

지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구

Application of Topographic Index Calculation Algorithm considering Topographic Properties

이 지 영* / 김 상 현**

Lee, Ji Young / Kim, Sang Hyun

Abstract

The impact of land slope to the degree of flow divergence was considered employing distributional applications of slope exponents in the flow direction algorithms. Linear, exponential and power law of distributional functions were employed to address the variation of slope exponents in a terrain analysis. Donggok subwatershed at Wichun test watershed was selected as a study area. Digital Elevation Models of 20m, 30m, 40m and 50m grid size were made to perform the analysis. Various calculation methodologies of topographic index and the impact of grid sizes were investigated in terms of statistical and spatial aspects. Distributional applications of slope exponents made it possible to represent the flow divergence and convergence about the terrain characteristics. The Monte-Carlo method was used to simulate six runoff events to check the impact of topographic factor in the runoff simulation.

Keywords : distributional model, TOPMODEL, DEM, slope exponent(H), grid size, sensitivity analysis

요 지

흐름분산 알고리즘에서 경사도에 따른 흐름분산 정도의 가중치를 고려하기 위해 구배역급수의 분포적 적용을 시도하였다. 경사도의 변화에 따른 구배역급수의 적용기준을 선형, 지수형, 멱수형으로 설정하여 지형지수를 산정하였다. 대상유역은 위천 대표 시험유역의 동곡 소유역으로 설정하였고, 격자간격 20m, 30m, 40m, 50m에 대한 수치고도모형(DEM)을 구축하여 분석에 활용하였다.

지형지수 산정방법과 격자크기가 계산 결과에 미치는 영향을 통계적, 공간 분석적인 관점에서 검토하였다. 구배역급수의 분포적 적용은 단일값 적용의 경우에 비해 흐름의 분산과 수렴효과를 지형에 따라 가변적으로 표현할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 지형인자 추출과 관련된 유출모의의 영향을 전체적으로 검토하기 위해 난수발생 기법을 통한 유출모의를 실시하였다.

핵심용어 : 분포형모형, TOPMODEL, 수치고도자료, 구배역급수(H), 격자크기, 민감도분석

* 부산대학교 환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

** 부산대학교 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

1. 서론

분포형 수문모형은 통합형 모형과는 달리 유역의 공간적인 수문학적 특성치들의 분포상태를 모형구조 내에 반영할 수 있다. 이들 중 흐름경로(flow path)와 비기여면적(Specific contributing area; SCA)은 강우유출 시 수문학적 거동에 있어서 중요한 분포형 변수들이다. SCA는 임의의 등고선 요소로 유입되는 유출량에 기여하는 지형상의 총 평면적인 TCA(Total contributing area; TCA)를 등고선 요소길이로 나눈 값이다. 이는 흐름 방향의 평면 투영이 지표면에서 수직으로 형성된다는 가정에 근거하여 지형의 고도값에 의해 결정된다. 이러한 가정은 토양의 투수성이 강우강도에 비해 상대적으로 낮은 지형이나 지표하 흐름과 지표면 흐름이 평행한 지형에 적절하다. SCA는 유출량에 대한 지표로서 사면(hillslope)에서의 수문학적 거동과 수로 위치, 토양 수분 함량, 오염에 대한 취약성 등에 관한 연구에 포괄적으로 활용된다.

과거에 SCA는 등고선에 기반하여 정의되었으나, 수치고도모형(DEM)의 도입과 이의 분포형 변수 표현에 있어서의 용이함에 기인해서 그 개념이 등고선으로부터 수치고도모형의 기반으로 전환되었으며, 수치고도모형의 분석으로부터 계산된 지형학적 매개변수들과 결합하게 되었다. 그리고 이와 같은 통합된 형태의 지수가 사면유출모의에서 널리 사용되고 있는데, 대표적인 예가 $\ln(SCA/S)$ 이다. 이는 토양의 수분결핍정도를 예측하기 위한 인자로, 여기서 S는 지표면 경사를 나타낸다. 이 지수를 계산하기 위해 이용되는 방법으로는 D8(O'Callaghan과 Mark, 1984)과 Rho8(Fairfield와 Leymarie, 1991), 그리고 F8(Freeman, 1991; Quinn 등, 1991)이 있다. 그 외, 격자 기반 모형들의 흐름의 점원(point source)적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적 특성을 고려한 DEMON방법이 있다(Costas-Cabral와 Burges, 1994). 국내연구로는 GRASS 상에서의 지형지수 산정(김상현, 한건연, 1996)과 평탄지형에서의 과도한 흐름분산 문제를 해결하기 위해 구배역급수(H)의 도입(김상현, 이지영, 1999) 등이 있다. 이들 기존 연구들은 지형에 대한 합리적인 흐름의 분산(divergence)과 수렴(convergence)모의를 시도하였으나, 완전한 지형과 급경사 지형의 복합적인 형태를 나타내는 국내의 지형적 특성을 고려한 흐름의 분산과 수렴 모의는 시도되지 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 복합적인 지형적 특성에 의한 유역내 넓은 범위의 경사도 분포에 대해 일관된 구배역급수를 적용함으로써 예측되는 완전한 지형에서의 흐름 수렴의 문제점과 급경사 지역에서의 흐름 분산 문제를 해결하기 위해 경사도에 따른 구배역급수의 분포적 적용에 관한 연구를 실시한다. 그리고 구배역급수의 분포적 적용방법과 격자크기 변화에 의한 산정된 지형지수 분포의 민감도를 분석하고 이의 유출모의에 대한 영향성을 종합적으로 평가하는데 주목적을 둔다.

2. TOPMODEL과 지형지수

TOPMODEL은 지형의 공간적인 변화성을 그 구조 내에 반영하는 대표적인 모형으로 지형지수, $\ln(a/\tan B)$ 를 이용하여 유역의 수문학적 거동을 예측하는 분포형 모형이다(Kirkby, 1975). TOPMODEL의 주요 매개변수는 투수율 감소상수(m)와 지표면에서의 투수계수($T_0(m^2/h)$), 근저류부 최대저류량(SRmax(m)), 근저류부 초기저류량($SR_0(m)$)으로 이 값들이 유역 전체에 대해 동일하게 적용됨으로써 반분포형(semi-distributed)의 모형 형태를 나타낸다. 주요 입력변수인 지형지수는 유역내 지하수위의 공간적 분포를 반영하는 인자로 임의 지점에서의 흐름 누적의 이론적인 예측값을 나타낸다. 그림 1은 지형지수, $\ln(a/\tan B)$ 의 개념을 도식화한 것으로, a 는 x 지점에서의 등고선 단위 길이당 한 격자로 유입되는 상경사(upslope) 면적이고, $\tan B$ 는 x 지점에 대한 국부적인 지표면 경사를 나타낸다. $\tan B$ 는 정상상태에서 포화층에서의 국부적인 동수경사와 동일한 것으로 가정한다. 지수함수 형태는 토양 투수성이 지표면으로부터 수직 깊이에 따

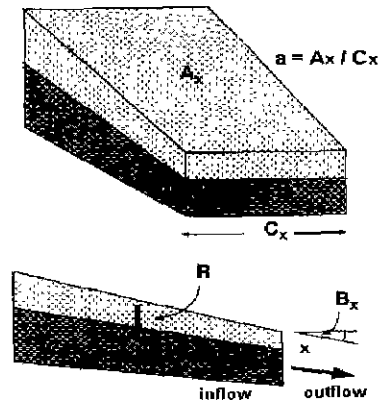


그림 1. 지형지수 개념의 도식화

라 지수함수적으로 감소한다는 가정에 기초한다.

식(1)은 TOPMODEL에서 지형지수와 지하수위 분포간의 관계를 나타낸다.

$$Z_{wt}(x) = \overline{Z_{wt}} + \frac{1}{f} [\lambda - \ln(a/\tan B)_x] \quad (1)$$

여기서 $Z_{wt}(x)$ 는 위치 x 에서의 지하수면의 깊이 (≤ 0)이고 $\overline{Z_{wt}}$ 는 지하수위의 유역평균값이며, f 는 깊이에 따른 포화수리학적 전도도의 변화율을 나타낸다.

식(2)은 전체 유역의 지표하 흐름(qsubsurface)이 최대포화수리학적 전도도(K_0)의 유역 평균값과 f , $\overline{Z_{wt}}$ 과 $\ln(a/\tan B)$ 의 유역 평균값(λ)과의 관계를 보여준다.

$$q_{subsurface} = \frac{K_0}{f} e^{-\lambda} e^{-f\overline{Z_{wt}}} \quad (2)$$

이 식에서 λ 가 $q_{subsurface}$ 에 반비례함을 알 수 있다.

3. 지형지수 산정

3.1 선행연구 고찰

지형지수를 계산하기 위한 방법은 흐름 경로를 예측하는 방법에 따라 다음과 같이 크게 두 가지로 나뉘어진다. D8(O'Callaghan과 Mark, 1984)에 기반한 단일방향 알고리즘(SFD)과 F8(Freeman, 1991; Quinn 등, 1991)에 기반한 다방향 알고리즘(MFD)이 그것이다. 단일방향 알고리즘은 수치고도모형의 각 격자에서의 흐름이 주위 8개 격자중에서 가장 경사가 급한 방향의 격자로 형성된다고 가정한다. 이때 대상 격자의 총기여면적은 이 격자로 흐름을 형성시키는 격자들의 수와 한 격자의 면적, 즉 Δx Δy 와 곱한 값이다. 여기서, Δx 와 Δy 는 격자의 가로와 세로의 길이를 가리킨다. 다방향 알고리즘은 대상 격자로부터 고도가 낮은 모든 주위격자들로 흐름을 형성시킴으로서 단일방향 알고리즘의 주된 문제점인 1차원적 흐름표현 문제를 해결하기 위해 제안되었다. Quinn(1991)등은 다방향 알고리즘의 대상 격자로부터 고도가 낮은 주위 격자로 할당되는 흐름의 분율(f_i)을 식(3)으로 계산했다.

$$f_i = \frac{S_i L_i}{\sum (S_i L_i)} \quad (3)$$

여기서 $\sum (S_i L_i)$ 은 고도가 낮은 모든 주위 격자에 대한 계산된 값이고, S 는 지표면 경사, L 은 유효 등고선 길이를 나타낸다. Quinn(1991)등은 유효 등고선 길이, L 에 대해 직교방향의 격자에 대해서는 $0.5 \times$ 격자크기, 대각선 방향의 격자에 대해서는 $0.354 \times$ 격자크기이다. 또한, Freeman(1991)은 대상 격자로부터 고도가 낮은 주위 격자로 할당되는 흐름의 율(f_i)을 계산하기 위해 식(4)을 제안했다.

$$f_i = \frac{S_i^p}{\sum S_i^p} \quad (4)$$

여기서 S 는 중심 격자와 이웃 격자간의 경사, p 는 비물리적 양의 정수를 나타낸다. Freeman(1991)은 인공적인 원추형의 표면에 대해 $p=1.1$ 일 때 가장 정확한 결과를 산출해 냈음을 밝혀냈다. Holmgren(1994)은 p 의 값이 6~8일 때, 실제 지형에 적합한 것으로 보고했고, Quinn(1995)등은 p 값을 높게 설정해주는 것은 D8의 결과와 유사한 경향을 나타내며, 최적의 p 값은 이용하는 격자의 크기와 지형적 특성에 따라 다르다고 보고했다.

Holmgren(1994)은 위에서 제안한 Freeman의 개념에 기초하여 F8 알고리즘의 급경사 지역에 대한 흐름의 분산을 보완하기 위해 상부사면 누적 면적의 분할에 관련하여 식(5)을 제안하였다.

$$f_i = \frac{(\tan B_i)^H}{\sum_{j=1}^n (\tan B_j)^H} \quad (5)$$

여기서 f_i 는 i 번째 하상 방향 격자로의 흐름 분율로 0에서 1값을 가지고, i, j 는 흐름 방향, $\tan B_i$ (>0)은 i 방향의 격자와 중심격자간의 경사구배, H 는 구배역급수를 나타낸다. 식(5)의 특징은 H 값이 높을수록 대상격자로부터 경사구배가 큰 주위 격자로의 흐름이 수렴하는 경향을 나타낸다. 식(5)에서 $H=1$ 이면, F8 알고리즘과 동일하고, H 가 ∞ 이면, D8 알고리즘의 예측 결과와 일치하는 것으로 밝혀졌다.

Wolock과 McCabe Jr.(1995)은 수문학적 특성치들의 공간적 분포를 모의하려 할 경우 MFD 알고리즘

을 권장하고 있다. 본 연구에서는 유역 전체 수문응답 뿐 아니라, 수문학적 특성치의 공간적 분포를 중요시하기 위해 MFD방법론을 채택하였다.

3.2 구배역급수의 분포적 적용

본 연구에서는 Holmgren(1994)이 제안한 식(5)에 근거하여 구배역급수(H)의 분포적 적용에 관한 연구를 수행하였다. 구배역급수의 분포적 적용에 관한 연구는 앞에서 소개되었던 Holmgren(1994)의 구배역급수가 공간적 가변성을 지닌 경사의 분포경향에 대해 하나의 값을 일괄적으로 적용함으로써 나타날 수 있는 한계점을 보완하기 위해 시도되었다. 이 모형은 경사가 완만한 지형에 대해서는 구배역급수값을 작게 설정하여 흐름분산에 가중치를 부여하고 상대적으로 경사가 급한 지형에 대해서는 구배역급수값을 크게 적용함으로써 지형적 특성에 따른 흐름의 분산과 수렴효과를 모의할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 구배역급수의 분포적 적용을 위해 경사값에 대한 구배역급수의 적용함수를 지수형(exponential), 선형(linear), 멱수형(power)의 형태로 설정하였고, 대상 유역의 경사도 분포에 따라 각 모형별 식이 성립되어 격자 하나하나에 대해서 그 격자의 경사값을 기준으로 구배역급수가 결정되도록 하였다. 표 1은 각 모형의 함수형태를 나타내는데, y는 격자 하나가 가지는 경사도값(x)에 대해 계산되는 구배역급수(H)이고, a, b, c는 전체 경사도 분포에서 최대 경사도 값과 최소 경사도 값에 의해 결정되는 식의 계수들이다. 멱수형의 b는 세 가지 모형의 형태를 가장 잘 구별짓는 형태를 참고하여 결정된 값이다. 그림 2는 세 가지 모형의 경사도 값에 따라 산정된 구배역급수의 분포를 나타낸다. 동일한 경사도 값에 대해 지수형, 선형, 멱수형으로 갈수록 구배역급수값이 크게 산정됨을 알 수 있다.

표 1. 분포형 모형의 함수형태

	함수형태	변수
지수형	$y = e^{ax} + b$	y = H(구배역급수) x = 경사도 a, b, c=계수 b=0.2
선형	$y = ax + b$	
멱수형	$y = ax^b + c$	

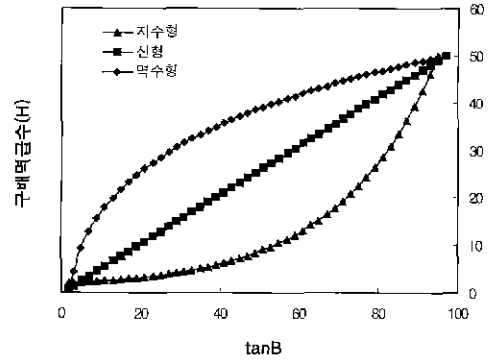


그림 2. 분포형 모형에 따른 경사도와 구배역급수의 관계

4. 수문학적 수치지형분석의 적용

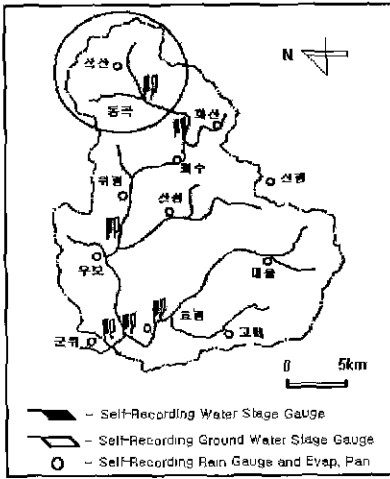
4.1 연구대상지역

연구대상유역은 1983년부터 건설교통부에서 설치·운영하고 있는 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 소유역이다. 지리적 위치는 동경 128° 30" ~ 129°, 북위 36° 10" ~ 36° 40' 이고 행정적 위치는 경상북도 군위군 위천유역에 속한다. 위천 대표시험유역의 면적은 427.525km², 유로연장은 42.83km이고 동곡 소유역의 면적은 33.6km², 유로연장은 8.0km이고, 고도분포는 212m~769m이고, 경사도는 0~15%가 10%, 15~30%가 22.3%, 30%이상이 67.8%로 경사가 가파른 지형적 특성을 지닌다. 그리고 연평균 강우량은 약 82.99mm이고, 연평균 증발량은 약 64.27mm이다(국제수문개발계획, 1997). 지질상태는 유역전체의 기반암으로 퇴적암이 대부분을 차지하고, 유역의 대부분이 산림지역이고 하천을 따라 논과 밭이 분포하는 우리나라의 보편적인 토지이용상태를 나타낸다. 그림 3은 대상유역의 유역도를 나타낸다.

4.2 DEM구축

대상 유역에 대한 수치고도자료(DEM)는 국립지리원의 1:25,000의 지형도를 이용하여 벡터화(vector)한 자료를 GIS 소프트웨어인 GRASS(USCERL, 1991) 기반 하에 래스터(raster) 자료 형태로의 변환과 r.neighbor 함수의 평균 내삽법을 이용하여 격자구조를 지닌 20m, 30m, 40m, 50m DEM으로 완성하였다. 격자크기의 선정은 일반적인 수문해석에 있어서 DEM의 격자크기는 50m이하가 적합하다는 연구결과

(a) 위천대표시험구역



(b) 동곡소유역

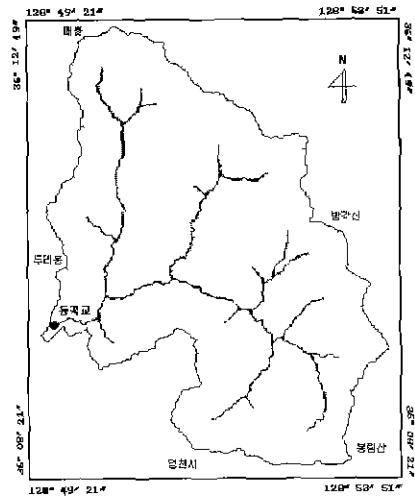
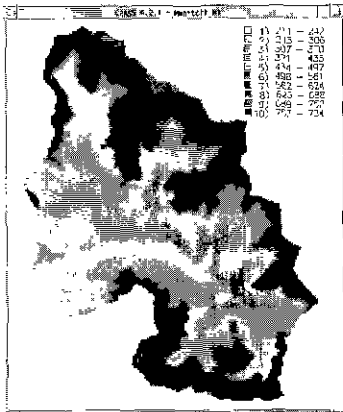


그림 3. 대상유역의 유역도

(a) DEM



(b) 동곡 소유역의 음영기복도



그림 4. 대상유역 고도분포의 도식

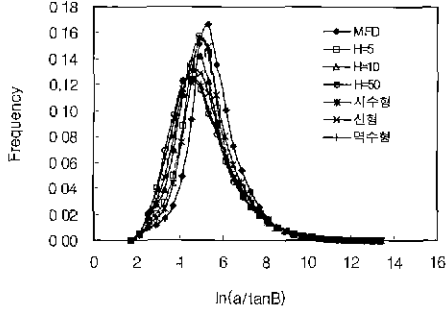
를 참조하였다(Beven, 1995). 그림 4(a)와 4(b)는 각각 구축된 20m 격자크기의 DEM과 음영기복도를 나타낸다.

4.3 수치지형분석

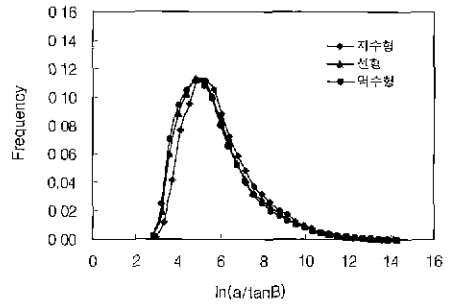
모든 격자크기의 DEM에 대해 MFD 알고리즘과 구배역급수의 단일값 적용 알고리즘 및 본 연구에서 제안된 구배역급수의 분포적 적용 알고리즘을 이용하여 지형지수를 산정하였다. 그림 5(a)는 20m 격자크기에 대한 결과 구배역급수의 단일값 적용과 분포적 적용에 의한 지형지수의 확률빈도분포도를 나타낸다.

MFD 알고리즘과 비교하여 구배역급수의 단일값 적용과 분포적 적용의 확률빈도분포가 낮은 값쪽으로 치우치는 것은 흐름수렴 효과에 의한 작은 지형지수값의 증가에 기인한다. 구배역급수의 단일값 적용과 분포적 적용 결과에서는 H=5와 지수형의 분포 형태가 유사하였고, H=50과 역수형의 분포 형태가 유사하였다. H=10의 경우는 H=5와 H=50의 분포사이에 존재하며, 선형의 경우도 지수형과 역수형의 중간적 분포형태를 유지한다. 또한, 지수형, 선형, 역수형의 순으로 흐름수렴효과가 크게 나타나는데, 이는 동일한 경사값에 대해 지수형, 선형, 역수형의 순으로 구배역급수의 값이

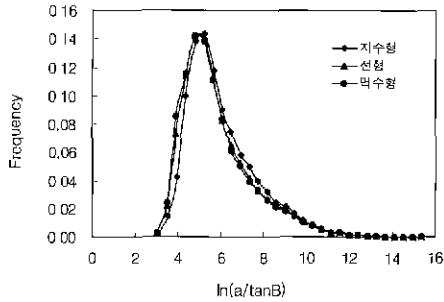
(a) 20m



(b) 30m



(c) 40m



(d) 50m

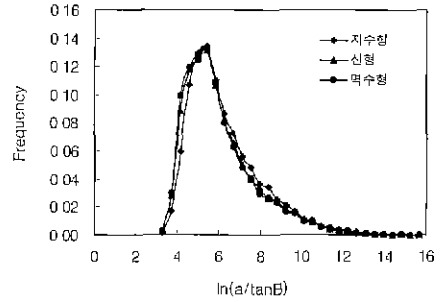


그림 5. 산정된 지형지수 확률 분포도

크게 설정되기 때문이다.

격자크기에 따른 결과는 그림 5의 (b), (c), (d)를 통해, 격자크기가 증가함에 따라 적용방법에 따른 지형

지수 분포상의 차이가 감소함을 알 수 있다. 이는 적용방법에 따른 효과가 격자크기 증가할수록 상쇄되는 것으로 해석할 수 있다.

표 2. 구배먹금수 적용에 따른 지형지수 분포의 통계적 결과

(a) 단일값 적용(격자크기=30m)

통계치 \ 모형	MFD	H=5	H=10	H=50
평균	6.375	6.092	5.987	5.839
분산	2.497	2.639	2.705	2.862
왜곡도	3.918	4.688	4.975	5.477
최소값	3.100	2.800	3.000	2.800
최대값	14.100	14.200	14.300	14.300

(b) 지수형 적용

통계치 \ 모형	20m	30m	40m	50m
평균	4.272	4.719	4.774	4.934
분산	6.963	8.974	9.145	10.065
왜곡도	10.041	10.151	10.704	10.039
최소값	1.739	2.983	3.115	3.291
최대값	13.254	14.111	15.342	15.599

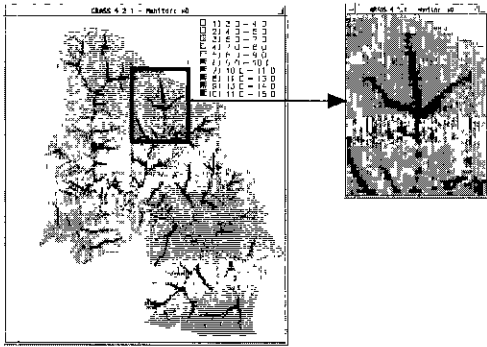
(c) 선형 적용

통계치 \ 모형	20m	30m	40m	50m
평균	4.086	4.543	4.626	4.804
분산	6.680	8.547	8.787	9.700
왜곡도	6.946	7.235	7.996	7.625
최소값	1.739	2.847	3.077	3.291
최대값	13.382	14.253	15.381	15.654

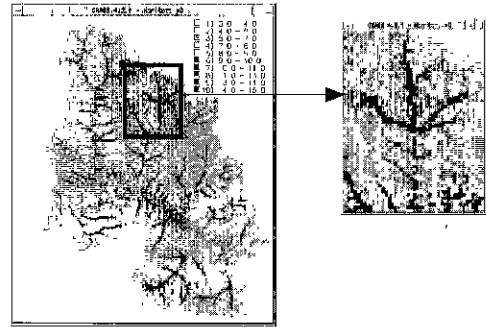
(d) 멱수형 적용

통계치 \ 모형	20m	30m	40m	50m
평균	4.027	4.484	4.588	4.768
분산	6.597	8.405	8.696	9.589
왜곡도	5.957	6.328	7.289	7.045
최소값	1.739	2.846	3.0766	3.291
최대값	13.377	14.259	15.380	15.656

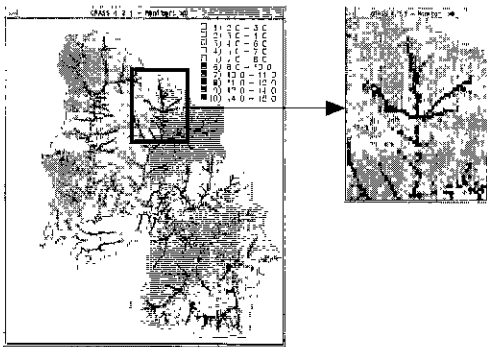
(a) MFD



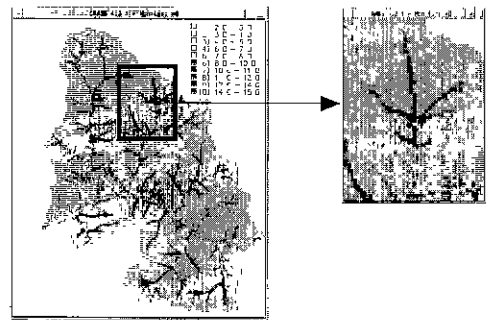
(b) H=10



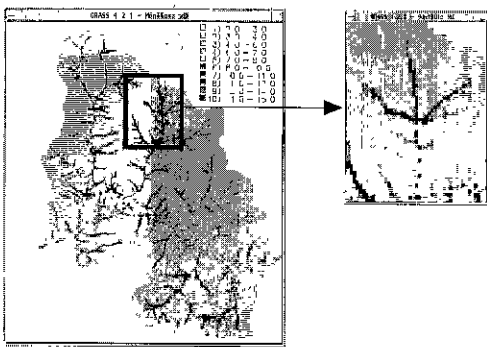
(c) H=50



(d) 지수형



(e) 선형



(f) 멱수형

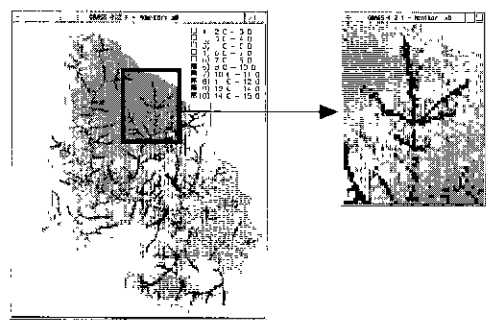


그림 6. 지형지수의 공간적 분포도

표 2는 격자크기별 구베릭급수의 단일값 적용과 분포적 적용을 통한 지형지수 값의 통계적 결과를 비교하여 나타낸다. 표 2의 (a)는 격자크기 30m에 대한 결과로 평균은 단일값 적용에 비해 분포적 적용이 전체적으로 작으며, 단일값 적용에서 H가 증가함에 따라 평균이 감소하는 경향을 나타낸다. 표 2의 (b), (c),

(d)는 격자크기 변화에 의한 구베릭급수의 분포적 적용 결과를 나타낸다. 격자크기가 증가할수록 평균, 분산, 왜곡도가 증가하는 경향을 나타낸다. 각 격자크기에 대해 평균은 지수형, 선형, 멱수형의 순으로 감소한다. 반대로, 분산과 왜곡도는 증가하는데, 이는 흐름 수렴효과의 증대로 지형지수

분포에서 값의 편중이 커지는데 기인하는 것으로 판단된다. 그림 6은 30m 격자크기에 대해 구배역급수의 분포적 적용을 통한 지형지수 산정 결과의 공간적 분포형태를 도식화한 것이다. 각 그림의 사각형으로 표시된 부분은 분포 형상의 차이를 비교적 잘 나타낸다. 그림 6의 (a), (b), (c)는 구배역급수의 단일값 적용결과를 나타내며, H가 증가할수록 흐름 분산이 감소하고 수렴 효과로 인해 큰 지형지수 값을 가지는 격자수가 감소함을 보여준다. 그림 6의 (d)는 H값의 지수형의 분포적 적용 결과로서, 그림 6(a)의 흐름 분산효과를 나타내며 동시에 그림 6의 (b)와 (c)가 나타내는 흐름 수렴 효과도 동시에 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 6의 (e), (f)는 H값의 선형, 역수형의 가변적 적용 결과로서, 그림 6(d)와 동일하게 흐름 수렴과 분산의 효과를 모두 나타내고 있다. 그림 6의 (d), (e), (f)간의 분포 특성의 차이는 지수형, 선형, 역수형의 순으로 흐름 수렴효과가 증가하는데, 이는 그림에서 역수형으로 갈수록 큰 지형지수 값을 가지는 격자수가 증가하는 것을 통해 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동일한 경사값에 대해 지수형, 선형, 역수형의 차례로 구배역급수의 값이 크게 적용되기 때문으로 판단된다. 구배역급수의 분포적 적용은 MFD 알고리즘의 흐름 분산효과와 통계적 적용의 흐름 수렴효과를 모두 잘 반영하는 것으로 밝혀졌다.

4.4 TOPMODEL 유출모의

강우-유출모의에 대한 지형지수 산정방법의 영향을 살펴보기 위해 TOPMODEL 유출모의를 수행하였다. 유출모의를 위해 사용된 관측자료는 건설교통부(1992~1998)의 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서에 수록된 시우량별 강우, 유출량 자료 및 증발산량 자료로, 그 중에서 신뢰성이 있다고 판단되어지는 6개의 강우 사상에 대해서 TOPMODEL 유출모의를 수행하였다. 여기서 이용된 TOPMODEL은 분포형 모형(김상현, 김경현, 1999)으로 지형지수값의 통계적 분포를 이용하지 않고 유역내 모든 격자의 지형지수값을 개별적으로 모형에 적용함으로써, 지형지수 산정방법에 따른 분포특성을 반영할 수 있다.

유출모의시 모의결과의 최적화를 위한 매개변수 보정과정에서 신뢰성을 향상시키기 위해 기존의 TOPMODEL에 균등분포 난수발생법(Uniform Random Sampling)을 활용한 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 사용하여 난수를 발생시키고, 일천번의

표 3. 1000개의 TOPMODEL 매개변수 집합의 초기 매개변수 범위

매개변수(Parameter)	범위(Range)
m (recession factor, m)	0.005 ~ 0.05
SRmax (maximum root zone storage, m)	0.01 ~ 0.04
SR0 (initial root zone storage, m)	0.0005 ~ 0.005
ln(T0) (transmissivity)	1.00 ~ 5.00

반복시행을 통해 넓은 범위에 걸친 매개변수 집합을 얻었다. TOPMODEL의 유출 모의를 제어하는데 있어 가장 중요하다고 판단되는 4가지 변수만을 선택하여 일정한 범위 내에서 난수함수에 의해 변화시키고 나머지 매개변수는 일정한 값으로 고정시켰다. 이 4가지 매개변수는 지수적 감소 상수(m)와 근저류부의 최대 수분함유량(SR_{max}), 초기 수분결핍량(SR₀) 및 포화상태에서 지표면의 투수계수(ln(T₀))이다. 표 3은 위 4가지 변수값의 초기 범위를 나타낸다. 획득된 매개변수 집합에 대해 유출을 모의하고, 그 모의효율(E_m)을 Nash와 Sutcliffe의 효율계수 함수인 식(6)을 이용해서 계산했다(Nash와 Sutcliffe, 1970) Servet와 Dezetter(1991)는 이 효율식이 수문곡선의 전체적인 적합성을 반영하는데 있어 가장 우수한 목적함수(Object function)임을 밝혔다.

$$E_m(\%) = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \times 100 \quad (6)$$

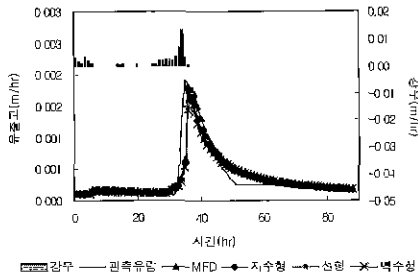
여기서 O_i 는 i 번째 관측치, P_i 는 i 번째 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치의 평균이다

구배역급수의 단일값 적용에 대한 최적유출모의 결과는 표 4에서 보는 바와 같이, 모든 강우사상에 대해 유사한 모의 효율을 나타냈으며, 구배역급수의 값이 증가할수록 다소 최대효율이 낮아지는 경향을 나타내었고, 분포적 적용결과 또한 동일한 모의 효율을 나타내었고 지수형, 선형, 역수형의 순으로 효율이 감소함을 알 수 있다. 그림 7은 두 가지 강우사상에 대해 구배역급수의 분포적 적용에 대한 유출모의 결과를 도식화한 것으로, 유사한 유출 수문곡선을 나타내고 있다. 그러나 이러한 결과가 지형지수 산출방법에 따른 지형지수 분포상에서의 차이점에 기인한다고 판단을 내리기

표 4. 강우 사상별 최적 유출모의 효율 (%)

지형지수 산정방법 \ 강우 사상	92. 7. 15	92. 8. 11	93. 6. 27	97. 5. 12	97. 6. 24	98. 8. 15
MFD	71.37	74.87	93.97	70.34	86.51	79.15
H=5	66.70	71.77	91.41	65.4	86.45	80.82
H=10	65.07	70.6	90.51	63.7	86.45	81.03
H=50	63.1	68.99	89.26	61.7	86.51	80.84
지수형	68.90	73.3	92.52	67.7	86.56	80.1
선형	64.88	70.4	90.31	63.5	86.52	80.90
역수형	63.48	69.4	89.49	62.2	86.49	80.90

(a) 92년 8월 11일



(b) 93년 6월 27일

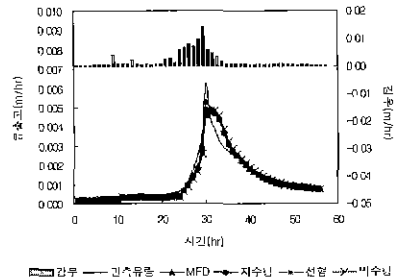


그림 7. 유출모의 결과

가 어려우며, 이는 매개변수 보정에서 토양의 피복조건과 초기수분함량 상태를 나타내는 매개변수와 감소곡선(recession curve)의 변화율을 나타내는 매개변수(m)가 유출량 계산에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다. 이와 유사하게, Franchaini (1996) 등은 유역의 지형지수 분포형태의 변화가 TOPMODEL에 의해 예측된 유출량에 크게 영향을 미치지 않고, 그 변화는 매개변수 값들의 보정에 의해 상쇄될 수 있다고 밝혔다. 지형적 특성 즉, 고도는 포화면적을 결정하는데 있어서 주요한 인자이지만, 토양 특성과 지질적 요소들의 영향을 상쇄할 만큼 그 영향력이 크지 않다는 연구 결과(Iorgulescu와 Jordan, 1994)도 본 연구의 모의 결과를 뒷받침한다.

5. 결 론

구배먹급수(H)의 분포적 적용에 관한 연구는 지형공간상 가변적으로 분포하는 경사도에 대해 구배 먹급수의 단일값 적용의 한계점을 논리적인 관점에서 해결하기 위해 시도되었고 그 결과, MFD나 구배먹급수의 단일값 적용에 비해 지형적 특성에 따라 흐름의 수렴

과 발산 효과를 나타내는 것으로 밝혀졌다. 이를 바탕으로, 산정된 지형지수에 대해 국제수문개발계획(IHP) 대상 유역의 수문자료를 활용한 유출모의를 수행하여 비교분석하였다. 각 경우에 있어서 유출모의가 관측값을 유사하게 설명하는 것으로 나타났다. 이는 지형지수 산정 과정에서 기인한 계산 차이가 매개변수의 보정 과정에서 상쇄될 수 있다는 연구 결과로 설명될 수 있다(Wolock, 1995; Franchaini, 1996; Iorgulescu와 Jordan, 1994). 따라서, 강우-유출모의 뿐만 아니라, 본 연구의 개선된 지형지수 산정 알고리즘은 흐름의 수렴과 분산면적의 합리적 산출과 관련하여 유역의 공간적 분포 특성치들의 거동예측에 관한 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1992~1998). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
 김상현, 한건연 (1996). "지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 29권 제4호, pp. 199~

- 208.
- 김상현, 이지영 (1999). “개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 32권 제4호, pp. 489~499.
- 김상현, 김경현 (1999). “공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용.” 한국수자원학회논문집. 한국수자원학회, 32권 제 5호, pp. 515~ 524.
- Beven, K. J., (1995) “A users guide to the distribution versions(95.01) of DTM9501.” *Centre for Research on Environmental Systems and Statistics Institute of Environmental and Biological Sciences Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, UK.*
- Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991). “Drainage networks from grid digital elevation models.” *Water Resour Res.*, Vol. 27, No. 5, pp. 709~717.
- Franchini, M., Wending, J., Obled, C. Todini, E. (1996). “Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL.” *Journal of Hydrology.* Vol. 175, pp. 293~338.
- Freeman, T. G. (1991) “Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid.” *Comput. Geosci.*, Vol. 17, No. 3, pp. 413~422.
- Costa - Cabral, M. and Burges S. T.(1994). “Digital elevation model networks (DEMON) : A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas.” *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 6, pp. 1681-1692.
- Holmgren, P. B. (1994). “Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid-based elevation models : An empirical evaluation.” *Hydrol. Process*, Vol. 8, pp. 327~334.
- Iorgulescu, I. and Jordan, J. (1994). “Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment.” *Journal of Hydrology.*, Vol. 159, pp. 255~273.
- Kirkby, M. J. (1975). “Hydrograph modeling strategies.” *Process in Physical and human Geography.* Heinemann, pp. 69~90.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). “River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion fo principles.”, *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282~290.
- O’Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984), “The extraction of drainage networks from digital elevation data.” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, Vol. 28, pp. 323~344.
- Quinn P. F., Beven K. J. and R. Lamb (1995). “The $\ln(a/\tan B)$ INDEX : How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework.” *Hydrol. Process.*, Vol. 9, pp. 161~182.
- Quinn, P. F., Beven, K. J., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). “The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models.” *Hydrol. Process.*, Vol. 5. pp. 59~80.
- Servet, E. and Dezetter. A., (1991). “Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modelling in a Sudanese savannah area.” *Hydrol. Science Journal.*, Vol. 36, pp. 307~330
- Wolock D. M. and McCabe, G. J. (1995). “Comparison of single and multiple flow-direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL.” *Water Resour. Res.*, Vol. 31. No 5, pp. 315~1324.

(논문번호:99-094/집수:1999.12.03/심사완료:2000.02.23)