

무한 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘이 TOPMODEL 지형지수와 수문반응에 미치는 영향*

변종민** · 김종욱***

The Influence of the Infinitive Flow Direction Algorithm and Horn Slope Algorithm on the Topographic Index and Hydrological Responses of the TOPMODEL*

Jong Min Byun** · Jong Wook Kim***

요약 : 토양수분의 공간적인 분포를 예측하는 TOPMODEL 지형지수는 지형특성을 기반으로 하는 분포형 환경연구에서 빈번히 활용되는 지형 인자이다. 지형지수에 대한 평가 및 개선은 최근까지도 활발하지만, 대부분은 수정된 다중 유향 알고리즘을 이용한 것들이고, 경사 알고리즘을 이용한 경우는 상대적으로 미흡하다. 본 연구에서는 무한 유향(Dinf) 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘을 이용하여 지형지수를 개선하고, 이를 TOPMODEL에 적용하여 모의 수문반응에 대한 영향을 분석하고 평가했다. 연구결과 무한 유향(Dinf) 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘을 이용할 경우, 기존 다중 유향(MD8) - 다중 경사(MDS) 알고리즘에 비해 토양수분의 공간적 분포에 보다 근접한 지형지수를 만들 수 있었다. 그러나 최종 유출구의 유출량 모의 효율은 향상되지 않았다. 이 결과는 분포형 환경연구 분야에서 적절한 유향 및 경사 알고리즘을 선택하는데 도움이 될 것이다.

주요어 : 토양수분, 포화역, TOPMODEL, 지형지수, 무한 유향, Horn 경사

Abstract : The TOPMODEL Topographic Index (TI) is widely used to predict the spatial distribution of soil moisture contents. The TI is one of terrain indices which are frequently used in spatially distributed environmental modelings. There have been studies on the evaluation and improvement of the TI. Most of them, however, have focused on only the modified multiple flow direction algorithm and algorithms for slope calculation have been paid little attention. In this research, we attempted to improve the TI by utilizing the infinitive flow direction (Dinf) algorithm and Horn slope algorithm. Then we attempt to analyze and evaluate the influence of the improved TI on hydrological responses of the TOPMODEL. As a result, our approaching using the infinitive flow direction (Dinf) and Horn slope algorithm made the TI better than the multiple flow direction (MD8) - the multiple descent slope (MDS) algorithm. However, the model efficiency of discharges at the outlet was not increased. Our research may provide an insight to choose appropriate algorithms for calculating flow direction and slope in spatially distributed environmental modelings.

Key Words : soil moisture, saturated area, TOPMODEL, topographic index, infinitive flow direction, Horn slope

* 논문의 요지는 2008년 한국지리학회 하계학술대회에서 발표하였다.

** 서울대학교 지리교육과 박사과정(Doctoral Student, Department of Geography Education, Seoul National University), cyberzen.hyun@gmail.com

*** 서울대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Seoul National University), kimjwk@snu.ac.kr

1. 서론

지표면의 토양수분은 다양한 지표체계(earth surface system)와 연계되어 있다. 토양수분은 식생의 성장 및 분포 뿐만 아니라 지표유출을 결정짓는다. 또한 지형적인 관점에서 볼 때 물질이동과 연계되어 지표면 변화의 중요한 전제 조건이 된다. 그뿐 아니라 토양수분은 토양형성과정과 연관되어 토양특성 자체에도 영향을 미친다. 토양수분이 지표체계에 미치는 영향이 이와 같이 크기 때문에, 토양수분의 공간적 분포를 파악하기 위한 시도가 활발하였다(Grayson *et al.*, 1997; Famiglietti *et al.*, 1998; Western *et al.*, 1999).

토양수분의 공간적 분포에 영향을 주는 요인들은 다양하지만, 그중에서도 지형은 일차적인 요인으로 간주된다. 그래서 수치고도모델(Digital Elevation Model, 이하 DEM)로부터 도출한 여러 지형 인자들(terrain indices)들은 토양수분의 공간적 분포를 파악하기 위한 중요한 도구로 인식되어 왔다. 특히 지형지수(topographic index)는 토양수분 함유량의 공간적 분포를 파악하고 예측하는데 폭넓게 사용된다(Sorensen *et al.*, 2006). 지형지수는 분포형(distributed) 수문모델인 TOPMODEL에서 단위 시간별 지하수면 깊이의 공간적 분포를 반영하기 위해 고안된 것으로, $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 으로 정의한다. 여기서 α 는 비기여면적(specific catchment area)이고, $\tan\beta$ 는 지표경사이다(Beven and Kirkby, 1979).

TOPMODEL에서 지형지수는 강우 시 토양수분이 포화되어 지표유출이 발생하는 포화역(saturated area)의 범위를 결정짓는 중요한 변수이다. 포화역의 범위는 TOPMODEL 유출량에 직접적인 영향을 주기 때문에, 유역의 실제 포화역 분포를 잘 나타낼 수 있도록 지형지수를 개선하는 노력이 있어왔다(Quinn, 1991; 김상현 · 이지영, 1999; 이지영 · 김상현, 2000). 이 밖에도 지형지수는 토양 특성 및 식생 분포와 토양 수분과의 상관관계를 규명하는 데에도 중요한 도구이기 때문에, 이것의 적절성을 평가하는 시도도 있어왔다(Dirnböck *et al.*, 2002; Güntner *et al.*, 2004; Sorensen *et al.*, 2006).

그러나 이상의 선행 연구들에서는 다음과 같은 몇 가지 한계점들이 발견된다. 첫째, 기존 연구에서는 유향 알고리즘을 이용한 개선 및 평가가 중심이었다. 이로 인해 지형지수의 또 다른 변수인 경사를 결정짓는 경사 알고리즘에 대한 평가가 상대적으로 부족했다. 둘째, 유향 알고리즘을 이용한 연구에서는 Holmgren (1994)의 수정된 다중 유향(Multiple Flow Direction, 이하 MD8) 알고리즘을 개선하는 시도가 대부분이었다. Holmgren(1994)은 곡에서 MD8 유향 알고리즘이 보이는 과도한 흐름 분산을 줄이기 위해, 흐름 분배에 가중치를 도입하였다. 그러나 이러한 개선에도 불구하고, MD8 유향 알고리즘에 기반한 흐름 경로(flow path)에서는 셀(cell)들 간의 흐름 교차가 여전히 크게 발생한다. 또한 흐름의 교차는 단지 흐름누가면적을 구할 때는 큰 문제가 되지 않지만, 용매 또는 퇴적물과 같은 고체의 흐름을 계산할 때는 문제가 되기도 한다(Seibert and McGlynn, 2007). 셋째, 기존 연구는 통계 분석 방법에 의존하였기 때문에 알고리즘 도입으로 인한 영향을 유역 단위에서 설명하는데 그쳤다. 따라서 유역 내 지형적 위치에 따라 달리 나타나는 영향에 대한 분석이 부족했다.

본 연구에서는 MD8 유향 알고리즘의 과도한 흐름 확산 문제를 해결하기 위해 고안된 Tarboton(1997)의 무한 유향(infinite flow direction, 이하 Dinf) 알고리즘과 미분기하(differential geometry)에 기초한 Horn 경사 알고리즘(Horn, 1981)을 이용하여, 이들 알고리즘의 도입이 TOPMODEL 지형지수와 모의 수문반응에 미치는 영향을 공간적으로 분석하고 이의 적절성을 평가하였다. 이를 위해 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입이 지형지수에 미치는 영향을 각각 분석하였으며, 이후 개선된 지형지수를 TOPMODEL에 적용하여 모의 수문반응 결과를 분석하고 평가하였다.

2. 연구의 이론적 배경

1) 무한 유향 알고리즘과 흐름 분배

유향(flow direction)은 수분, 풍화물질, 퇴적물 등의 지표물질이 중력에 의해 이동되는 방향을 의미한다. 격자 DEM에서는 임의의 한 셀에서 흐름이 분배되는 이웃 셀로의 방향을 가리킨다. 흐름이 분배되는 이웃 셀의 개수에 따라, 단일 유향(single flow direction)과 다 유향(multiple flow direction)으로 크게 구분된다.¹⁾

단일 유향 알고리즘인 D8(O'Callaghan and Mark, 1984)은 8 개 이웃 셀과의 경사를 계산하여, 하부방향으로 최대 경사를 가지는 하나의 이웃 셀로 유향을 결정한다. 따라서 유향은 8 방향으로 제한되고, 유향을 따라 최대 경사를 가지는 하나의 이웃 셀로 흐름이 모두 분배된다(그림 1의 b). 다 유향 알고리즘의 하나인 MD8(Quinn *et al.*, 1991)은 8 개 이웃 셀과의 경사를 계산하여, 하부방향으로 경사를 가지는 모든 이웃 셀

로 유향을 결정한다. 따라서 D8과 같이 유향은 8 방향으로 제한되지만, 1 개에서 최대 8 개의 이웃 셀로 흐름이 분배된다. 각 셀로 분배되는 흐름 비율은 경사에 비례하기 때문에, 경사가 큰 이웃 셀로 흐름이 더 많이 분배된다(그림 1의 c). 8 개 이웃 셀 중 비고가 낮은 이웃 셀의 수가 n 개인 경우, i 번째 이웃 셀로 분배되는 흐름 비율(F_i)은 다음과 같다.

$$F_i = \frac{L_i \tan \beta_i}{\sum_{j=1}^n L_j \tan \beta_j} \quad (\tan \beta_i > 0, n \leq 8) \quad (1)$$

L_i : 유폭, $\tan \beta_i$: i 번째 이웃 셀과의 경사

MD8 유향 알고리즘을 개선한 Dinf(Tarboton, 1997)는 흐름 분배를 최대 2 개의 이웃 셀로 제한한다. Dinf 유향 알고리즘에서는 인접한 두 이웃 셀을 잇는 삼각면(triangular facet)을 만들고, 삼각면의 벡터를 구하여 이의 크기와 방향을 구한다. 그리고 총 8 개의 벡터 중 크기가 가장 큰 벡터의 방향을 유향으로 결정한다. 이로 인해 유향이 8 방향으로 제한되는 D8 및 MD8과 달리, Dinf에서는 유향이 0~360° 사이의 연속

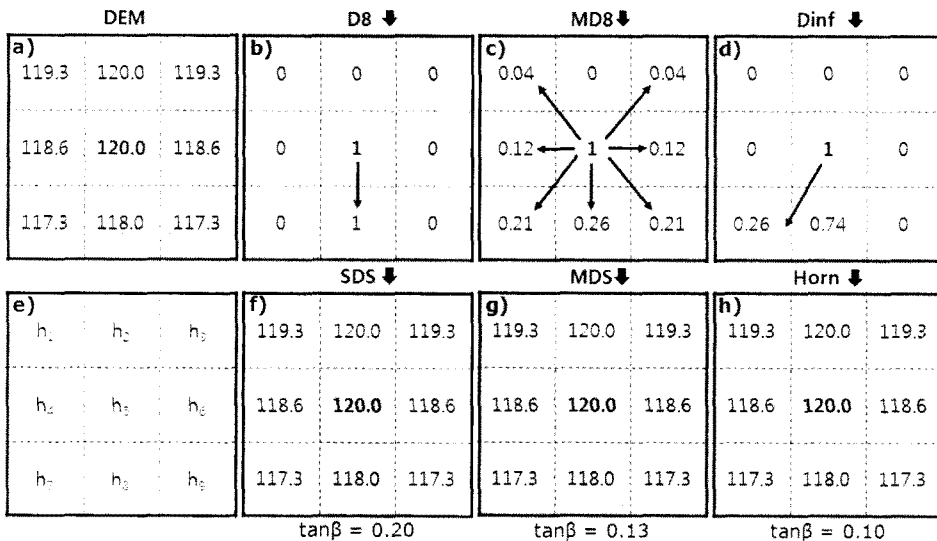


그림 1. 유향 알고리즘별 흐름 분배율과 경사 알고리즘별 경사($\tan \beta$)

a는 고도, 실선은 등고선임. b, c, d는 D8, MD8, Dinf로 구한 흐름 분배율. 화살표는 유향을 가리킴. f, g, h의 회색 셀은 경사를 구하는데 이용된 이웃 셀. e는 수식 1, 5에 이용되는 이웃 셀 명칭을 보여줌. Seibert and McGlynn(2007)의 Figure 3을 수정함

적인 값으로 표현된다. 유향이 결정되면, 유향이 삼각면의 두 이웃 셀 중에 어느 셀에 가까운가에 따라 각 이웃 셀로의 흐름 분배율이 결정된다(그림 1의 d). 따라서 비고가 낮은 모든 이웃 셀로 흐름이 분배되어, 과도한 흐름 분산이 발생하는 MD8의 한계점(그림 1의 c)은 나타나지 않는다.

2) Horn 경사 알고리즘

경사는 지표물질의 이동 및 이동 속도에 영향을 미치는 중력 에너지의 크기를 지시한다. 격자 DEM에서 경사를 구하는 알고리즘은, 크게 삼각법(trigonometry)과 미분기하(differential geometry)에 기초한 것으로 나뉜다(Warren *et al.*, 2004). 미분기하에 기초한 것은 연산에 포함되는 이웃 셀의 개수와 특정 셀들에 주어지는 가중치에 따라 다시 세분된다(Jones, 1998). 대체로 삼각법에 기초한 경사 알고리즘은 비고가 낮은 이웃 셀들만을 연산에 포함하는데 반해, 미분기하에 기초한 것은 연산에 포함되는 이웃 셀들의 비고를 고려하지 않는다.

삼각법에 기초한 최대경사(Steepest Descent Slope, 이하 SDS) 알고리즘은, 이웃 셀과의 고도차를 이들 간의 거리로 나누어 각각의 경사를 구하고, 이들 중에 가장 큰 값을 경사로 정의한다(그림 1의 f). Quinn *et al.*(1991)이 제안한 다중 경사(Multiple Descent Slope, 이하 MDS) 알고리즘도 삼각법에 기초한 것으로, 비고가 낮은 모든 이웃 셀들과의 경사를 평균하고 이를 경사로 정의한다(수식 2, 그림 1의 g).

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \tan\beta_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (\tan\beta_i > 0, n \leq 8) \quad (2)$$

L_i : 유폭, $\tan\beta_i$: i 번째 이웃 셀과의 경사

미분기하에 기초한 Horn 경사 알고리즘(Horn, 1981)은 지표물 고도 값으로 구성된 스칼라 함수($z = f(x, y)$)로 간주한다. 따라서 임의의 한 지점(x, y)에서의 경사는, 고도(z)를 x (동서 방향)와 y (남북 방향)로 각각 편미분한 구배 벡터(gradient vector) 크기의 합

으로 표현된다(수식 3). x 와 y 의 편도함수 f_x, f_y 의 해는 유한차분법(finite difference method)을 이용하여 수치적으로 구한다(수식 4, 수식 5).

$$\tan\beta = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (3)$$

$$f_x = \frac{b_3 - b_1 + 2(b_6 - b_4) + b_9 - b_7}{8\Delta d} \quad (4)$$

$$f_y = \frac{b_7 - b_1 + 2(b_8 - b_2) + b_9 - b_3}{8\Delta d} \quad (5)$$

Δd : 셀간 거리, h : 이웃 셀 고도(그림 1의 e) 참고

3) TOPMODEL과 지형지수

TOPMODEL은 가변기여면적(variable source area)의 개념을 도입하여, 사면유출(hillslope runoff)시 일어나는 지표유출과 기저유출을 설명하는 수문모델이다. 특히 유역의 지형적 특성을 모델 내에 반영하고, 이를 이용하여 유역의 수문학적 거동을 예측한다. 사면유출 과정을 상당히 간략화시킨 TOPMODEL의 함수 구조는 다음의 세 가지 가정에 근거하고 있다. (1) 유역 내 포화역(saturated area)의 움직임은 정상상태(steady state)를 가정한다. 이 가정은 지형지수($\ln(\alpha/\tan\beta)$)를 이용하여 단위 시간별 지하수면 깊이의 공간적 분포를 표현 가능하게 한다. (2) 포화역의 수리적 경사는 지표 경사를 따른다고 가정한다. 이 가정은 지하수면의 동수경사를 지표 경사($\tan\beta$)로 표현 가능하게 한다. (3) 사면 하부로의 수리전도도(downslope transmissivity)는 지표면으로부터 지수함수적으로 감소한다고 가정한다.

이상 3 가지 가정에 근거하여 수식을 전개하면 TOPMODEL의 지배 방정식을 얻게 된다(수식 6). 여기서 z_n 는 임의의 지점에서 지하수면 깊이, \bar{z} 는 유역의 평균 지하수면 깊이, λ 는 유역 내 지형지수의 평균값, 그리고 f 는 수리전도도 변화율을 의미한다. 지배 방정식(수식 6)에 따르면, 임의의 지점에서 지하수면의 깊이는 유역의 평균 지하수면 깊이, 그리고 유역 내 지형지수 평균과 임의의 지점에서 지형지수와 차에 의해 결정된다. 따라서 특정 지점에서 지형지수가 클 경우에, 지하수면의 깊이가 얕아져서 강우 시 포화에 의한

지표유출 발생 가능성이 커진다. 이와 같이 지형지수는 지표유출을 유발하는 포화역의 발달과 직접적인 관련이 있다(Beven *et al.*, 1995; 김상현, 1999; 이지영 · 김상현, 2000).

$$z_r = \bar{z} + \frac{1}{f} \cdot \left[\lambda - \ln \left(\frac{a_i}{\tan \beta_i} \right) \right] \quad (6)$$

TOPMODEL은 분포형(distributed) 지형지수를 유출량 계산 과정에서 통합형(lumped)으로 전환한다. 즉, 지형지수의 공간적 분포가 통계적 분포로 바뀌어 계산에 이용된다. 이는 지형지수가 유사한 지역은 수문반응이 같을 것으로 가정하기 때문이다. 이로 인해 지형지수의 통계적 분포에서 얻은 지형지수의 대표값을 이용해 단위 시간별 지하수면 깊이 및 지표유출 등을 계산하는 것이다(Beven and Kirkby, 1979; 김상현 · 김경현, 1999). 하지만 본 연구에서는 Dinf 유형 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입이 최종 유출

구의 모의 유출량뿐만 아니라, 모의 포화부족량(local storage deficit)의 공간적 분포에 미치는 영향까지도 분석하기 위해, 지형지수의 공간적 분포를 유출량 계산에서 그대로 사용할 수 있도록 모델 구조를 수정하였다. 이는 단위 시간별 수문반응이 각각의 셀 단위에서 계산된다는 것을 의미한다.

3. 연구지역 및 연구방법

1) 연구지역

연구지역으로는 평창강의 지류인 속사천 상류 유역을 선정하였다(그림 2). 평창강 유역은 국제수문개발계획(International Hydrological Programme, IHP)의 대표 유역 중 하나이기 때문에 강우 및 수위 자료 확보가 용이하다.²⁾ 연구지역은 평창군 용평면에 포함되며, 북

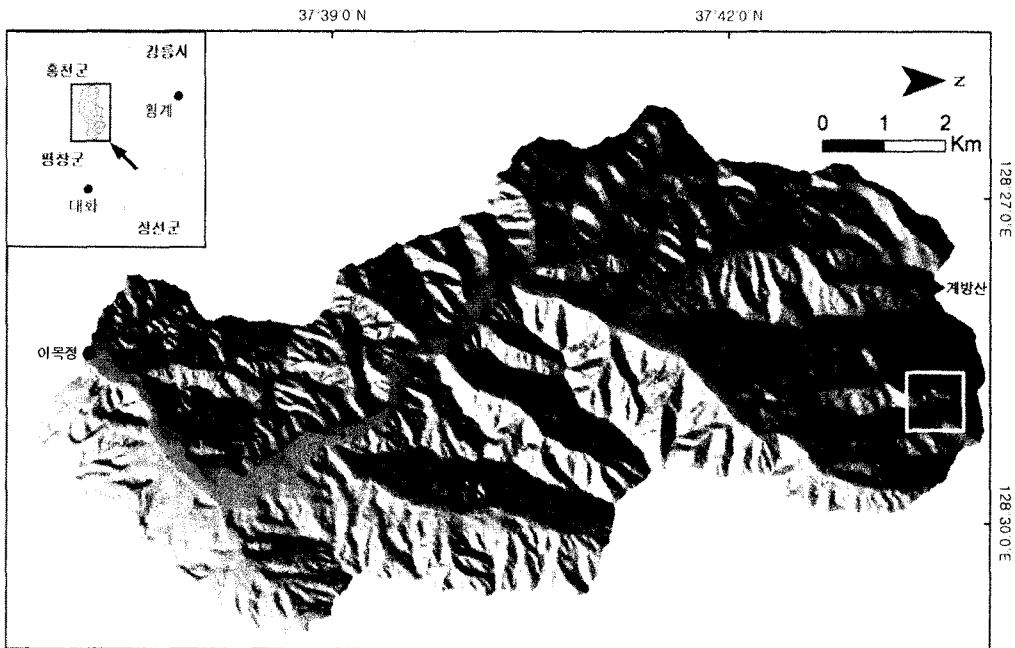


그림 2. 연구지역(속사천 상류 유역) 음영기복도

●: 이목정 수위관측소, ■: 계방 우량관측소, □는 그림 4, 5에서 다루는 곳임.

쪽으로는 홍천군 내면과 접해 있다. 유역 면적은 약 57km²이고, 최고 고도는 약 1,574m(계방산) 최저고도는 591m(이목정 수위 관측소)로 이들간의 고도차이는 약 983m이다. 유역의 지질은 상류부가 선캠브리아기 혼성 호상 편마암으로, 하류부는 주라기 각섬석 흑운모 화강암으로 이루어져 있다.

2) 연구방법

TOPMODEL 지형지수를 구하는데 필수적인 DEM 자료는 국토지리정보원에서 발행한 1:25,000 수치지형도를 이용하여 제작하였다. 이용 전에 ArcGIS의 Topology 검사 및 수정을 거쳐 수치지형도 자체의 오류를 제거하였다. 이후 수정된 수치지형도를 ArcGIS의 'Create TIN', 'TIN to Raster' 그리고 'fill sink' 과정에 적용하였고, 이를 통해 10m 해상도를 가진 격자 DEM을 제작하였다.

제작된 DEM에 D8, MD8, Dinf 유향 알고리즘과 SDS, MDS, Horn 경사 알고리즘을 이용하여, 각각의 지형지수를 계산하였고 이들을 분석하였다. 이후 각각

의 지형지수를 TOPMODEL에 적용하여 모의 수문반응 결과(모의 유출량과 최대기여면적시 포화부족량 분포 등)를 얻었고, 이에 대한 분석 및 평가를 했다. 모의 포화부족량의 공간적 분포에 대한 평가를 위해서 50cm급 해상도를 가진 인터넷 포털 '다음'의 항공사진을 이용하였다. 항공사진에서는 유역의 수변 식생 분포를 파악하였고, 이를 유향·경사 알고리즘별 모의 포화부족량 분포와 비교하였다. 또한 지형적 위치에 따라 달리 나타나는 영향을 파악하기 위해, 지형단면 구간을 설정하고 이를 따라 지형지수 및 모의 수문반응 결과를 분석하였다.

4. 연구결과

1) 지형지수에 미치는 영향

지형지수는 비기여면적을 경사로 나누고, 이에 자연로그를 취한 것이다. 여기서 비기여면적은 유향 알고

표 1. 유향·경사 알고리즘별 지형지수 평균

	SDS	MDS	Horn
D8	5.52	5.92	5.41
MD8	5.92	6.33	5.77
Dinf	5.71	6.12	5.56

표 2. 유향 알고리즘별 상부사면 기여면적 기본 통계

	최소	최대	평균	표준편차
D8	4.61	17.85	6.57	1.77
MD8	4.61	17.85	7.23	1.74
Dinf	4.61	17.85	6.83	1.70

주) 상부사면 기여면적은 자연로그를 취한 값임.

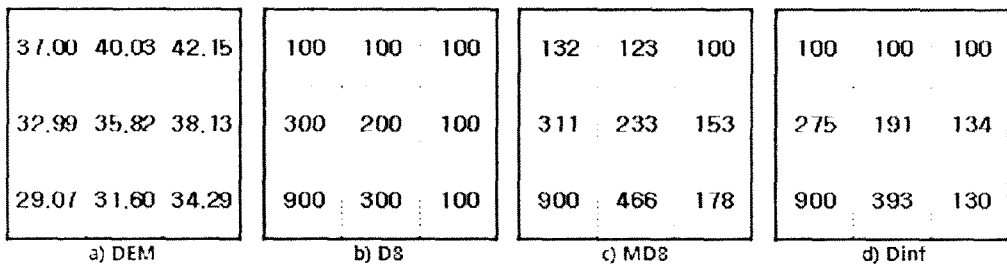


그림 3. 유향 알고리즘별 상부사면 기여면적

a는 상부사면 기여면적을 구하는데 사용된 DEM으로, 셀 크기는 10m임. b, c, d 모두 유출구에서 동일한 상부사면 기여면적(900m²)을 가지지만, MD8의 상부사면 기여면적은 모든 셀에서 전반적으로 크다.

리듬에 따라, 경사는 경사 알고리즘에 따라 달라진다. 따라서 Dinf 유향 알고리즘이 지형지수에 미치는 영향과 Horn 경사 알고리즘이 지형지수에 미치는 영향으로 나누어 연구결과를 기술한다.

(1) 무한 유향 알고리즘의 도입이 지형지수에 미치는 영향

무한 유향(Dinf) 알고리즘의 도입은 MD8에 비해 전반적으로 지형지수 값을 감소시켰다(표 1). 이는 비 기여면적을 결정짓는 상부사면 기여면적(upslope contributing area)이 Dinf 유향 알고리즘을 이용할 경우 MD8에 비해 작기 때문이다(표 2). 격자 DEM으로 상부사면 기여면적을 구하는 일반적인 방법은 다음과 같다. 먼저 DEM에서 고도가 가장 높은 셀을 찾고, 유

향 알고리즘에 따라 이웃 셀로 흐름 분배를 한다. 이를 마치면 다음으로 높은 셀을 찾고, 이웃 셀로 흐름 분배를 한다. 이 같은 과정을 고도가 가장 낮은 셀까지 차례차례 반복하게 되면, 최종적으로 상부사면 기여면적을 얻게 된다(그림 3). 여기서 비고가 낮은 모든 이웃 셀로 흐름을 분배하는 MD8 유향 알고리즘에 비해, Dinf는 최대 2개의 이웃 셀로만 흐름을 한정하여 분배한다. 따라서 연속적인 흐름 분배의 결과로 Dinf 유향 알고리즘이 MD8보다 전체적으로 상부사면 기여면적이 작다. 그리고 D8 유향 알고리즘은 비고가 가장 낮은 하나의 이웃 셀로만 흐름을 분배하기 때문에 상부사면 기여면적이 가장 작다(표 2).

Dinf 유향 알고리즘의 도입으로 인해, 지형지수가 가장 두드러진 차이를 보이는 곳은 흐름이 수렴되는

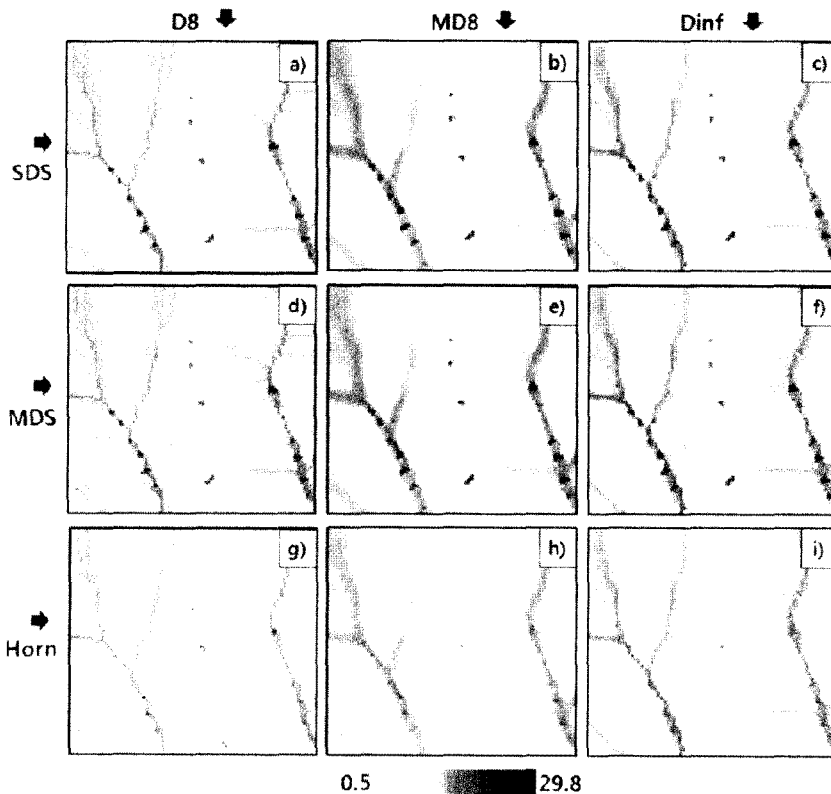


그림 4. 유향·경사 알고리즘별 지형지수

그림 2의 □ 지역으로 그림 5와 동일 지역. Dinf를 이용할 경우, 곡저에서의 폭이 좁아짐. Horn을 이용할 경우, 능선 및 곡저의 평탄면 일대에 있는 짙은 검은 색 셀(지형지수가 비정상적으로 높은 셀)들이 줄어들고, 곡저에서의 폭도 좁아짐.

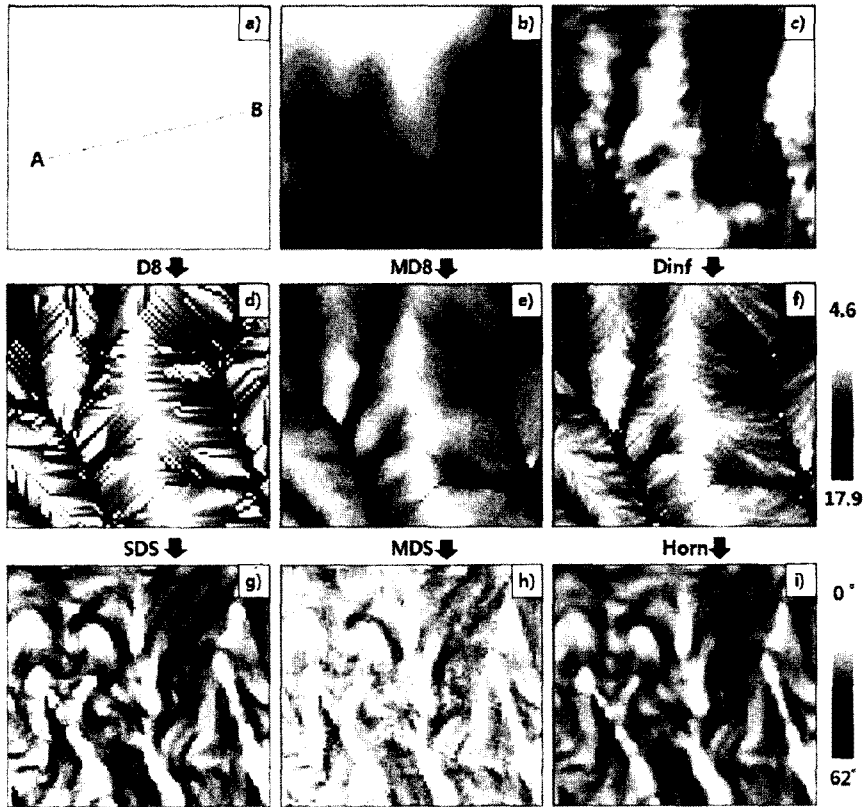


그림 5. 알고리즘별 상부사면 기여면적과 경사

그림 2의 □ 지역으로 그림 4와 동일 지역. a는 지형도. 구간 AB는 그림 6, 8에서도 사용됨. b는 a의 격자 DEM, c는 b의 음영기복도. d, e, f는 b의 상부사면 기여면적(자연로그를 취한 값)이고, 각각 D8, MD8, Dinf를 이용하여 구함. g, h, i는 각각 SDS, MDS, Horn을 이용하여 구한 b의 경사임.

요형 사면 또는 꼭저이다(그림 4). MD8 유향 알고리즘은 사면 상부에서부터 비고가 낮은 모든 이웃 셀로 흐름을 분배해왔기 때문에, 요형 사면 또는 꼭저에서 Dinf보다 상부사면 기여면적이 대체로 크다. 그리고 요형 사면 또는 꼭저에서도 MD8 유향 알고리즘은 Dinf보다 많은 이웃 셀로 흐름 분배를 하기 때문에, 상부사면 기여면적이 크면서 폭도 넓다(그림 5의 e, f, 그림 6의 c). 따라서 Dinf 유향 알고리즘을 도입한 지형지수는 MD8에 비해 요형 사면 또는 꼭저에서 상대적으로 값이 작고, 폭이 좁다(그림 6의 d, f).

Dinf 유향 알고리즘이 MD8에 비해 흐름 분배되는 이웃 셀의 개수가 적기 때문에 지형지수의 공간적 분포가 다소 거칠지만, D8만큼 단속적이지는 않았다(그

림 4). D8 유향 알고리즘의 경우 비고가 가장 낮은 하나의 이웃 셀로만 흐름 분배가 일어나기 때문에, 나머지 이웃 셀로는 흐름 분배가 전혀 일어나지 않는다. 따라서 D8 유향 알고리즘을 이용한 지형지수는, 인접 셀이라도 값의 차이가 크고 이로 인해 가장 거칠고 단속적인 공간적 분포를 보였다.

(2) Horn 경사 알고리즘의 도입이 지형지수에 미치는 영향

Horn 경사 알고리즘의 도입은 MDS에 비해 전반적으로 지형지수 값을 감소시켰다(표 1). 이는 Horn 경사 알고리즘을 이용한 경사가 MDS를 이용한 경사보다 전체적으로 높기 때문이다(표 3, 그림 5의 h, i). MDS 경

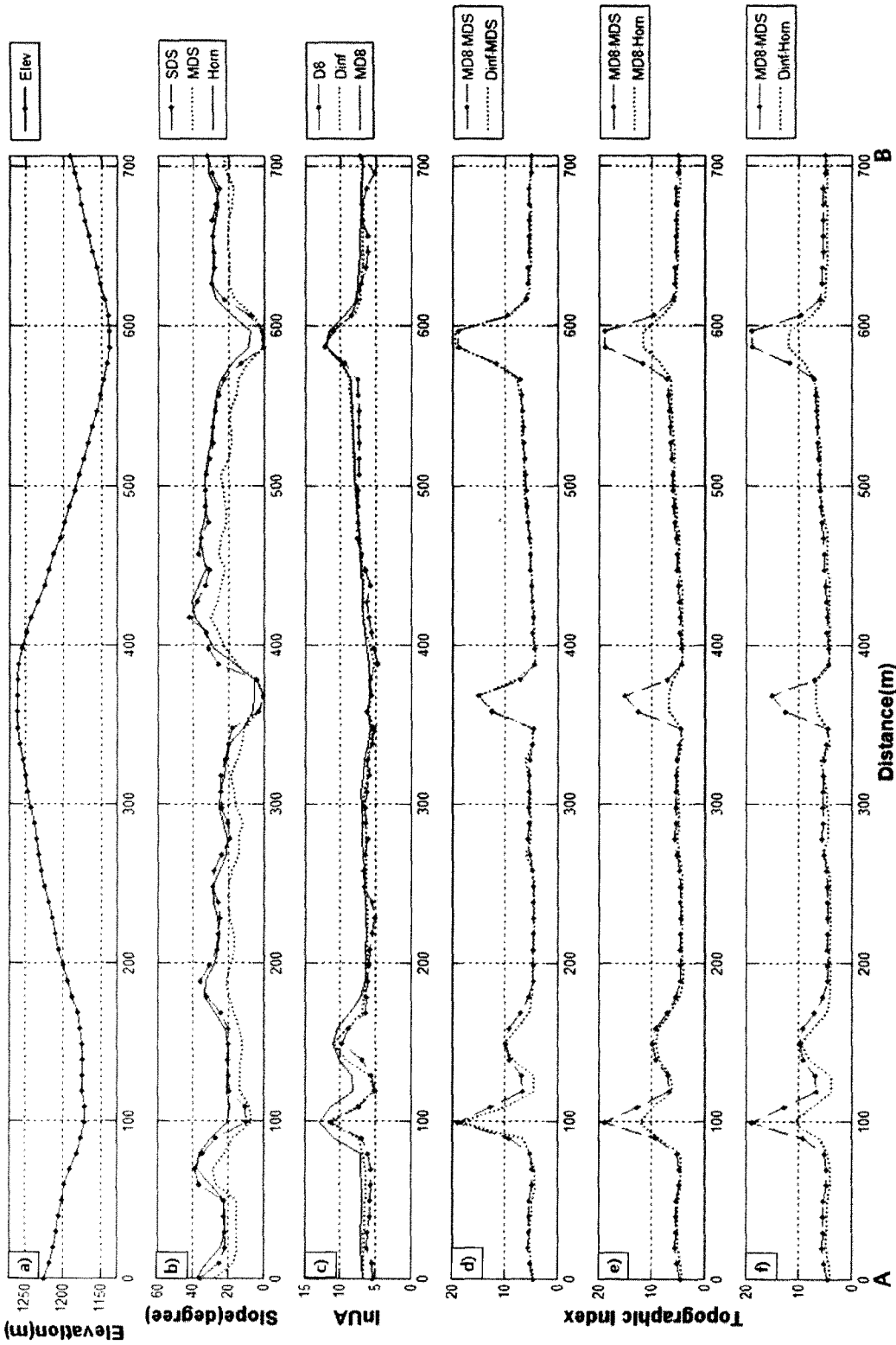


그림 6. 지형면상의 고도, 경사, 상부사면 기여면적과 지형지수

a는 그림 5의 a에서 AB구간 고도, b는 그림 5의 상부사면 기여면적(d, e, f)에서, c는 그림 5의 경사(g, h, i)에서, d는 그림 4의 지형지수(e, f)에서, e는 그림 4의 지형지수(c, h)에서, f는 그림 4의 지형지수(c, i)에서 AB구간을 따라 추출한.

표 3. 경사 알고리즘별 경사의 기본 통계 (단위: 도)

	최소	최대	평균	표준편차
SDS	0	61.51	22.08	9.82
MDS	0	55.79	15.08	7.09
Horn	0	58.36	22.38	9.32

사 알고리즘이 유독 낮은 이유는, 8 개의 이웃 셀 중 낮은 이웃 셀들만 연산에 포함시키며, 또한 낮은 이웃 셀들과의 개별 경사를 평균한 값으로 대표값을 취하기 때문이다(수식 2). 이에 반해 Horn 경사 알고리즘은 높낮이에 상관없이 8 개의 이웃 셀들을 모두 연산에 포함시키기 때문에(수식 4, 5) 대체로 경사값이 높다. 따라서 Horn 경사 알고리즘을 도입할 경우, 지형지수의 분포에 해당하는 경사가 대체로 높아져서 지형지수는 반대로 낮아지는 효과가 발생한다.

Horn 경사 알고리즘의 도입으로 인해, 지형지수의 공간적 분포가 두드러지게 차이를 보이는 곳은 곡저와 배후 사면과의 연결부 그리고 능선 및 곡저의 평탄면(flat areas) 일대이다(그림 4, 그림 6의 e). 우선 곡저와 배후 사면과의 연결부에서는, Horn 경사 알고리즘을 이용할 경우 지형지수 값이 MDS에 비해 작아졌다. 곡저와 배후 사면과의 연결부에 위치하는 셀들은, 배후 사면 방향으로 비고가 높은 이웃 셀에서 곡저 방향으로 비고가 낮은 이웃 셀로 연결되어 있다. 이 경우 MDS 경사 알고리즘은 곡저 방향의 비고가 낮은 이웃 셀만을 이용하여 경사를 구하지만, Horn은 곡저 방향의 낮은 이웃 셀 뿐만 아니라 사면 방향의 높은 이웃 셀을 모두 이용하여 경사를 구한다. 이로 인해 곡저와 배후 사면 연결부에서는, Horn 경사 알고리즘을 이용하여 구한 경사가 MDS에 비해 대체로 높다(그림 6의 b). 특히 배후 사면 방향의 이웃 셀과 비고차가 크면 클수록 Horn과 MDS의 경사 차이는 더욱 커진다. 따라서 곡저와 배후 사면과의 연결부에서는, Horn 경사 알고리즘을 도입할 경우 MDS에 비해 지형지수 값이 작아지는 효과가 발생한다.

한편 능선 및 곡저의 평탄면 일대에서는, Horn 경사 알고리즘을 도입한 경우 지형지수가 비정상적으로

높은 셀들이 줄어들었다(그림 4, 그림 6의 e). TIN을 이용한 DEM 생성 시 비고가 동일한 셀들이 연속하여 나타나는 평탄면(flat areas)은 DEM의 흔한 오류(Marich *et al.*, 2005) 중의 하나인데, 주로 넓은 곡저 또는 능선에서 비교적 잘 나타난다. 자연에서는 평탄면이라도 구배가 전혀 없는 것이 불가능하지만, 격자 DEM에서는 비고가 동일한 것으로 표현되기 때문에, 구배가 전혀 없는 것으로 나타난다. 이런 경우 평탄면 인접 셀은 이웃 셀들과의 비고가 적어도 같거나 높다. 따라서 비고가 낮은 이웃 셀들만을 연산에 이용하는 MDS 경사 알고리즘의 경사값은 0 인 반면, 이웃 셀 모두를 연산에 이용하는 Horn의 경사값은 0 보다 크게 된다. 이로 인해 Horn 경사 알고리즘을 이용하여 지형지수를 구할 경우, MDS에 비해 지형지수가 비정상적으로 높은 셀들이 줄어드는 효과가 발생한다.

2) 모의 수문반응에 미치는 영향

Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입이 TOPMODEL 모의 수문반응에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 강우 사상을 적용하고 이에 대한 모의 수문반응 결과를 얻었다. 모의 수문반응을 구하는 과정에서는 지형지수의 통계적 분포를 이용하지 않고, 공간적 분포를 그대로 사용하였다. 즉 지형지수 격자의 각 셀마다 포화부족량과 지표유출량 및 기저유출량을 계산하였다. 이는 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입을 통해 최종 유출구에서의 유출량뿐만 아니라 포화부족량의 공간적 분포에 미치는 영향까지도 파악하기 위해서이다. 적용 과정에서 가장 단순적인 지형지수 분포를 보였던 D8 유향 알고리즘, 그리고 MDS 경사 알고리즘과 동일하게 삼각법에 기초한 SDS 경사 알고리즘은 제외하였다. 결국 총 4 개의 지형지수를 TOPMODEL에 적용하였고, 각각의 지형지수는 MD8 · MDS, Dinf · MDS, MD8 · Horn, Dinf · Horn 유향 · 경사 알고리즘을 이용하여 구하였다.

(1) 모의 유출량에 미치는 영향

각각의 지형지수에 대한 유출량 계산 과정은 다음과 같다. 우선 MD8 · MDS 유향 · 경사 알고리즘을 이

무한 유량 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘이 TOPMODEL 지형지수와 수문반응에 미치는 영향

표 4. 유량·경사 알고리즘별 TOPMODEL 모의 유출량

단위: %(주요 변수값 제외)

(유량·경사) 알고리즘	모의효율	최대기여면적	지표유출	기저유출	주요 변수값	
① MD8·MDS	72.1	15	9.3	90.7	M=0.016/T0=8.0	
보정 전 ② Dinf·MDS	72.1	13.7	8.6	91.4		
③ MD8·Horn	71.2	12.7	7.6	92.4		
④ Dinf·Horn	70.3	11.3	7.0	90.8		
보정 후	② Dinf·MDS	72.1	14.5	9.0	91.0	M=0.016/T0=0.6
	③ MD8·Horn	72.0	15.3	9.2	90.8	M=0.016/T0=0.2
	④ Dinf·Horn	72.0	11.3	8.8	91.2	M=0.016/T0=0.0

주) 지표유출 및 기저유출은 최대기여면적 시 유출량임. 주요 변수 중 M은 토양 수리전도도 감쇠율을, T0는 포화 시 토양전도도를 나타냄.

용한 지형지수로 강우-유출량 계산을 시도하였다. 1989년 8월 21일 강우 사상에 대해서, 시행착오법을 통해 모의 효율이 가장 높은 유출량과 매개변수 집합을 구할 수 있었다. 이후 이 매개변수 집합을 다른 지

형지수들의 유출량 계산에도 동일하게 적용하여 모의 유출량을 구하였다. 그리고 이들 지형지수 각각에 대해서도, 시행착오법을 통해 모의 효율이 가장 높은 유출량과 매개변수 집합을 구하였다(표 4).

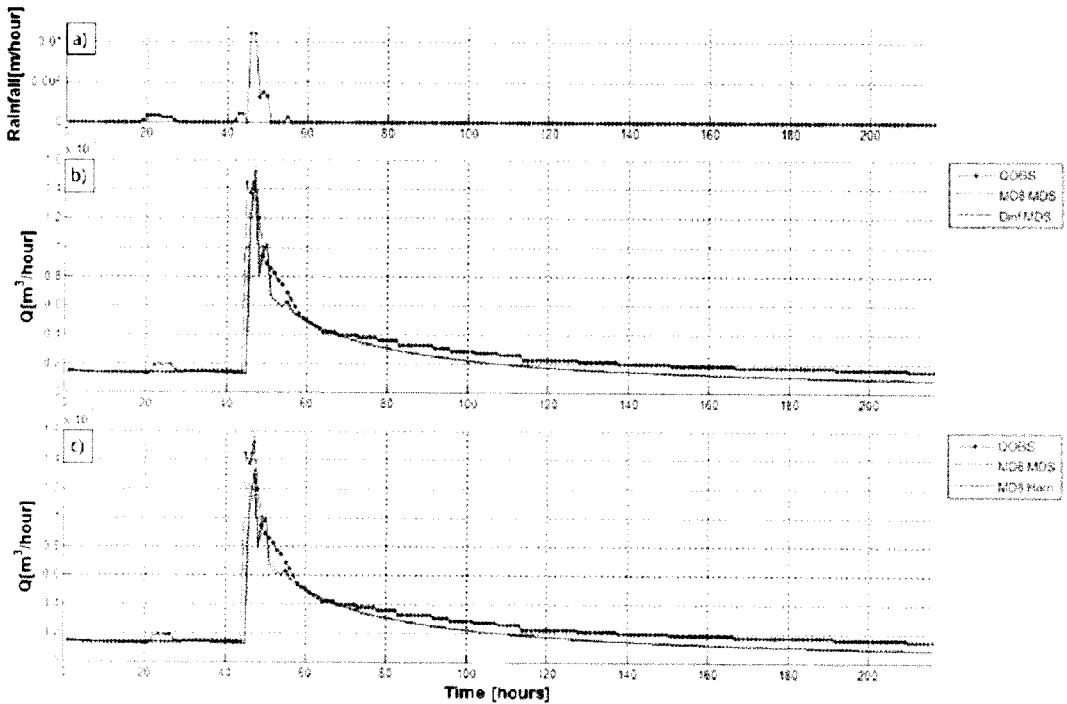


그림 7. 유량·경사 알고리즘별 강우-모의 유출량

a 강우량, b와 c 모두 매개변수 보정 전 모의 유출량, b는 Dinf를 도입하였고, c는 Horn을 도입함. QOBS는 관측치, 모든 유량·경사 알고리즘들이 유출 사상을 잘 묘사하는 것으로 나타남.

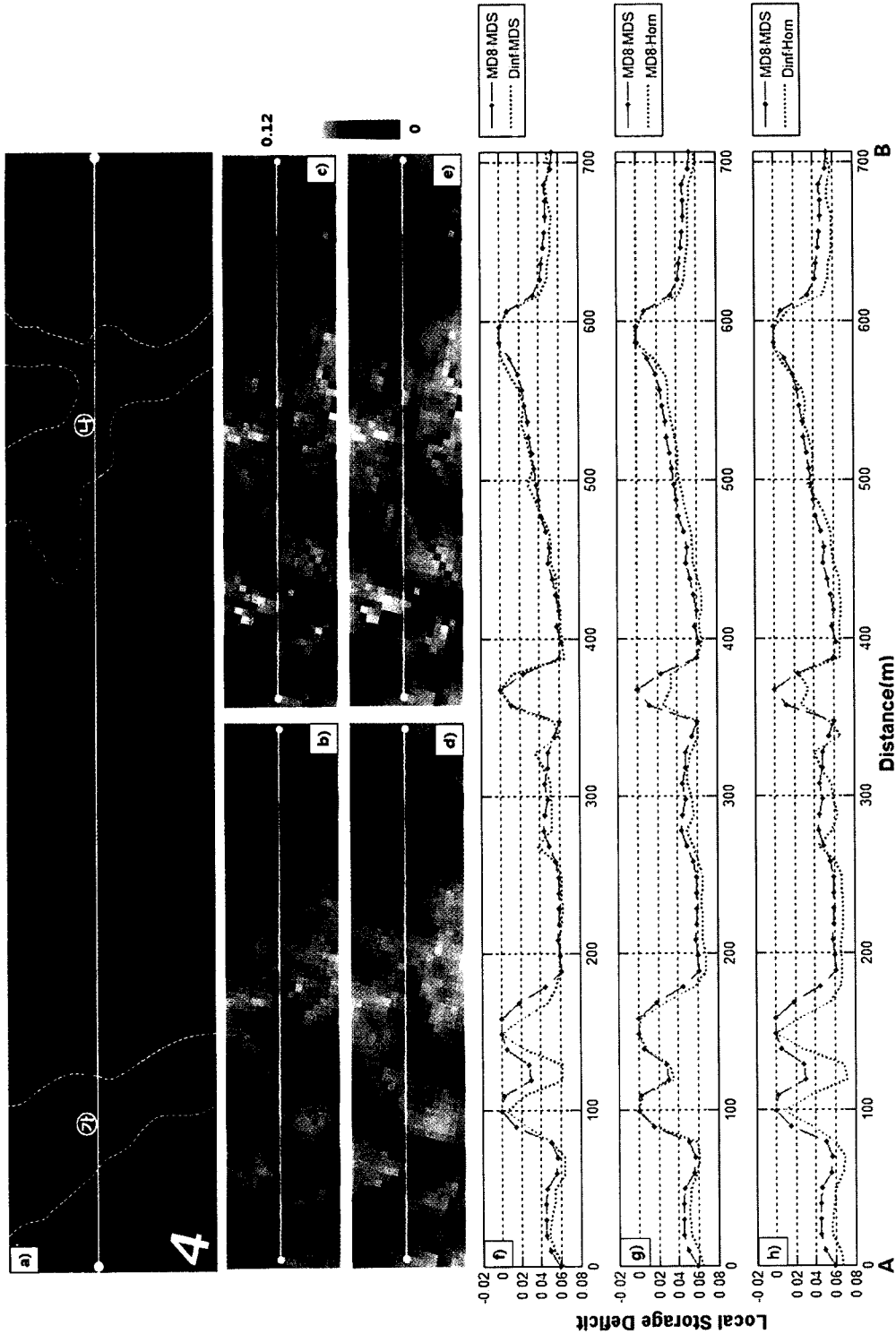


그림 8. 항공사진 및 포화부족량 분포 그리고 지형단면상의 포화부족량

a는 항공사진, '...' 인은 수변 식생이고 '4' 는 북을 가리킨다. b는 MD8 · MDS, c는 Dinf · MDS, d는 MD8 · Hom, e는 Dinf · Hom을 이용한 최대기여면적 시 포화부족량 분포, f는 b와 c에서, g는 b와 d에서, h는 b와 e에서 지형단면을 따라 추출한 포화부족량. 포화부족량이 0 인 경우는 포화역임. 지형단면은 그림 5의 a의 AB 구간임.

Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘 도입이 모의 유출량에 미치는 영향을 분석해보면, 모의 효율에서는 큰 차이가 없지만 최대기여면적과 최대기여면적 시 지표유출량 및 기저유출량에는 유효한 차이를 보였다. 우선 매개변수 보정 전인 Dinf · MDS, MD8 · Horn, Dinf · Horn 각각의 모의 효율은 MD8 · MDS에 비해 조금 낮거나 동일했다. 매개변수 보정 후에는 각각의 모의 효율이 조금씩 증가하여 MD8 · MDS와 대체로 유사한 결과를 보였지만 높지는 않았다.

그러나 최대기여면적과 최대기여면적 시 지표유출량은 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘 도입으로 인해 대체로 감소하는 경향이 나타났다. Dinf 유향 알고리즘을 도입한 Dinf · MDS의 경우, MD8 · MDS에 비해 최대기여면적 비율이 보정 전에는 1.3%, 보정 후에는 0.5%가 각각 줄어들었다. 그리고 지표유출량도 보정 전에는 0.7%, 보정 후에는 0.3%가 각각 낮아졌다. Horn 경사 알고리즘을 도입한 MD8 · Horn의 경우, 최대기여면적 비율이 보정 전에는 2.3% 감소했고, 보정 후에는 0.3% 증가했지만, 지표유출량은 보정 전 1.7%, 보정 후 0.1%씩 모두 감소했다. 이 같은 결과는 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘을 도입하면서 유역의 지형지수 값이 전반적으로 감소했기 때문이다. 지형지수의 감소는 지하수면의 깊이를 깊게하여 강우 시 포화에 의한 지표유출 발생 가능성도 낮아진다.

(2) 모의 포화부족량의 공간적 분포에 미치는 영향

환경부에서 발행한 생태자연도(노동 도엽)를 참고하면, 그림 2의 □일대는 신갈나무-전나무 식물군락을 이룬다. 지형단면 구간을 촬영한 항공사진(그림 8의 a)에서는 전나무로 추정되는 상록 교목수가 간간히 보이는 가운데, 신갈나무로 추정되는 낙엽활엽수가 사면 전역에 분포한다. 그러나 요형 사면 또는 곡저를 따라 길게, 주변 사면 식생과 차이를 보이는 식생이 분포하는데, 이는 어렵지 않게 수변 식생임을 알 수 있다. 여기서는 이를 토양수분의 공간적 분포를 지시한다고 가정하고, 알고리즘 도입의 적절성을 평가하였다.

우선 항공사진에서 수변 식생이 분포하는 ㉗와 ㉘ 지역의 경계 지점을, 지형단면상의 포화부족량(그림 8

의 f, g, h)과 대비하였다. 먼저 지형단면상의 ㉘ 지역을 보면 좌측 경계에 대비되는 포화부족량이 약 0.04m 인데 반해, 우측 경계는 0m로 포화역에 가까웠다. 포화부족량의 이 같은 차이는 사면의 향(slope aspect)과 관련된 것으로 추정된다. 향에 따라 일사량은 큰 차이를 보이며, 이는 증발산량에도 영향을 준다. 그래서 사면이 어느 방향인가에 따라, 토양수분 함유량은 큰 차이를 보인다. 향에 따른 수분 함유량의 차이는 식생 분포에도 반영되어, 수분을 선호하는 식생은 보다 북향 사면에 위치하기도 한다(Isard, 1986). 또한 이 일대는 적설량이 많고, 봄이 되어서도 북사면에는 눈이 남아 있어서, 향에 따른 영향이 더욱 클 것으로 예상된다.³⁾ 따라서 북동쪽 사면에 해당하는 ㉘ 지역의 좌측은 포화부족량이 포화역에 가깝지 않더라도, 사면 향에 기인한 토양수분의 공급으로 인해 수변 식생이 분포하는 것으로 판단된다. 같은 이유로 ㉗ 지역 좌측도 포화부족량이 크지만, 수변 식생이 분포할 수 있었던 것으로 판단된다. 따라서 향에 기인한 차이를 고려한다면, ㉗, ㉘ 지역 모두 곡저를 기준으로 우측에 위치한 수변 식생 분포를 모의 포화부족량 분포와 대비하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

㉘ 지역의 우측 경계에 대비되는 포화부족량은 모든 알고리즘이 대체로 0m로 포화역에 가까웠다. 따라서 알고리즘별 차이는 거의 나타나지 않았다. 그러나 ㉗ 지역에서는 알고리즘에 따른 차이가 관찰되었다. 지형단면상의 ㉗ 지역은 소계곡이 좌 · 우에서 합류하는 지점의 직상부에 위치한다(그림 5의 a). 지형단면상의 상부사면 기여면적(그림 5의 d, e, f)과 포화부족량(그림 8의 b, c, d, e와 f, g, h)도 좌 · 우 소계곡을 반영하고 있었다. 그러나 항공사진에는 우측 소계곡 일대의 수변 식생을 관찰할 수 없었다. 이는 모든 알고리즘이 실제보다 초과하는 토양수분 분포를 예측한 것으로 볼 수 있다. 하지만 Dinf 유향 알고리즘을 도입한 Dinf · MDS(그림 8의 f)의 경우 MD8 · MDS일 때보다 우측 소계곡 주변의 포화부족량이 증가하여 포화역 구간이 감소하였다. 즉 Dinf 유향 알고리즘의 도입은 MD8 · MDS보다 실제 수변 식생 분포에 더 가까운 포화부족량 분포를 만들 수 있었다.

또한 MDS 경사 알고리즘을 이용한 MD8 · MDS의

포화부족량은 지형단면상의 정부에서 0m에 가까운 포화역을 보였다. 그러나 항공사진에서는 실제 수변 식생 분포를 관찰할 수 없다. 이 역시 MD8 · MDS 유향 · 경사 알고리즘이 실제보다 초과하는 토양수분 분포를 예측한 것으로 볼 수 있다. 하지만 Horn 경사 알고리즘을 이용한 MD8 · Horn(그림 8의 g)의 경우, MDS보다 포화부족량이 감소하였고, 포화역 구간은 나타나지 않았다. 즉 Horn 경사 알고리즘의 도입은 지형단면상의 정부에서 MDS보다 실제 수변 식생 분포에 보다 근접한 포화부족량 분포를 만들 수 있었다.

5. 종합 고찰

본 연구에서는 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입이, TOPMODEL 지형지수와 모의 수문 반응에 미치는 영향을 분석하였다. Dinf 유향 알고리즘의 도입은, MD8에 비해 전반적인 지형지수의 값을 감소시켰고, 특히 요형 사면 또는 곡저에서 그러하였다. Horn 경사 알고리즘의 도입도 MDS에 비해 전반적인 지형지수의 값을 감소시켰다. 특히 곡저와 배후 사면과의 연결부에서 값이 줄어들었고, 능선 및 곡저 평탄면 일대에서 비정상적으로 높은 지형지수 값도 줄어들었다. 지형지수의 이 같은 변화는 TOPMODEL 수문반응에서 MD8 · MDS 유향 · 경사 알고리즘에 비해, 최대기여면적의 축소와 지표유출량의 감소를 가져왔다. 또한 지형지수의 변화는 모의 포화부족량 분포에서도 토양수분의 공간적 분포를 지시하는 실제 수변 식생 분포에 더욱 근접한 결과를 가져왔다.

그렇다면 Dinf 유향 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입은 기존 MD8 · MDS 유향 · 경사 알고리즘에 비해 TOPMODEL 지형지수와 모의 수문반응을 개선한다고 볼 수 있는가? 우선 본 연구에서 Dinf 유향 알고리즘을 도입한 결과 곡저에서의 과도한 흐름 확산(Tarboton, 1997)의 축소, 이로 인한 지형지수 값의 감소, 그리고 수변 식생 분포에 보다 근접한 포화부족량 분포를 보였다. 따라서 토양수분의 공간적 분포 예측에서 MD8 유향 알고리즘보다 적절하다고 판단된다.

이 같은 결과는 사실 어느 정도 예상된 것이기도 하다. 이는 Dinf 유향 알고리즘 자체가 요형 사면 및 곡저에서 MD8의 과도한 흐름 확산 문제를 해결하기 위해 고안되었기 때문이며(Tarboton, 1997), Dinf 외에도 이를 해결하기 위한 유향 알고리즘 개선 연구들이 많았기 때문이다(김상현 · 이지영, 1999; 이지영 · 김상현, 2000). 다양한 유향 알고리즘들을 이용한 지형인자들과 실제 토양수분의 공간적 분포와의 상관관계를 분석한 연구들에서도, 대체로 MD8 유향 알고리즘보다 Dinf 정도의 흐름 분배가 더욱 적절하다고 제안하였다(Güntner *et al.*, 2004; Sørensen *et al.*, 2006). 그러나 본 연구와 달리, 이들 연구들은 Dinf 유향 알고리즘을 직접 이용하여 지형지수를 구하고, 이의 적절성을 평가하지는 않았다.

Dinf 유향 알고리즘과 달리 Horn 경사 알고리즘을 이용한 지형지수의 적절성에 대한 논의는 거의 없다. 다만 Horn 경사 알고리즘을 이용한 경사가 실제 토양수분 분포를 잘 설명하지 못한다는 주장이 있다. Güntner *et al.*(2004)은 포화역의 공간적 분포와 지형인자들과의 상관관계를 분석하면서, $MDS(\tan\beta_{local})$ 경사 알고리즘에 비해 $Horn(\tan\beta_{3 \times 3})$ 을 이용한 경사는 설명력이 낮다고 주장했다. 이의 근거로 MDS 경사 알고리즘을 이용한 경우 곡저에서 경사가 낮은 셀들이 많았지만, Horn을 이용한 경우 곡저에서 경사가 낮은 셀들이 매우 적다라는 점을 들었다. 즉 곡저에서는 경사가 낮아야 하는데, Horn 경사 알고리즘을 이용하면 곡저에서도 경사가 높다는 것이다. 이에 대한 이유로 그들은, 평탄한 곡저의 주변부(즉 배후 사면 연결부)에 위치한 셀들의 경우, Horn 경사 알고리즘은 인접(배후) 사면의 비고가 높은(이웃) 셀들을 연산에 포함하지만, MDS 경사 알고리즘은 비고차가 작은 곡저의 낮은 셀을 연산에 포함하기 때문이라고 하였다.

그러나 같은 이유로 본 연구결과에서는 Horn 경사 알고리즘을 이용할 경우 MD8 유향 알고리즘의 과도한 흐름 확산 문제를 어느 정도 해결하는 것으로 나타났다. 동일한 이유인데도 적절성에 대해 서로 다른 주장이 나온 것은 DEM 해상도의 차이 때문으로 판단된다. Güntner *et al.*(2004)이 사용한 DEM 자료의 해상도는 50m인데 반해, 본 연구의 DEM 해상도는 10m이

다. 50m 해상도의 DEM에서는 1 개 혹은 2 개의 셀 안에 산지 소계곡이 포함되지만, 10m 해상도의 DEM에서는 5~10개 이상의 셀에 산지 소계곡이 분포한다. 그래서 Horn 경사 알고리즘을 이용할 경우, 10m 해상도에서는 곡저와 배후 사면 연결부의 1~2개 셀에서만 경사값이 높아지고, 평탄한 곡저 내에서는 MDS의 경사와 유사하다. 그러나 50m 해상도에서는 곡저와 배후 사면 연결부가 모두 한 셀로 표현되기 때문에, Horn 경사 알고리즘을 이용할 경우 곡저를 포함하는 셀의 경사는 높아지게 된다. 따라서 Güntner *et al.*(2004)이 DEM 해상도를 달리 했다면, Horn 경사 알고리즘 이용의 적절성에 대해 다른 견해를 제시했을 것이라 판단된다. DEM 격자 크기의 변화가 지형 인자들의 값에 영향을 준다는 연구 결과도 이를 뒷받침한다(박수진·유근배, 2004; 김만규·박종철, 2008). 결국 10m급 DEM에서 Horn 경사 알고리즘을 이용한 경사가 토양수분 분포에 대한 설명력이 낮다고 볼 수 없다. 또한 DEM 해상도 차이로 인한 이 같은 경사의 변화는, Güntner *et al.*(2004)의 연구결과와 달리, 지형지수에서 MD8의 과도한 흐름 확산 문제를 완화하는 효과를 나타냈다.

한편 Horn 경사 알고리즘을 이용한 지형지수가 토양수분 함유량의 공간적 분포 예측에 더 적합하다는 결과를 얻었지만, 함께 이용된 유형 알고리즘과 더불어 토양수분의 이동 정도를 합리적으로 잘 표현하고 있는지를 생각해볼 필요가 있다. 이는 기존 연구에서 D8 유형 알고리즘을 이용할 경우 SDS 경사 알고리즘을, 그리고 MD8 유형 알고리즘을 이용할 경우 MDS 경사 알고리즘을 함께 이용해왔기 때문이다(Wolock and McCabe, 1995). 이 같은 유형·경사 알고리즘 조합은 '단일 유형과 최대 경사', '다중 유형과 다중 경사' 라는 관점에서, 한 지점에서의 토양수분 이동을 합리적으로 기술하는 것으로 볼 가능성도 있다.

그러나 MDS 경사 알고리즘은 비고가 낮은 모든 이웃 셀들과의 경사를 평균하여, 이를 한 지점에서의 대표 경사값으로 사용한다(수식 2). 이는 다중 유형을 고려하면서 한 지점에서의 토양수분 이동 정도를 설명하는 최적의 경사값으로 보인다. 하지만 엄밀히 말하면, MDS 경사 알고리즘은 평균이라는 대표값을 사용하게

되면서 '다중 유형'이란 세밀한 속성을 놓쳐버리게 된다. 예를 들어, 이웃 셀과의 비고차가 완만한 곳이라면, 평균값이 그 지점의 토양수분 이동 정도를 대표한다고 볼 수도 있다. 그러나 여러 방향의 이웃 셀과 비고차가 큰 곳이라면, 평균값이 그 지점의 수분 이동 정도를 대표한다고 보기 어렵다. 따라서 MD8 유형 알고리즘에는 반드시 MDS 경사 알고리즘을 이용하여 지형지수를 계산해야 할 당위성은 없다. 오히려 다양한 경사 알고리즘의 적용과 평가가 필요하며, 이 같은 관점에서 미분기하에 기초한 Horn 경사 알고리즘을 도입하고 평가하는 것은 적절하다고 볼 수 있다.

이상에서 Dinf 유형 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘을 도입한 지형지수가 토양수분 함유량의 공간적 분포 예측에 보다 적합한 결과를 가져온다고 주장했다. 하지만 TOPMODEL 모의 유출량에서는 MD8·MDS 유형·경사 알고리즘에 비해 모의 효율이 높지는 않았다(표 4). 보정 전에는 오히려 모의 효율이 낮아지거나 유사했고, 보정 후에도 유사했다. 이는 지형지수 개선 정도보다 매개변수 초기 설정의 영향력이 더 크고, 또한 지형지수 개선만으로는 TOPMODEL 모의 유출량에 미치는 효과가 적기 때문으로 판단된다. 이는 Wolock and McCabe(1995)와 김상현·이지현(1999)의 연구결과와도 유사하다.

6. 결론

TOPMODEL 지형지수는 토양수분 함유량의 공간적 분포를 설명하는 대표적 지표로서 분포형(distributed) 환경 연구에서 중요하게 활용되어 왔고, 이를 평가 및 개선하는 연구도 활발했다. 본 연구는 무한 유형(Dinf) 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘을 이용하여, 이들 알고리즘이 TOPMODEL 지형지수와 모의 수문반응에 미치는 영향과 이에 대한 적절성을 평가하였다.

연구결과, 무한 유형(Dinf) 알고리즘의 도입은 다중 유형(MD8) 알고리즘에 비해 전반적인 지형지수의 값을 감소시켰는데, 특히 요형 사면 또는 곡저에서 그러하였다. Horn 경사 알고리즘의 도입도 다중 경사

(MDS) 알고리즘에 비해 지형지수의 값을 감소시켰다. 특히 곡저와 배후 사면과의 연결부에서 지형지수의 값이 줄어들었고, 능선 및 곡저 평탄면 일대에서는 지형지수가 비정상적으로 높은 셀들이 줄어들었다.

지형지수의 이 같은 변화는 다중 유향(MD8) · 다중경사(MDS) 알고리즘에 비해, 모의 최대기여면적의 축소와 지표유출량의 감소를 초래하였다. 그리고 지형지수의 변화는 모의 포화부족량 분포에서도, 토양수분의 공간적 분포를 지시하는 실제 수변 식생 분포에 더욱 근접하는 결과를 가져왔다. 그러나 개선된 지형지수가 TOPMODEL 강우-유출량의 모의 효율을 개선하지는 않았다.

연구결과를 종합해 볼 때, 무한 유향(Dinf) 알고리즘과 Horn 경사 알고리즘의 도입은 기존 다중 유향(MD8) · 다중경사(MDS) 알고리즘보다 TOPMODEL 지형지수와 모의 포화부족량 분포를 개선하는 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 수변 식생 분포와 포화부족량 분포를 비교한 지형단면이 한 구간이었기 때문에, 차후 연구에서는 이를 확대하여 유역 전체에 걸쳐서 정량적으로 비교 검토하는 것이 필요하다. 본 연구결과는 수문학 외에도, 지형특성을 기반으로 한 분포형 환경 연구 분야에서 적절한 유향 및 경사 알고리즘을 선택하는데 적지 않은 도움을 줄 것이다.

사사

논문에 대해 귀중한 조언을 해준 심사위원께 진심으로 감사 드립니다. 그리고 Topology 검사과정을 도와준 구형모씨와, 원고를 검토해준 이차복 선배님, 이진학 박사님, 그리고 박수진 교수님께도 마음을 담아 고마움을 전합니다.

주

- 1) 다 유향(multiple flow direction) 알고리즘은 2 개 이상의 이웃 셀로 흐름 분배를 하는 유향 알고리즘들을 총칭하는 용어로 사용하였다. Quinn *et al.*(1991)이 제안한 다중 유향(Multiple Flow Direction, MD8) 알고리즘을 포함한다.
- 2) 한국수자원학회는 국제수문개발계획 홈페이지(<http://www.ihpkwra.com>)를 운영한다. 대표 유역의 강우 및 수위 자료는 국가수자원관리 종합정보 시스템 홈페이지(WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>)를 통해 구하였다.

- 3) 속사천 상류 유역의 최고봉인 계방산은 적설량이 많고 (“한국의 숲, 한국의 명산”(38) ‘백두대간 전망대’ 평창 계방산”, 경향일보, 2008년 1월 10일, http://news.khan.co.kr/section/khan_art_view.html?mode=view&artid=200801100928491&code=900306), 인터넷 포털 “다음”의 항공사진에서는 잔설이 북사면에 있는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

김만규 · 박종철, 2008, “수치표고모형(DEM)의 해상도가 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형의 모의 결과에 미치는 영향 평가,” 한국지리정보학회지, 11(3), 151-165.

김상현, 1999, “TOPMODEL의 이해,” 한국수자원학회지, 32(2), 30-33.

김상현 · 이지영, 1999, “개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구,” 한국수자원학회논문집, 32(4), 489-499.

김상현 · 김경현, 1999, “공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용,” 한국수자원학회논문집, 32(5), 515-524.

박수진 · 유근배, 2004, “지형학적 공간구조의 해석을 위한 DEM의 최적격자 선정에 관한 연구,” 한국지형학회지, 11(3), 113-136.

이지영 · 김상현, 2000, “지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구,” 한국수자원학회논문집, 33(3), 279-288.

Beven, K. J. and Kirkby, M. J., 1979, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.

Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J., 1995, TOPMODEL, in Singh, V. P.(ed.), *Computer models of watershed hydrology*, Highlands Ranch, Colorado, 627-668.

Dirnböck, T., Hobbs, R. J., Lambeck, R. J., and Caccetta, P. A., 2002, Vegetation distribution in relation to topographically driven processes in southwestern Australia, *Applied Vegetation*

- Science*, 5(1), 147-158.
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., and Rodell, M., 1998, Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas, *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 259-281.
- Grayson, R. B., Western, A. W., Chiew, F. H. S., and Blöschl, G., 1997, Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls, *Water Resources Research*, 33(12), 2897-2908.
- Güntner, A., Seibert, J., and Uhlenbrook, S., 2004, Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices, *Water Resources Research*, 40, W05114, doi:10.1029/2003WR002864.
- Horn, B. K. P., 1981, Hill shading and the reflectance map, *Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14-47.
- Isard, S. A., 1986, Factors influencing soil moisture and plant community distributions on Niwot Ridge, Front Range, Colorado, USA, *Arctic & Alpine Research*, 18(1), 83-96.
- Jones, K. H., 1998, A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers and Geosciences*, 24(4), 315-323.
- Marich, A., Batterson, M., and Bell, T., 2005, The morphology and sedimentological analyses of Rogen moraines, central Avalon Peninsula, Newfoundland, in *Current Research, Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources*, Report 05-1, 1-14.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M., 1984, Extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer vision, graphics, and image processing*, 28(3), 323-344.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79.
- Seibert, J. and McGlynn, B. L., 2007, A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models, *Water Resources Research*, 43, W04501, doi:10.1029/2006WR005128.
- Sørensen, R., Zinko, U., and Seibert, J., 2006, On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101-112.
- 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.
- Warren, S. D., Hohmann, M. G., Auerswald, K., and Mitasova, H., 2004, An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data, *Catena*, 58(3), 215-233.
- Western, A. W., Grayson, R. B., Blöschl, G., Willgoose, G. R., and McMahon, T. A., 1999, Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices, *Water Resources Research*, 35(3), 797-810.
- Wolock, D. M. and McCabe Jr, G. J., 1995, Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31(5), 1315-1324.
- <http://www.wamis.go.kr>
http://local.daum.net/map/index.jsp?t_nil_bestservice=map
<http://egis.me.go.kr/egis/intro.asp>
- 교신: 변종민, 151-748, 서울특별시 관악구 신림9동 서울대학교 사범대학 지리교육과 자연지리 연구실 (이메일: cyberzen.byun@gmail.com, 전화: 02-880-7724)
- Correspondence: Jong Min Byun, Physical Geography Laboratory, Department of Geography Education, Seoul National University, Sillim 9 Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 151-748, Korea (e-mail: cyberzen.byun@gmail.com, phone: +82-2-880-7724)
- 최초투고일 09. 03. 23
 수정일 09. 06. 09
 최종접수일 09. 06. 17