었다. 제안된 알고리즘의 적용은 통계적으로 뿐만 아니라 공간적으로 다른 기존의 방법과 비교되었는데 다양한 흐름 생성 알고리즘의 민감도를 분석하기 위해 격자 스케일 문제들이 격자크기 10m부터 50m에 걸쳐 검토되었다. 흐름 분배 인자와 수로형성면적(Quinn 등, 1995; Holmgren, 1994)이 제안된 흐름 분배 알고리즘에서 확장되어 사용되었다.

2. 흐름 분배 알고리즘

흐름 축적 정도의 공간적 분포는 횡방향 수리학적 구배가 경사로 표현될 수 있다는 가정에 기반해서 계산될 수 있다. 오늘날에는 래스터 기반의 DEM이 광범위하게 쓰이고 있으며 흐름 분배 알고리즘에 쉽게 적용되고 있다.

첫 번째 연구 중 하나는 단방향 흐름(single flow direction; sfd) 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984; Jenson 과 Dominique, 1988)인데, 이 알고리즘은 8개의 이웃격자들 중 가장 경사가 급한 격자에만 흐름을 분배한다. sfd의 추계학적 버전이 Rho8(Fairfield와 Leymarie, 1991)이라고 불리는 것인데 흐름 분배 알고리즘에 수로망을 도입했다.

다방향 흐름(multiflow flow direction; mfd) 알고리즘은 격자로부터 흐름을 8방향 경사와 등고선 길이의 곱의 합에 대한 경사와 등고선 길이의 비에 따라 주위 8격자 모두에 분배한다(Quinn 등, 1991). mfd에서 8방향로 가능한 흐름의 한계는 DEMON 알고리즘(Costa-Cabral과 Burges, 1994)의 흐름 튜브망에 의해 해결되었다. mfd와 Rho8의 혼합형태는 FRho8이라 불리는데 수로망의 정확한 정의에 문제를 가져왔다(Mendicino와 Sole, 1997). Quinn 등(1995)은 수로 형성에 대한 경계(threshold)누적 면적을 도입함으로써 사면 수문에서 수로와 흐름 누적과의 상호작용을 분석하는 것을 시도했다.

mfd 알고리즘이 sfd 알고리즘에 비해 특히 볼록한 지형에서 실제적인 상경사(upslop) 면적의 분배를 보다 잘 실현하지만(Quinn 등, 1991; Moore, 1995), 흐름 과다 분산과 수로 격자 근처에서의 흐름 교차가

문제로 남아있다(Quinn 등, 1995). 이 문제의 해결을 위해 아래와 같이 흐름 분배 결정에서 지수법칙이 도입되었다.

$$f_i = \frac{(\tan \beta_i)^h}{\sum_{i=1}^n (\tan \beta_i)^h} \quad (1)$$

여기서 i 는 방향, f_i 는 i 방향 격자로의 흐름 분배율, $\tan \beta$ 는 국부 경사, 그리고 h 는 먹급수이다(Holmgren, 1994). h 가 클수록 mfd 알고리즘은 더 가파른 경사방향으로 더 많은 흐름을 분배할 수 있게 된다.

식(1)의 흐름 분배는 h 에 의존하고 있기 때문에 h 가 무한대에 가까우면 흐름 분배 알고리즘은 sfd와 같은 결과를 보이며 h 이 0일 때는 mfd와 같은 결과를 보인다.

그러나 정확하게 절충된 계산결과가 얻어질 수 있더라도 이것이 흐름 분배율에 대한 먹급수의 적용이 합리적으로 실제 지형에서의 흐름 체계를 표현한다는 것을 증명하는 것은 아니다. 사실 먹급수의 최적값은 지형의 형태, 계산방법 그리고 격자크기에 따라 변한다(Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Quinn 등, 1995).

수로형성면적(channel initiation threshold area: CIT)은 영구수로가 형성될 수 있는 상경사 면적의 값으로 정의되었다(Quinn 등, 1995). 상경사 면적의 흐름이 부적당하게 분배되거나 영구 수로의 개념이 사면 스케일에서 맞지 않을 수 있기 때문에 계산된 수로 격자의 위치가 실제 수로의 위치와 다를 수 있다.

3. 성장수로와 흐름 분배

흐름 분산의 정도는 주로 지형의 형상과 관계된다. 다방향 흐름이 원뿔형이나 블록한 지형 형태에서 기대되는 반면 단방향 흐름은 계곡처럼 오목한 형태의 지형이나 수로근처에서 관찰될 수 있다.

일단 수로가 형성되면 흐름 체계는 분산적인 사면 수문에서 단일한 집중적 흐름으로 전환된다는 가정이 유출사상의 관측을 통해서 이루어졌다. 이러한 연구에서 수로망의 전이상태는 사면 수문의 반응에서 고려된다. 수로의 크기, 길이 그리고 범위는 강우사상에 따라 변화되는 것으로 가정된다. 강우량에 따라 수로형성을 위한 상경사 누적면적은 영구수로망의 CIT

(Quinn 등, 1995)에서 가변적 수로망의 확장수로형성면적(extended channel initiation threshold area: ECIT)으로 줄어들게 된다.

국부적인 지형의 형태와 상경사 누적면적은 하나의 격자에서 인접한 격자로의 흐름분배 특성을 결정하는데 있어 중요하다. 인접한 격자로의 흐름분배율에 대한 국부적인 지형 형태의 영향은 mfd 알고리즘에서 제시되어졌다(Quinn 등, 1991; Mendicino와 Sole, 1997). 그러나 상경사 누적면적은 흐름결정 알고리즘의 흐름분배 과정에서 고려될 필요가 있다고 판단된다. 예를 들어, 유역의 서로 다른 위치에 있는 두 격자가 DEM상에서 동일한 국부적 지형 형상을 가지고 있고 하나의 격자가 다른 것보다 큰 상경사 누적면적을 가지고 있다고 하자. 강우시 큰 상경사 누적면적을 가지고 있는 격자가 포화될 수 있는 가능성이 확실히 크다. 포화된 격자는 수로가 될 가능성이 크며 그것의 흐름은 단방향성이 되는 경향을 가지고 있다. 결과적으로 흐름분배율 방법은 분배과정에서 수로가 되는 가능성을 포함해야 할 필요를 가지게 된다.

4. 분포형 흐름 분배 알고리즘

분포형 흐름 분배와 국부적 경사도는 DEM을 이용해 계산할 수 있다. 개발된 알고리즘 적용에 앞서 함몰지역과 평탄지역을 제거해야한다. 하류 격자로의 면적분배율의 계산은 Quinn 등 (1991)과 Holmgren (1994)의 방법과 유사하다. 이 알고리즘에서 흐름분배의 정도는 강우 유출 사상시 상경사 흐름누적면적과 가변적인 수로망의 영향을 고려하면서 공간적으로 변하게 된다. 계산 순서는 아래와 같다.

1. 각 격자의 고도는 흐름방향의 결정과 가장 급한 경사의 계산을 위해 인접한 격자들과 비교된다. 흐름방향은 대각선과 수직방향으로 구별되는데 $L_1 = 0.354dx$ 그리고 $L_2 = 0.5dx$ 는 각각 인접격자로 흐르는 흐름이 가로지르는 등고선의 길이를 의미한다. 그리고 dx 는 DEM의 해상도이다. 최초 계산을 위한 CIT는 유역면적에 의해 결정된다.

2. 전체 상경사 면적은 최고 고도 격자로부터 하경사 격자로 분배되는데 그 식은 다음과 같다.

$$dA_i = \frac{A \tan \beta_i L_i}{\sum_{i=1}^n \tan \beta_i L_i} \quad (2)$$

여기서 dA_i 는 i 방향 격자로의 흐름분배량이며 n 은 흐름 방향의 전체 수, 그리고 L_i 은 i 번째 방향의 등고선 길이, $\tan \beta$ 는 고도값들 사이의 거리에 대한 고도차의 비로서 계산되는 경사도이다. 각 격자의 누적 면적은 하경사로의 계산과정이 진행됨에 따라 갱신된다.

3. 상경사 누적면적 A 는 CIT와 비교된다. 만약 A 가 CIT보다 크면 그 격자는 수로격자로 인식되며 흐름은 가장 급한 경사를 이루는 격자로만 할당된다. 이 과정은 모든 격자에 대해 계산될 때까지 2-3을 반복함으로써 계속 진행된다.

4. 절차 3이 진행되는 동안 만들어지는 수로의 형상은 실제 유역의 수로와 비교된다. CIT의 값을 조정하여 계산된 수로가 실제 수로와 일치할 때까지 절차 2-3을 반복한다. DEM의 해상도와 정확성 때문에 계산된 수로의 위치가 항상 정확하게 실제 수로의 위치와 일치하지는 않는다. 그러나 실제 수로의 형상에 가장 근접한 수로 위치를 제공하는 영구수로망의 CIT값을 얻을 수 있다.

5. 큰 값의 흐름분배상수가 수로격자에 할당된다. 이에 따라 수로격자의 흐름방향이 가장 급한 방향으로 결정되게 된다.

$$\begin{aligned} I, J \text{가 수로격자면 } H(I, J) &= \text{큰 수} \\ I, J \text{가 수로격자가 아니면 } H(I, J) &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

6. 확장수로형성면적(ECIT)는 CIT에서부터 단위격자의 넓이까지 줄어든다. 절차 2-3은 반복되고 ECIT와 각 격자의 누적면적 A 와의 비교가 확장된 수로망을 구성하기 위해 수행된다. 확장된 수로에서는 다방향으로의 흐름이 허용된다. 이 계산은 고도가 가장 낮은 격자까지 차례로 수행된다. 확장된 수로의 추가적인 유형에서 흐름분배인수는 3개의 함수형태의 하나로 제안되었다.

$$\text{지수형 함수 } H(I, J) = a \cdot \exp(b \cdot ECIT) \quad (4)$$

$$\text{로그형 함수 } H(I, J) = a \cdot \ln(ECIT) - b \quad (5)$$

$$\text{선형 함수 } H(I, J) = a \cdot ECIT + b \quad (6)$$

각 함수형태에서 a , b 는 두가지 흐름조건으로부터

추정되어질 수 있다. 하나는 꼭대기 지역에서의 흐름 분산인데 이때 $ECIT = \text{단위 면적}$, $H(I, J) = 1$ 이 된다. 다른 조건은 영구수로에서의 단방향 흐름이다. 절차 6은 흐름분배의 완전한 공간적 분포를 가능하게 한다.

7. 상경사 면적의 분배는 최고 고도의 격자에서 최저고도의 격자에 이르기까지 다음 식에 의해 계산된다.

$$dA_i = \frac{A(\tan \beta_i)^{H(I, J)} L_i}{\sum_{i=1}^n (\tan \beta_i)^{H(I, J)} L_i} \quad (7)$$

각각의 격자에 대한 국부적 경사도는 다음과 같이 계산된다.

$$\tan \beta = \frac{\sum_{i=1}^n (\tan \beta_i L_i)}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (8)$$

8. $\ln(a/\tan \beta)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) = \ln\left(\frac{A}{C \tan \beta}\right) \quad (9)$$

여기서 C 는 하경사방향의 등고선 길이의 합이다.

이후 본 알고리즘이 완성되면 수로망 성장의 양상은 가변수로형성면적(VCIT)의 도입에 의해 모의될 수 있다. VCIT는 강우사상시 영구수로망의 공간적인 확장이다. 가변적인 수로에서 하경사 방향격자에 대한 흐름 분배는 단방향이어야 하는데 이는 개수로의 이류지배 특성에 기인한다.

5. 분석결과 및 고찰

대상유역으로 임진강의 상류 지류인 설마천을 선택하였다. 유역면적은 8.5km^2 이며 수로연장은 5.8km 이다. 연평균 강수량은 $1,600\text{mm}$, 고도는 최저 EL. 59m 에서 최고 EL. 675m 이며 경사도는 0에서 50%이다. 그림 1에 유역에 대한 인공위성(Landsat) 이미지를 나타내었다. 지형도는 국립지리원에서 제공하는 1:5,000 지도를 사용했으며 DEM의 해상도는 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 이며 576열 628행이다. 대상유역의 DEM을 그림 2에 나타내었다.

흐름분배인수는 식 (4), (5) 그리고 (6)을 사용하는 ECIT 면적과 함수관계로부터 추정될 수 있다. 그림 3은 3개의 흐름분배인수 함수를 나타내었다. 선형 함수와 비교해서 대수형 함수는 상대적으로 작은 흐름 기

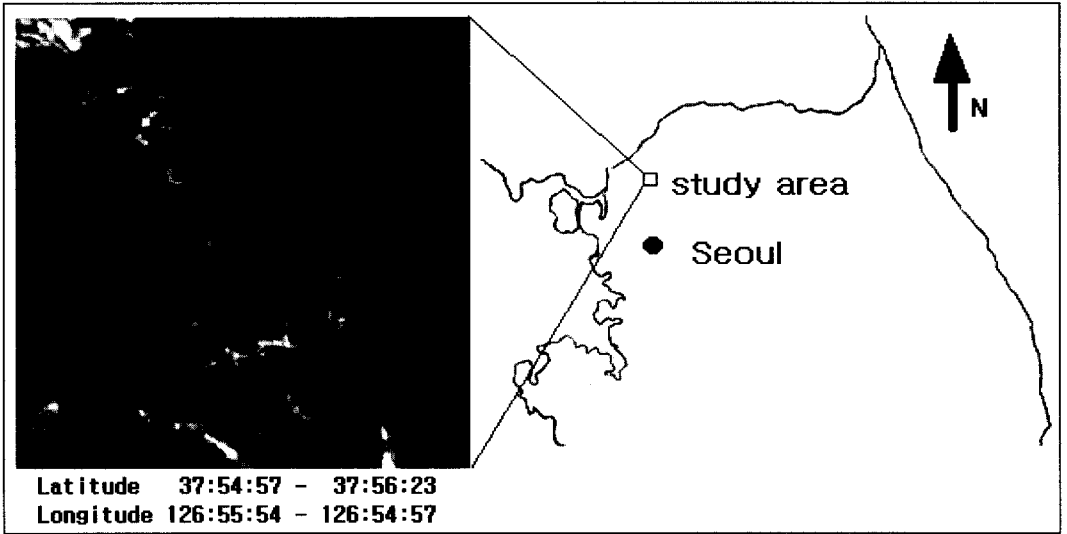
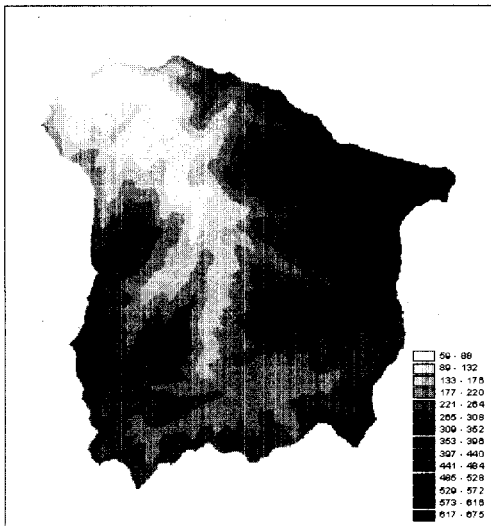


그림 1. 대상구역의 인공위성 이미지



(단위 : m)

그림 2. 설마천 대상구역의 수치고도지도

여 면적에서부터 큰 가중치를 부여해 단방향 흐름으로 특성을 만든다. 반면 지수함수는 사면지역의 불복한 지역에 보다 많은 흐름 분산을 허용한다.

그림 4는 그림 2의 DEM의 격자에 대해 몇가지 수치계산 알고리즘을 적용해 계산된 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 공간적 분포를 보여준다. mfd 알고리즘은 흐름 분산 지역에서 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 합리적인 분포를 보여준다.

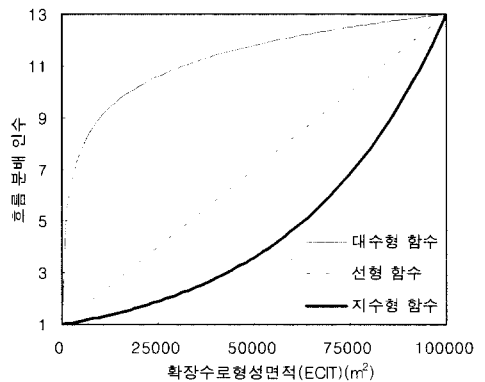
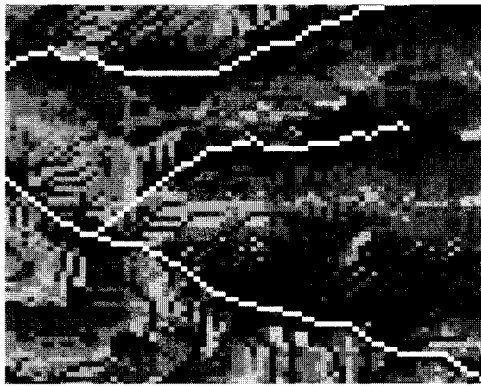
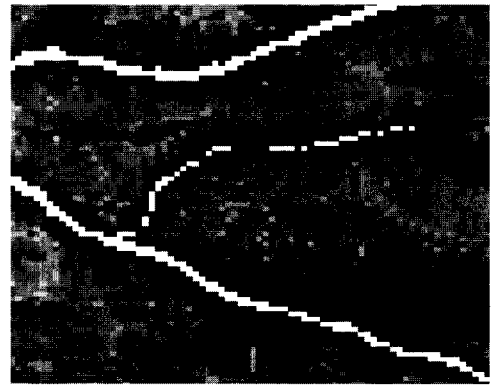


그림 3. ECI에 대한 각 함수의 흐름분배인수의 관계

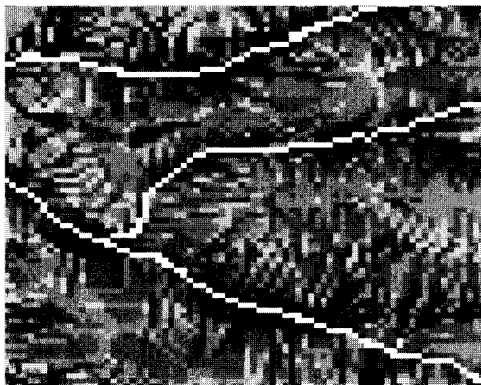
그러나 오목한 지형에서의 과도한 흐름집중은 불합리하게 넓은 수로와 수로망의 연결실패로 귀결되었다(그림 4(a)). 유역의 실제 수로 넓이는 대부분의 경우 10m를 넘지 않는다. sfd 알고리즘의 계산결과는 흐름 분산이나 수로형상의 꼬임같은 현상을 보이지 않았다(그림 4(b)). 또한 sfd 알고리즘은 수로망의 연결성을 획득했는데 전체 흐름누적면적을 가장 급한 경사의 격자만으로 할당하기 때문이다. 그림 4의 (c)는 먹급수 $H=5$ (Holmgren, 1994; Quinn 등, 1995)를 사용해서 계산된 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 분포를 나타내었다. 절충된 계산결과를 얻었음에도 불구하고 그것이 실제 흐름의



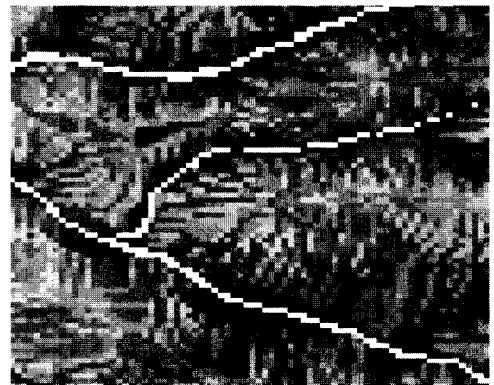
(a) MFD



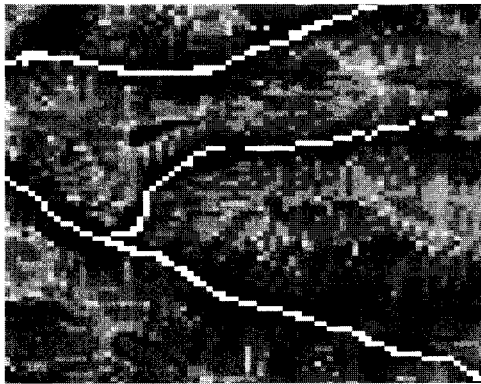
(b) SFD



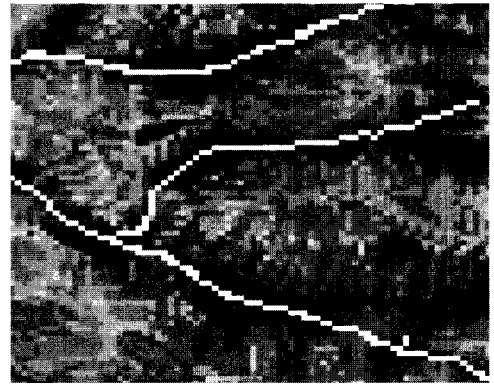
(c) H=5



(d) 로그형



(e) 선형



(f) 지수형

그림 4. mfd(a), sfd(b), 맥급수 H=5(c), 분포형 흐름 분배 함수(대수형 함수)(d), 분포형 흐름 분배 함수(선형 함수)(e), 분포형 흐름 분배 함수(지수형 함수)(f) 각각을 통해 계산된 지형지수의 분포

분산 형태나 수로의 연결성을 보여주지는 못했다. 개발된 분포형 흐름 분배 알고리즘의 적용이 그림 3의 3가지 함수 각각을 사용해서 수행되었다. ECIT와 흐름분

배 사이의 대수형 함수 적용으로 계산된 $\ln(a/\tan \beta)$ 는 흐름 분산의 비실제적인 분포를 보여주었으나 묘사된 수로망은 연결되어있고 수로의 넓이

또한 합리적인 것으로 나타났다(그림 4(d)) 그림 4의 (e)는 선형함수를 적용해 계산된 지형지수의 분포를 나타내었다. 불룩한 지형에서의 흐름 분산 체제는 mfd 알고리즘과 유사했으며 수로의 연결성과 수로의 너비는 양호하게 나타났다. 그림 4의 (f)에서 지수형 함수 적용에 의한 지형지수의 분포는 선형 함수의 결과와 유사한 흐름분산 양상을 보였다. 그러나 수로의 연결은 잘 되지 않았다.

수문학적 예측에 결정적인 토양 수분의 조직성(organization)에 대해 연속성(continuity), 연결성(connectivity) 그리고 수렴(convergence)은 필수적인 속성이다(Western 등, 1999). 먹급수형 알고리즘(Holmgren, 1994)이 가진 약점은 수로격자 근처에서의 mfd 알고리즘이 가진 문제인 흐름의 과도한 분산 문제를 완화함에도 불구하고 그것이 불룩한 지형부분에서 연속성의 부족을 겪는다는 것이다(그림 4(c)). 먹급수형 알고리즘이 수로격자 연결성에 대해서 한계를 보인데 반해 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘은 불룩한 지형에서의 sfd 알고리즘의 문제를 극복한 mfd 알고리즘이 가진 이점의 감소없이 흐름 교차 문제를 해결했다(그림 4(e))(Mendicino와 Sole, 1997). 수로격자의 적절한 처리는 수문학적 모의를 개선시키는데 중요한 것으로 인식되어왔다(Sauliner 등, 1997; Mendicino와 Sole, 1997). 본 논문에서의 계산 과정은 먹급수형 알고리즘에 추가적인 이점을 제공한다. 본 과정에서 먹급수와 CIT의 보정은 격자 크기에 상관없이 무시될 수 있다(Quinn 등, 1995).

$\ln(a/\tan \beta)$ 의 예측능력은 포화 경향의 정적인 가평과 결합된 토양 수분의 공간적인 양상에 대해서 약간의 한계를 가진다(Western 등, 1999). 제안된 방법은 전이 경계 조건(Wigmosta와 Lettenmaier, 1999)에서 분명한 분포형 수문 모형에 의해서 지표하 흐름 추적을 계산할 때 유용하게 사용될 것이다.

여섯 개 알고리즘 각각에 의한 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 통계적인 분포를 그림 5에 나타내었다. 선형과 지수형 함수를 적용한 흐름 분포 알고리즘의 빈도가 mfd 알고리즘의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 먹급수형 알고리즘($H=5$)은 mfd 알고리즘보다 sfd 알고리즘 쪽으로 이동된 결과를 보였다. 로그형 알고리즘은 먹급수형 알고리즘에 대해 mfd 알고리즘 쪽에 보다 절충된 결과를 보였다.

그림 6은 DEM 격자 크기를 10m에서 50m까지 변화시키면서 선형 함수를 적용한 흐름 분배 알고리즘의 적용결과에 대한 분석 결과를 보여주고 있다. 큰 격자는 큰 지형지수값의 분포를 가지는 경향을 보였다. 유사한 결과가 몇몇의 연구자들에 의해 보고된 바 있다(Zhang과 Montgomery, 1994; Sauliner 등, 1997; Wolock과 McCabe, 1995).

해상도의 차이에 의한 결과의 차이는 두가지 점에서 설명될 수 있다. 하나는 낮은 해상도에서 지형의 뒤를림이다. 지형데이터의 집성(aggregation)에 의한 오차는 주로 정보의 손실과 관계된다(Kuo 등, 1999). 특히 지형의 잘못된 묘사가 지형 기반의 수문 모형의 모의에 상당한 영향을 미친다(Zhang과 Montgomery,

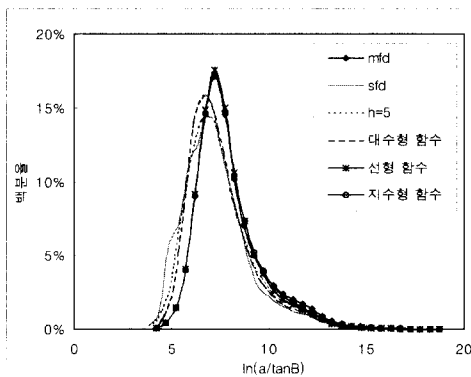


그림 5. 각 알고리즘에 의해 계산된 지형지수의 통계적 분포

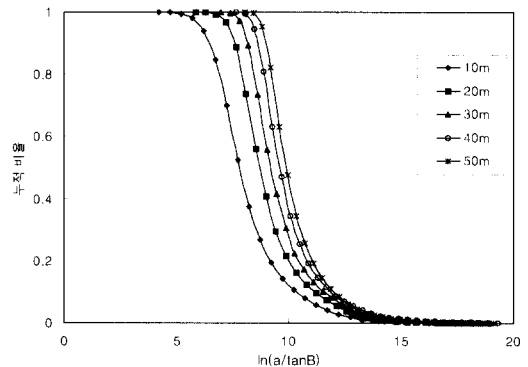
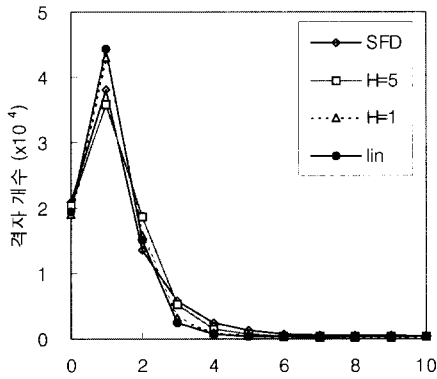
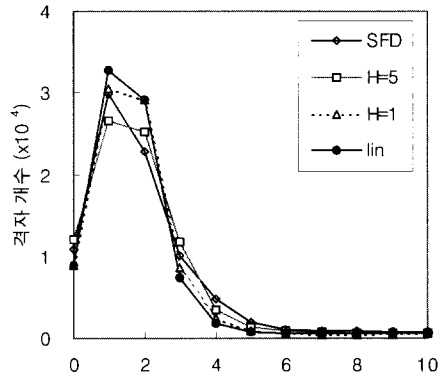


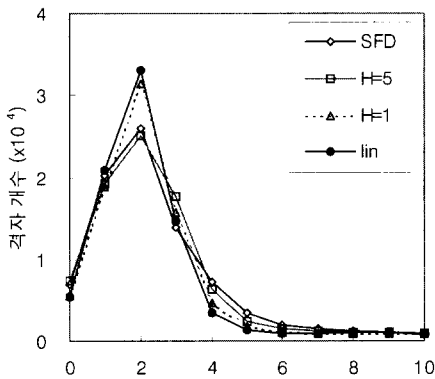
그림 6. 격자크기 10m에서 50m까지 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘으로 계산한 지형지수의 누적 분포



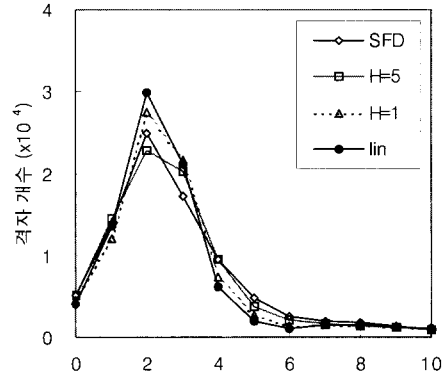
(a) 격자크기 10m와 20m 사이의 $\ln(a/\tan \beta)$ 차



(b) 격자크기 10m와 30m 사이의 $\ln(a/\tan \beta)$ 차



(c) 격자크기 10m와 40m 사이의 $\ln(a/\tan \beta)$ 차



(d) 격자크기 10m와 50m 사이의 $\ln(a/\tan \beta)$ 차

그림 7. 다른 격자 크기에서의 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 차

1994). 다른 하나는 흐름 분배 알고리즘의 적용에 있어 흐름 체계의 변화이다. DEM의 집성이 흐름장에서의 변화를 초래할 때 곡률의 뒤틀림이 생긴다. 따라서 흐름 분배 방법의 차이는 다양한 스케일에 걸친 $\ln(a/\tan \beta)$ 의 공간적 분포에서 모순을 가져온다. 두 개의 다른 해상도의 결과에서 차이의 통계적인 분포는 흐름장 계산에 대한 해상도의 영향을 고려하는 통찰을 제공한다. 그림 7의 (a)는 격자크기 10m와 20m 사이에서의 지형지수값 차의 절대값으로 몇 개의 흐름 분배 알고리즘의 통계적 분포를 보여준다. 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘의 계산결과 더 작은 차의 범위와 상대적으로 작은 격자가 큰 차 범위에 분포된 결과를 보였다. 먹금수형 알고리즘(H

=5)는 상대적으로 작은 수의 격자가 작은 차 범위에 있었고 더 많은 격자가 큰 차 범위에 있는 결과를 보였다. mfd 알고리즘은 선형 알고리즘과 유사하게 거동했고 sfd 알고리즘은 큰 차 범위(3에서 6)에서 가장 많은 격자가 분포하는 결과를 보였다. 그림 7의 (b)에서 10m와 30m 사이에서의 차는 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘의 가장 많은 격자수 범위가 2로 옮겨졌다는 것을 제외하고는 그림 7의 (a)의 결과와 유사했다. 또한 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘과 먹금수형의 교차점이 오른쪽으로 이동했다. 10m와 40m사이의 차나 10m와 50m 사이의 차는 동일한 분석결과를 보였다(그림 7(c)와 그림 7(d)). 모든 경우에서 선형 함수를 적용한 분포형 흐름

분배 알고리즘은 차가 큰 범위에서 격자 수를 최소화 했다. 따라서 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘을 적용하는 것이 다른 알고리즘을 사용하는 것보다 격자 크기 변화에 대한 영향이 적었다. 이것은 분포형 흐름 분배 인수가 국소적인 곡률의 지형이 아니라 최고 고도에서의 분산흐름과 수로 격자에서의 단 방향 흐름 사이의 상대적 위치에 의해 결정된다는 사실에 의해 설명된다.

6. 결 론

분포형 흐름 배분 알고리즘이 DEM의 흐름 계산에서의 기존 방법이 가진 한계를 극복하기 위해 제안되었다. 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 배분 알고리즘은 포화 경향의 연속성과 수로 격자의 연결성을 획득 하면서 mfd 알고리즘의 과다 분산 문제를 축소하였다. 맥급수형 알고리즘 방법에서의 흐름 분배 상수와 수로 형성면적 보정이 기본적으로 사라졌다.

선형 함수를 적용한 분포형 흐름 분배 알고리즘과 mfd 알고리즘의 통계적 분포의 차이는 무시할 정도임이 밝혀졌다. 격자 크기에 따른 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 알고리즘의 가변적인 통계 분포 양상이 mfd 알고리즘과 유사하였다. 지형 집성의 영향이 몇가지 흐름 분배 알고리즘들에 대해 평가되었다. 선형 함수를 적용한 분포형 흐름 알고리즘은 격자크기 변화에 대한 영향이 가장 작음을 보였다.

본 연구에서 제안된 흐름 분배 알고리즘은 TOPMODEL의 운영시 필요한 지형지수 계산에 활용될 수 있으며, 사면 유출과 수로형성 기작을 지형정보 시스템(GIS)에서 구현하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구는 분포형 흐름 배분 알고리즘이 수로망을 포함한 복잡한 유역 지형에서의 흐름 결정에 관한 몇 가지 문제를 해결할 수 있음을 제시하고 있다. 제안된 방법이 정적 지형 지수 형태로서 뿐만 아니라 전이 추적 기법의 적용에 있어서 토양 수분 분포의 예측을 향상시키는데 기여할 것으로 판단된다. 분포형 흐름 배분 알고리즘을 다른 유역에 관측 토양 수분과 수로 변화 양상과 함께 적용하는 것은 이후 연구 주제가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발 연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제 번호 : 00-10-14-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Beven, K. (1993). "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling." *Adv. Water Resour.*, vol. 16, pp. 41~51.
- Beven, K.J., and N.J. Kirkby (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. B.*, vol. 24, pp. 43~69.
- Brasington, J. and K. Richards (1998). "Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL." *Comput. Geosci.*, vol. 24, pp. 299~314.
- Costa-Cabral, M., and S. J. Burges (1994). "Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslope for computation of contributing and dispersal areas." *Water Resour. Res.*, vol. 30, pp. 1681~1692.
- Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). "Drainage networks from grid digital elevation medels." *Water Resour. Res.*, vol. 27, pp. 709~717.
- Freeman, T. G. (1991). "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid." *Comput. Geosci.*, vol. 17, pp. 413~422.
- Frank, S. W., P. Gineste, K. Beven, and P. Mero (1998). "On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process." *Water Resour. Res.*, vol. 34, pp. 787~797.
- Guntner, A., S. Uhlenbrook, J. Seibert and C. Leibundgut (1999). "Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment." *Hydrol. Process.*, vol. 13, pp. 1603~1620.
- Garbrecht, J., and Martz, L. W. (1997). "The assignment of drainage direction over flat

- surfaces in raster digital elevation models." *J. Hydrol.*, vol. 193, pp. 204~213.
- Grave, A. and C. Gouscuel-Odoux (1997). "Influence of topography on time and space distribution of soil surface water content." *Hydrol. Process.*, vol. 11, pp. 203~210.
- Grayson, R. B., I. D. Moore, and T. A. McMahon (1992). "Physically based hydrologic modeling, I, A terrain-based model for investigative purposes." *Water Resour. Res.*, vol. 28, pp. 2639~2658.
- Holmgren, P. (1994). "Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid based elevation models and empirical elevation." *Hydrol. Process.*, vol. 8, pp. 327~334.
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Photogram. Eng. Remote Sens.* vol. 54, pp. 1593~1600.
- Kuo, W. L., T. S. Steenhuis., C. E. McCulloch, C. L. Mohler, D. A. Weinsten, S.D. DeGloria and D. P. Swaney (1999). "Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 3419~3428.
- Mackay, D. S. and L. E. Band (1998). "Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography." *Water Resour. Res.*, vol. 34, pp. 897~901.
- Mart, L. W. and J. Garbrecht (1999). "The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models." *Hydrol. Process.*, vol. 12, pp. 843~855.
- Mendicino, G., and A. Sole (1997). "The information content theory for the estimation of the topographic index distribution used in TOPMODEL." *Hydrol. Process.*, vol. II, pp. 1099~1114.
- O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Comput. Vision Graphes Image Process.*, vol. 28, pp. 323~344.
- O'Loughlin, E.M. (1986). "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis." *Water Resour. Res.*, vol. 22, pp. 794~804.
- Quinn, P. F., K. Beven and R. Lamb (1995). "The $\ln(a/\tan\beta)$ index : How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework." *Hydrol. Process.*, vol. 9, pp. 161~182.
- Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrol. Process.*, vol. 5, pp. 59~79.
- Sanlmer G. M., K. Beven and C. Obled (1997). "Digital elevation analysis for distributed hydrological modeling: Reducing scale dependence in effective hydraulic conductivity values." *Water Resour. Res.*, vol. 33, pp. 2097~2101.
- Vertessy, R. A., and H. Elsenbeer (1999). "Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment : Effects of model parameterization." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 2173~2187.
- Walker, J. P. and G. R. Willgoose (1999). "On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 2259~2268.
- Western, A. W., R. B. Graysen, B. G nter, G. R. Willgoose and T. A. McMahon (1999). "Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 797~810.
- Wigmosta, M. S. and D. P. Lettenmaier (1999). "A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow." *Water Resour. Res.*, vol. 35, pp. 255

~264.

Wolock, D. M. and McCabe Jr. G. J. (1995).
"Comparison of single and multiple flow
direction algorithms for computing
topographic parameters in TOPMODEL."
Water Resour. Res., vol. 31, pp. 1315~1324.

Zhang, W. and D. R. Montgomery (1994).
"Digital elevation model grid size, landscape
representation, and hydrologic simulations."
Water Resour. Res., vol. 30, pp. 1019~1028.

(논문번호:01-002/접수:2000.01.15/심사완료:2001.04.13)