

개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구

Application of Improved Algorithm for Topographic Index Calculation

김 상 현* / 이 지 영**

Kim, Sang Hyun / Lee, Ji Young

Abstract

This research investigated the applicability of an improved algorithm to calculate the topographic index, $\ln(a/\tan B)$, for the topography of Korea employing channel initiation threshold area(CIT) and an exponent for the gradient(H). Hanjaechun subwatershed in Cheongdochun and Dongok subwatershed in Wichun test watershed were selected as study areas. The digital elevation models(DEM) of study areas have been made with the resolution from 10m to 100m. Application of CIT to the traditional algorithm provide reasonable computation method in considering channel pixel impact. Introduction of the gradient exponent(H) made it possible to obtain better flow convergence effect in concave topography comparing with the traditional multiple flow direction algorithm. The improved algorithm shows the capability to relax the overestimation problem of rising limb of hydrograph through reducing overestimated high value of topographic index.

Keywords: TOPMODEL, topographic index, digital elevation model(DEM), CIT, exponent for the gradient

요 지

본 연구는 분포형 수문 모형인 TOPMODEL의 기본 입력자료인 지형지수, $\ln(a/\tan B)$ 산정을 위한 알고리즘과 수로형성면적(CIT)과 구배역급수(H)를 고려한 개선된 지형지수 산정 알고리즘의 국내 지형에 대한 적용성을 검토하였다. 대상 유역은 청도천 유역의 한계천 소유역(18.6km²)과 위천 대표 시험유역의 동곡 소유역(33.6km²)으로, 이 두 유역에 대한 10m, 20m, 30m, 50m, 100m의 수치고도자료(Digital elevation model ; DEM)을 구축하였다.

기존 알고리즘에 대해 수로형성면적의 적용 결과, 수로 격자에 대한 지형지수의 적절한 처리를 통해 개선된 계산 결과를 얻을 수 있었고, 구배역급수(H)의 적용을 통해 기존의 다방향 흐름(MFD)알고리즘에 비해 유역 내 협곡 지점에 대한 흐름의 수렴 효과를 얻을 수 있었다. 개선된 알고리즘에 의해 계산된 지형지수 분포는 최대값의 감소로 유출 모의시 과도한 초기 유출 계산 문제를 완화시킬 수 있었다. 기존 알고리즘을 사용한 유출 모의와 비교하여 개선된 알고리즘을 활용한 전체적인 모의 효율은 유사하나 수문정보의 공간 분포 산정은 보다 합리적인 결과를 도출하였다.

핵심용어 : TOPMODEL, 지형지수, 수치고도자료, 수로형성면적, 구배역급수

* 부산대학교 환경공학과 조교수

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

** 부산대학교 환경공학과 석사과정

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

1. 서론

비점원 오염물질의 거동을 파악하는데는 흐름 경로의 불확실성과 강우사상과의 연계성을 해결하기 위한 사면 유출시 공간적 수문해석이 선행되어야 한다. 수문 사상을 해석하기 위한 대다수 모형들은 통합형 모형(Lumped Model)으로 오염 발생원으로부터 하천 유입지점까지의 대상 유역내 공간적 차별성의 반영을 간과함으로써 비점원 오염현상에 대한 인과관계를 규명하는데 활용되지 못하고 있다. 이에 반해 분포형 모형(Distributed Model)은 국부적인 유역 인자의 상태와 변화를 나타낼 수 있다는 점에서 비점원 오염에 의한 수질 현상 모의에 적합한 모델로 사료된다. 이러한 측면에서, TOPMODEL은 비교적 적은 수의 물리적 의미를 가진 계수들만으로 사면유출의 공간적 분포를 모의할 수 있어 유출경로 추적을 통한 비점원 오염 거동의 분석에 효율적으로 활용될 수 있다. 유출기여면적은 유역의 지형 및 수문학적 특성과 초기습윤정도에 영향을 받는데 특히, 유역의 지형적 특성을 반영하는 지형지수(topographic index)의 산정을 통해 그 공간적 분포상태의 예측이 가능하다. 유출기여면적이 유출수의 수질에 기여하는 영향에 대한 최근 연구는 지형지수를 활용한 비점원 오염현상에 대한 연구의 필요성을 보여주고 있다.(Creed와 Band, 1998; Govindaraju, 1996).

TOPMODEL과 관련된 국내 연구는 지형정보시스템인 GRASS와 Arc/Info를 이용한 소양강 댐의 홍수유출모의(한국수자원공사, 1993), 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발(김현준, 1995, 1996), 지형정보시스템 상에서의 지형지수 산정에 관한 연구(김상현, 1996), 인공배수유역에서의 TOPMODEL 적용에 관한 연구(김상현, 1997, 1998), 국제수문개발계획 유역의 강우-유출해석에 관한 연구(조흥재, 1997, 1998) 등이 있다.

지형지수를 산정하기 위해서는 수치고도자료(Digital Elevation Model ; DEM)를 구축하고 적절한 알고리즘을 활용해야 하는데, 산지지형과 평지지형의 혼합 형태를 이루고 있는 국내지형에는 지형특성별로 적절한 알고리즘의 도출이 필요하다. 일반적으로 알려져 있는 단일방향 알고리즘(Jenson과 Dominique, 1988)은 완만한 경사 지역에서 흐름 분산을 모의하는데 한계가 있으며, 다방향 흐름 알고리즘(Quinn 등, 1991)은 급경사 지역에서 흐름 분산이 과도하게 계산되는 문제점

을 가지고 있다. 또한 DEM에서의 수로망 격자를 구분하여 지형지수를 계산하는 것은 수문모의에서 수로 격자효과를 나타낼 뿐만 아니라, 격자크기에 따른 최적화된 투수계수의 민감도를 감소시키는데도 기여한다(Saulnier 등, 1997). 따라서, 본 연구의 주안점은 유출기여면적에 대한 지표인 지형지수를 산출하는데 따른 영향인자들을 조사하고 이를 바탕으로 개선된 산정 방법을 활용을 통해 국내 일부지형에 대한 적용결과를 분석하고 수문 및 수질 모의에 있어서 유역의 공간적 지형특성을 보다 정확하게 반영하기 위한 연구를 실시하는데 있다.

2. 기본이론

2.1 TOPMODEL과 지형지수

본 연구의 기반이 되는 TOPMODEL은 다음과 같은 세 가지 기본 가정에 근거하여 복잡한 수문 과정을 상당히 간략화시킨 함수적 구조를 가진 체계화된 모형이다. 첫째 가정은, 유역 내에서의 포화 성향이 정상상태의 가정 하에 나타내어 질 수 있다는 것이다. 이는 유역 내의 지하수면의 공간적 분포상황을 지형 지수, $\ln(a/\tan B)$ 로 나타냄으로서 유역내 임의의 지점에서의 포화 현상이 발생될 수 있는 정도를 나타낼 수 있다는 것이다(Kirkby, 1975). 여기서, a 는 등고선 길이 당 상부사면 누적면적, $\tan B$ 는 지표면 경사를 나타낸다. 둘째 가정은, 유역내 지하수면의 동수경사가 지표면 경사인, $\tan B$ 로 표현될 수 있다는 것이다. 위 두 가정으로부터, 상대적으로 상부 경사 지역으로부터의 넓은 배수 면적과 완만한 경사를 가진 지역은 높은 지형지수, 즉 높은 포화 성향을 나타낸다. 셋째 가정은, 전달계수가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수 함수적으로 감소한다는 것이다. 이 가정은 토양 투수계수 자료나 등방 가정에서의 투과함수 유도를 통해 검증되어졌다(Beven, 1984).

포화층에서의 흐름과 유출기여면적(variable source area)의 예측을 통해 최종 유출구에서의 유출량 계산을 수행하는 TOPMODEL의 기본 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 $Z_{wt}(x)$ 는 x 지점에서의 지하 수위의 깊이 (≤ 0), $\overline{Z_{wt}}$ 는 지하 수위 깊이의 유역평균값, f 는 깊

이에 따른 포화 투수계수의 변화율, a 는 x 지점에서
의 등고선 길이 당 상부사면 누적 면적, $\tan B$ 는 지
표면 경사 구배, λ 는 지형지수의 유역 평균값이다.

식 (1)은 포화된 지표면적의 위치와 범위를 결정하
기 위해 유역 내 모든 지점에 대해 적용되며, 지형지
수가 지표면유출(overland flow)을 유발하는 기여면
적의 발생에 관한 지형적 가능성에 직접적으로 관련됨
을 보여준다. 특정 지점에 대한 높은 지형지수는 강우
시 그 지점에 대해 포화에 의한 유출 발생의 잠재성이
크음을 나타낸다.

유역의 기저유출($q_{\text{subsurface}}$)과 포화 투수계수(K_0),
투수계수 변화율에 관련된 변수(f), 지하 수위 깊이의
유역 평균값($\overline{Z_{wt}}$) 그리고 지형지수의 유역 평균값
(λ)과의 함수관계는 다음과 같다.

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

식 (2)는 $\ln(a/\tan B)$ 의 유역 평균값(λ)이 기저
유출(subsurface flow)과 반비례함을 보여주고 있는
데, 이는 높은 지형지수의 평균값(λ)은 기저유출 발생
에 대한 잠재성이 적음을 의미한다.

2.2 지형지수

2.2.1 계산 알고리즘

DEM을 이용하여 지형지수의 공간적 분포를 계
산하기 위한 알고리즘은 그 흐름 분할(flow
apportioning)방법에 따라 크게 단일방향 흐름(Single
Flow Direction; SFD) 알고리즘과 다방향 흐름
(Multiple Flow Direction; MFD) 알고리즘으로 나
누어진다.

SFD 알고리즘은 Jenson과 Dominique(1988)가
발표한 단일방향 흐름 추적법에 기초하는데, 이는 모든
지점에서 지하수 흐름이 각 지점으로부터 가장 경사가
급한 방향으로 향한다고 가정한다. 지형정보 시스템의
수문 해석 프로그램의 대부분이 이 알고리즘을 적용하
고 있다. 이 알고리즘은 지형지수 산정에 있어 오차를
줄이기 위해 DEM에 대해 산봉우리와 같이 흐름이 분
산되는 발산점과 저수지와 같은 흐름이 수렴하는 수렴
점 및 댐과 같이 평평하거나 급경사에서 완경사로 변
하는 선상지와 같은 평지점에 대한 전처리 요구된다.
특히, SFD 알고리즘은 지형상 아주 경사가 급한 계곡

이나 배수 지역 등에 적합하며, 상대적으로 완경사 지
역에 대해서는 흐름 분할을 묘사하는데 문제점이 존재
한다.

MFD 알고리즘은 Quinn 등(1991)이 제안한 흐름
분산법에 근거하고 있으며, 이는 모든 지점에서의 흐름
이 한 지점으로부터 그보다 고도가 낮은 모든 방향으
로 형성된다고 가정한다. 최근 발표된 TOPMODEL
연구의 대다수가 이 알고리즘을 활용하고 있다.

MFD 알고리즘은 그 특성상 흐름이 분산되는 지형
에 아주 적합하며 경사가 급한 지형에 대해서는 SFD
알고리즘보다 그 적용성이 낮다. 그러나, SFD 알고리
즘은 MFD 알고리즘에 비해 그 적용성을 반영하기 위
한 대상 지형의 형태가 제한되어있다. Moore(1995)는
두 알고리즘으로부터 계산된 지형지수의 분포를 비교
한 결과, MFD 알고리즘이 SFD 알고리즘보다 유역의
완경사 지역에 대해 더욱 실제에 가까운 등고선 길이
당 상부사면 누적면적 값의 분포를 나타낸다고 보고했
다. 지형지수를 합리적으로 산정하기 위한 여러 연구들
은(Quinn, 1991; Holmgren, 1994) DEM을 활용한
계산 과정에서 발생하는 문제들을 해결하기 위한 방
향으로 진행되어 왔다. 그 중에서도 와지나 평평한 지형
을 처리하기 위한 연구나 SFD 알고리즘이나 MFD
알고리즘의 장단점을 보완하기 위한 연구가 집중적으
로 수행되고 있다(Band와 Mackay, 1998; Costa-
Cabrал과 Burges, 1994).

2.2.2 수로형성면적값(Channel Initiation area Threshold; CIT)

전 유역에 대한 지형지수 계산시 실제 지형상에서
수로를 포함하거나 그 자체가 수로인 격자들에 대해
서는 유출 지점까지의 상부사면 누적면적 값의 증가
로 지형지수 값이 비합리적으로 크게 계산된다.
TOPMODEL은 기본적으로 유역 내 격자들이 지형지
수를 통해 상호 독립적으로 유출지점의 유출량에 기여
하므로 상부사면 누적면적에 의한 수로부분의 큰 지형
지수 값에 적절한 처리가 요구된다. Morris와
Heerdegen(1989)은 처음으로 영구 수로가 정의될 수
있는 최소의 상부사면 누적 면적으로 수로형성면적값
(CIT)을 제안했고 이어서, Quinn 등(1995)은 각 격
자의 상부사면 누적면적(A)과 설정된 CIT 값을 비교
하여 A가 CIT보다 크면, 이 격자를 수로 격자로 식
별하고 지형지수 계산에서 제외시키고 별도의 계산을
수행하였다. 일단, 수로 격자로 인식된 격자의 하상 방

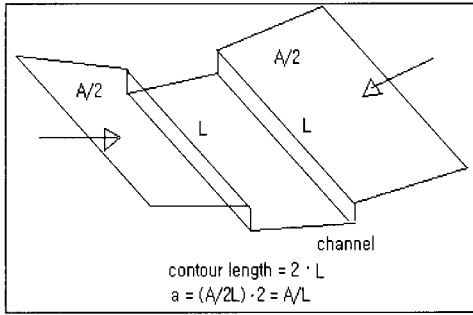


그림 1. 수로를 포함하는 격자에 대한 a, 등고선 길이 당 상부사면 면적계산

향으로의 상부사면 누적 면적의 분할은 그 격자에서 가장 경사가 급한 방향으로만 일어난다고 가정하고, 지형지수 계산은 다른 격자와는 다르게 주위 격자에 대해 유입 경사의 합을 계산하여 $\tan\beta$ 값으로 사용하고 등고선 길이는 직교 방향으로 격자 크기 2배에 해당하는 길이를 사용하여 계산하였다(그림 1).

2.2.3 구배역급수(Slope exponent; H)

경사도가 급한 계곡 부분이나 수로가 형성되어 있는 격자 부분의 지형지수 계산시 MFD의 적용은 흐름의 비현실적인 분산으로 심각한 문제가 제기되어 왔다(Quinn, 1995). Holmgren과 Rose (1994)는 MFD 알고리즘의 급경사 지역에 대한 흐름을 분산을 보완하기 위해 상부사면 누적 면적의 분할에 관련된 다음 식을 제안하였다.

$$d_i = L_i (\tan\beta)^H \quad (3)$$

d_i : i번째 하상 방향으로의 면적 분할 비

L_i : 격자간 등고선 길이

식 (3)은 MFD 알고리즘의 한 격자에 대한 상부사

면 면적분할 식에 H인자가 고려된 것으로, 이는 대상 격자에 대해 주위 격자들 중 경사구배가 상대적으로 큰 방향의 격자로 더 많은 상부사면 누적면적을 할당하는 효과를 나타낸다. 그림 2는 H값의 증가에 따른 면적 분할의 효과를 나타낸다. 식 (3)에서 H=1이면, 기존의 MFD 알고리즘과 동일하고, H가 10이상이면, SFD 알고리즘의 예측 경향을 조금씩 나타내며, 100에 가까운 값은 SFD 알고리즘 예측 결과와 일치하는 것으로 밝혀졌다(Quinn 등, 1995).

3. 적용결과 및 토의

3.1 지형지수 계산

청도천 유역의 한계천 소유역과 위천 유역의 동곡 소유역을 대상유역으로 적용하였다. 각 대상 유역의 면적은 18.6km², 33.6km²이며, 수로 연장은 8.8km, 8.0km이고 한계천 소유역과 동곡 소유역의 경사도는 0~15%가 각각 10.4%, 10%이며, 15~30%이 24.7%, 22.3%이며, 30% 이상이 65.9%, 67.8%로 두 대상 유역이 모두 경사가 급한 특성을 나타낸다. 대상 유역에 대한 수치지도자료는 1:5,000의 지형도를 이용하여 벡터(vector) 자료의 형태로 추출하였고, 이를 래스터(raster) 자료 형태의 변환과 평균 내삽법을 이용하여 격자구조를 지닌 100m, 50m, 30m, 20m, 10m DEM으로 완성하였다(그림 3).

3.1.1 수로형성면적(CIT)의 영향

모든 격자 크기의 DEM에 대해 H는 1로 동일하게 적용하였고 CIT값은 각 유역의 면적값을 기준으로 점점 감소시켜 가면서 적용하였다. 그림 4의 (a)와 (b)는 한계천과 동곡 소유역에 대해 CIT 적용에 따른 수로 격자 수의 분포를 나타내며, CIT값이 감소함에 따라 각 격자 크기에 대한 수로 격자 수의 분포가 증가하는 경향을 나타낸다.

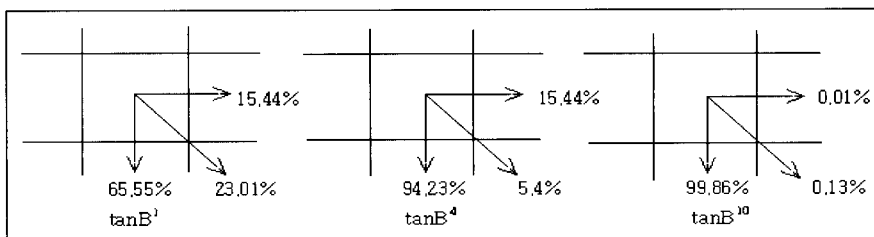
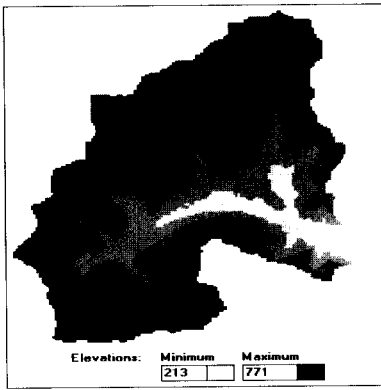
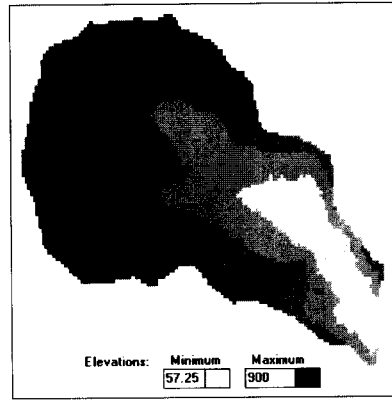


그림 2. 흐름 분할에 대한 구배역급수의 영향

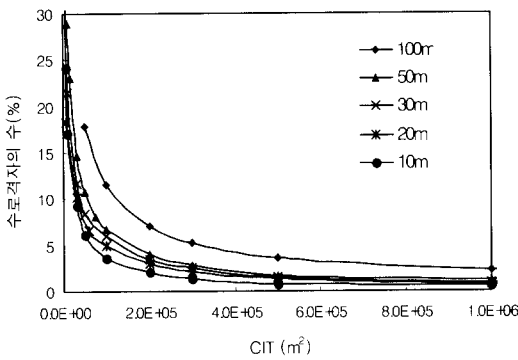


(a) 동곡 소유역

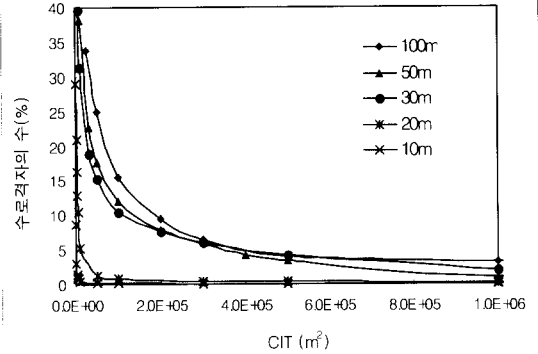


(b) 한제천 유역

그림 3. 대상 유역에 대한 고도 분포



(a) 동곡 소유역



(b) 한제천 소유역

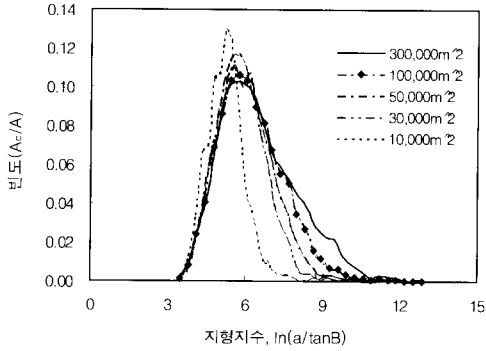
그림 4. 수로형성면적의 감소에 따른 격자크기별 수로 격자수의 분포 변화

Quinn 등(1995)은 수로 격자 수에 있어 급격한 변화를 보이는 CIT값이 유역 내 수로 격자수의 적절한 분포를 나타내며, 적합한 지형지수를 산출하는 것으로 보고했다. 이를 바탕으로, 본 연구에서는 100m, 50m, 30m의 격자 크기에 대한 CIT값을 두 대상유역에 대해 동일하게 각각 $200,000\text{m}^2$, $100,000\text{m}^2$, $60,000\text{m}^2$ 으로 결정하였고, 20m와 10m에 대해서는 두 유역에 대해 다른 분포를 보이나, 격자 크기가 작을 수록 보다 적절한 CIT값이 작아짐을 알 수 있다.

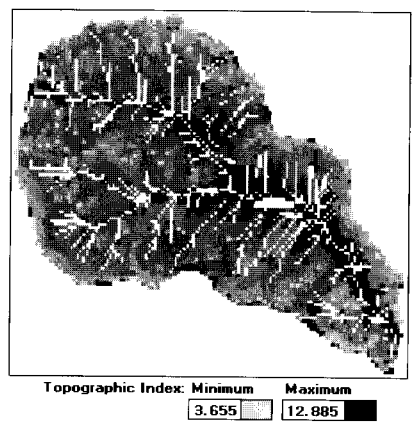
그림 5는 한제천 소유역의 50m DEM에 대해 CIT값을 적용하였을 때 지형지수의 분포를 나타낸다. 그림 5(a)는 CIT값의 감소에 따라 수로 격자의 영향에 의해 지형지수의 최대값이 줄어들고 있음을 확인할 수

있고, $\text{CIT}=100,000\text{m}^2$ 에 대한 지형지수 분포는 Quinn 등(1995)이 CIT 적용에 의해 적합한 분포로 산출된 4에서 12에 이르는 지형지수 분포와 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 $100,000\text{m}^2$ 의 CIT값에 대한 유역 내 수로 격자의 분포 상태를 나타낸다(흰색 부분).

적절한 CIT값의 적용은 CIT값이 부적절하게 설정되었을 때 나타나는 비현실적인 가변적 기여면적의 분포성향을 최소화할 수 있다. 여기서, 적절한 CIT값의 적용에 의한 수로 격자의 분포가 반드시 실제 지형상의 수로 위치를 반영하는 것은 아니며, 단지 이 값은 보다 정확한 유출량 산정을 위해 특정 격자크기의 고도 자료에 대한 수로의 최적 위치와 수로의 가변성을



(a) CIT 감소에 따른 지형지수의 분포 변화



(b) CIT=100,000m²에 대한 지형지수의 공간적 분포

그림 5. 한제천 소유역의 50m DEM에 대한 CIT값의 적용결과

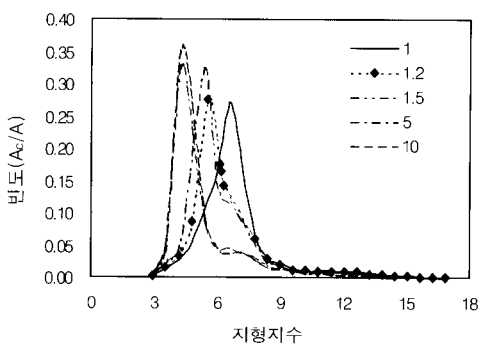
지형지수의 산정시 반영하는 것이다.

3.1.2 구배역급수(H)의 영향

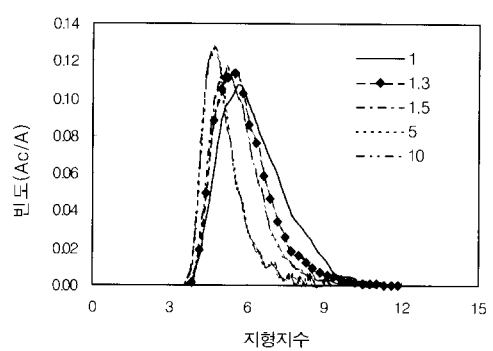
두 유역의 모든 격자 크기에 대해 H인자를 고려한 MFD 알고리즘을 적용하였다. 그림 6은 각 대상 유역의 50m DEM에 적용하여 산출된 지형지수 분포를 나타낸다. 그림 6(a)는 H가 증가할수록 최대값과 최소값에는 변화가 없으며, 전체 지형지수의 분포가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 H인자가 급경사 방향으로 상부사면 누적 면적을 더 많이 분배시킴으로써, 상대적으로 완경사 방향의 격자들에 대한 누적면적

값이 작아져서 지형지수의 전체 분포가 작아지는 것으로 판단된다. 그러나 5이상의 값에서는 동일한 분포결과를 나타내는데, 5이상에서는 한제천 소유역이 H인자에 의한 흐름 수렴 효과에 변화가 없음을 나타낸다. 그림 6(b)는 그림 6(a)와 유사한 결과를 나타내고 있으나, 단지 한제천 소유역보다 경사도가 급하므로, H값의 증가에 따른 지형지수 분포상의 변화가 적다.

그림 7은 H인자에 의한 지형지수 분포를 도식화한 것이다. 그림 7(a)는 한제천 유역의 50m DEM에 대해 H가 1일 때, 그림 7(b)는 H가 5일 때의 지형지수 분포도를 나타낸다. 그림 7(b)는 그림 7(a)에 비해 H

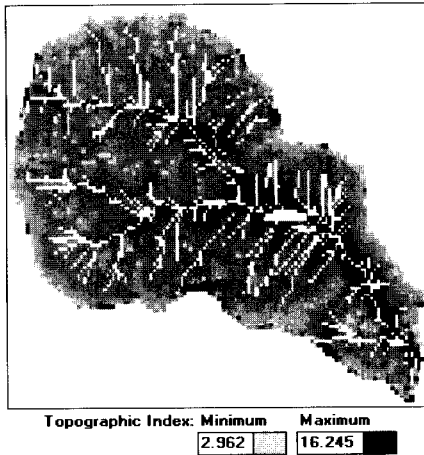


(a) 한제천 소유역 50m DEM

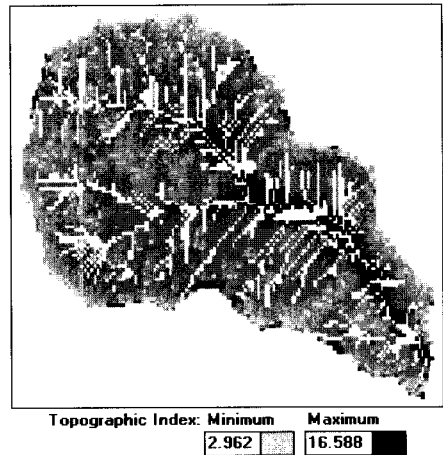


(b) 동곡 소유역 50m DEM

그림 6. H인자를 고려한 지형지수 산출



(a) H=1인 경우



(b) H=5인 경우

그림 7. 한제천 소유역의 50m DEM에 대한 H인자에 의한 지형지수 분포

증가에 의한 흐름 수렴 효과가 지배적이므로 협곡 지점에서 수로가 더 많이 생성되었음을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로, 급경사 지역에서의 MFD 알고리즘의 흐름 분산 효과를 최소화하고 SFD 알고리즘의 흐름 수렴 효과를 유발하기 위한 적절한 H값의 선택이 요구된다. 본 연구에서는 두 대상 유역의 경사가 급한 지형적 특성 때문에 1~5 사이에 해당하는 H값의 적은 변화에도 지형지수 분포에 큰 변화가 나타났으며, H가 5이상인 경우는 SFD 알고리즘의 경향과 일치하여 흐름의 분산 효과를 거의 나타내지 않았다. 따라서, 본 연구의 두 대상 유역에 대한 H값 산정시 5 이상의 값은 부적합한 것으로 판단되고, 1~5사이의 값을 적절히 선택할 때, 급경사 지역에 대한 흐름 분산을 최소화하고 흐름 수렴의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Quinn 등(1995)의 연구에 따르면 상대적으로 경사가 완만한 지형적 특성을 지닌 유역에 대해서는 보다 넓은 범위의 H값에 대한 영향을 나타내는 것으로 밝힌바 있다.

3.2 유출 모의

수로형성면적(CIT)의 효과를 검증하기 위해 여섯 개의 강우 사상을 적용하였다. 대상 유역은 국제수문개발계획(IHP)으로부터 수문 자료 획득이 가능한 동곡소유역으로 선택하였고, 대상 격자크기는 30m로 선택하였다.

그림 8과 9는 각각 92년 7월 15일과 92년 8월 11

일의 강우 사상에 대해 시행착오법을 통해 효율이 높게 산정된 매개변수 집합을 이용한 TOPMODEL 적용 결과를 나타낸다. 그림 8과 9의 (a)는 CIT 적용 이전의 알고리즘 적용 결과와 동일한 매개변수를 이용하여 CIT를 고려한 알고리즘을 TOPMODEL에 적용한 결과를 나타내고 있다. 두 경우 모두 유출 사상을 잘 묘사하고 있지만, 그림 8과 9의 (b)에서 CIT를 고려한 알고리즘 적용시, 매개변수의 보정을 통해 모의 효율을 증가시킬 수 있었다. 표 1은 6가지 강우 사상에 대한 위의 유출 모의 효율을 나타내며, 그 효율은 Nash와 Sutcliffe(1970)의 효율 계수 식 (4)에 의해 계산된 것이다.

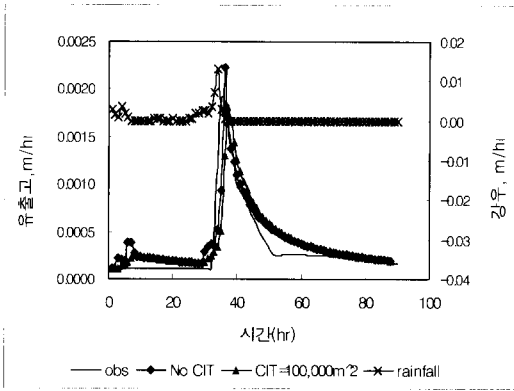
$$E(\%) = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \times 100 \quad (4)$$

여기서, O_i : 관측치, P_i : 모의치, \bar{O} : 관측치 평균을 나타낸다.

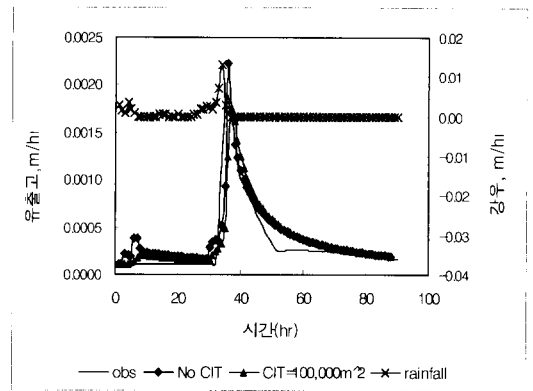
한편, 그림 8과 9에서 두 가지 강우 사상에 대해 이전 알고리즘을 이용한 모의 결과에서 강우 사상 초기에 지표면 유출량에 의해 관측치 보다 높게 나타났던 총 유출량이 CIT를 적용하여 계산한 결과, 지표면 유출량의 감소로 초기에 나타났던 총 유출량의 과다 유출이 줄어들어 효과를 나타내었다. 그림 10은 위의 현상을 보다 정확하게 설명하기 위해, 각각의 강우 사상

표 1. 여러 가지 강우 사상에 대한 유출 모의 결과

효율, E(%)	강우 사상						
	92. 7. 15	92. 8. 11	92. 8. 24	93. 6. 27	97. 5. 12	97. 6. 24	
기존 알고리즘	83.3%	79.1%	56.2%	91.2%	85.1%	84.9%	
CIT 고려시	보정 전	63.2%	65.6%	55.2%	81.1%	56.9%	84.9%
	보정 후	80.6%	66.5%	55.2%	83.6%	65.3%	86.0%

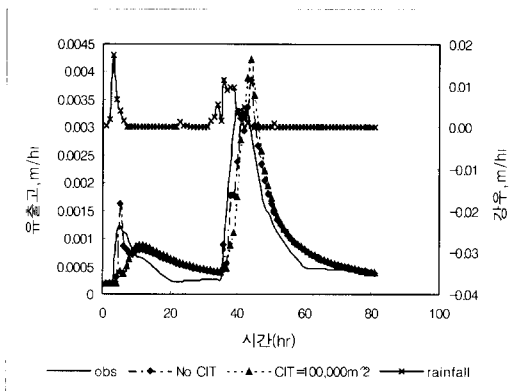


(a) 매개변수 보정 전

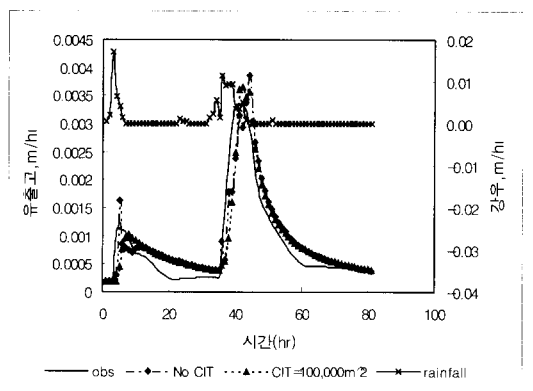


(b) 매개변수 보정 후

그림 8. TOPMODEL 적용 결과(92년 7월 15일)



(a) 매개변수 보정 전



(b) 매개변수 보정 후

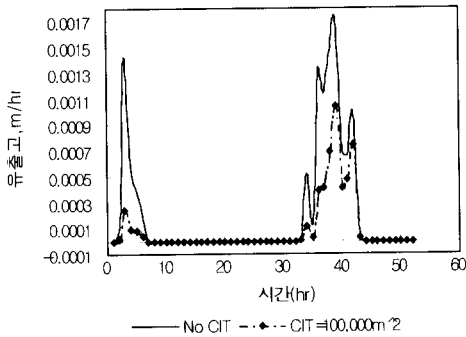
그림 9. TOPMODEL 적용 결과(92년 8월 11일)

에 대해 이전의 알고리즘과 CIT를 적용한 알고리즘의 TOPMODEL 적용시 산출된 지표면 유출량의 변화를 보여주고 있다. 실제로 이전 알고리즘에서 관측치 보다 높게 나타났던 지표면 유출량이 감소하는데, 이는 CIT 적용 이전의 지형지수 분포 상에서의 최대값이 CIT의

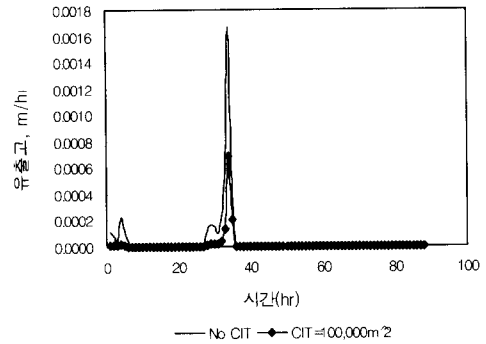
고려로 수로격자에 대한 적절한 계산을 통해 감소하게 됨으로써 나타나는 것으로 판단된다.

3.3 토의

본 연구에서 대상으로 수행한 국내 지형은 급격한



(a) 92년 7월 15일 강우사상



(b) 92년 8월 11일 강우사상

그림 10. CIT 적용에 의해 모의된 Q_{of} (지표면 유출량)의 변화

경사와 완만한 경사의 복합 지형으로서 지형지수 산정에 가장 넓게 활용되고 있는 MFD 알고리즘이 수로상에서의 지형지수 처리와 과도한 흐름 분산 문제에 의한 협곡 지점의 지형지수 처리부분에서 오차를 유발할 수 있다.

유역내 격자들이 지형지수를 통해 상호 독립적으로 유출 지점의 유출량에 기여한다는 TOPMODEL의 접근방법에 기초하여 상부사면 누적면적에 의한 수로 부분의 큰 지형지수 값의 적절한 처리를 위해 수로형성면적(CIT)을 지형지수 계산과정에 도입시켰다. 그 결과, 기존 알고리즘에서의 수로 격자에 의한 지형지수의 최대값이 감소하였다. 그리고 MFD 알고리즘이 협곡에서의 흐름이 수로 격자로 유입되는 과정에서 해당 격자보다 고도가 낮은 인접 격자로의 흐름 분산을 허용하는 돌 이상의 인접 격자간의 흐름 교차 현상을 발생시키므로 지형지수의 비현실적인 계산결과를 낳는다. 이러한 측면에서 구배면적수(H)의 도입은 다방향 흐름 알고리즘(MFD)의 흐름 분산 효과를 완화시켜줌으로써, 협곡에서 격자들의 흐름을 수로격자방향으로 수렴시키는 효과를 얻을 수 있었고, 지형지수의 상단치의 빈도값을 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다.

수로형성면적(CIT)과 구배면적수(H)를 활용한 지형지수의 산정 알고리즘으로 산출된 지형지수를 기반으로 하여 국제 수문 개발 계획(IHP)의 대상 유역의 수문자료를 활용한 실시간 유출 모의를 기존 알고리즘의 계산 결과를 활용한 유출 모의와 비교 분석하였다. 두 경우 모두 유출 모의가 관측값을 적절히 설명할 수 있

음이 확인되었다. 이는 지형지수 산정 과정에서 기인한 계산 차이가 매개변수의 보정 과정에서 상쇄될 수 있다는 연구 결과로 설명된다.(Wolock, 1995).

개선된 알고리즘의 지형지수 산정 결과에서 최대값의 감소 효과는 유출 모의시 초기 유출량의 감소로 나타나는데, 이는 Saulner나 Wigmosta 등이 지적한 강우 유출 초기시 과도 유출 수문 곡선 산정이라는 TOPMODEL 유출 모의시 구조적인 문제를 완화시키는데 일정 기여를 할 것으로 기대된다(Saulner 등, 1997; Wigmosta와 Lettenmaier, 1999).

4. 결 론

본 연구에서는 MFD 알고리즘을 바탕으로 수로형성면적과 구배면적수 개념을 도입하여 개선된 알고리즘을 구성하였고 이를 국내 유역에 적용 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지형지수 산정시 수로형성면적 즉, CIT의 도입은 포화지역의 본포상태 변화로부터 강우시 수로의 가변성을 고려함으로써, 실제 지형에서 수로이거나 수로에 인접한 지역으로 예측되는 부분에 대한 지형지수를 합리적으로 처리할 수 있었다. 특정한 격자 크기의 DEM에 대한 최적 CIT 값을 적용함으로써, 기존 MFD 알고리즘에서 나타난 지표면 유출량의 급격한 증가 문제를 해결할 수 있었다.

(2) 지형지수 산정시, 구배면적수 즉, H인자의 도입은 유역내의 완경사 지역과 급경사 지역에 대한 상부사면 면적 분할에 영향을 미쳐, MFD 알고리즘 상에

서 오목한 지형의 흐름 발산 문제를 최소화하여 흐름 분산과 수렴에 대해 보다 실제 현상에 가까운 효과를 유발한다. 유역의 지형적 특성과 격자 크기에 맞는 H 인자의 선택은 보다 정확한 지형지수 산정에 일정 기여를 할 수 있다.

(3) 본 연구에서 사용된 지형지수 계산법은 국내 지형에서 빈번히 발생하는 수로 격자나 복잡지형이 효과를 적절히 반영하여 수문 반응의 공간적 변화 양상을 합리적으로 산정할 뿐만 아니라, 지형지수의 최대값 감소로 유출모의시 효율을 높이는 데 도움이 된다.

참 고 문 헌

- 김상현, 한건연(1996). "지리정보시스템을 이용한 유역에서의 지형지수 산정." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 199-208.
- 김상현(1997). "인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 539-548.
- 김상현(1998). "확장 TOPMODEL의 영역화 민감도 분석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 741-755.
- 김현준(1995, 1996). 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발. 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- 조홍제, 조인률, 김정식(1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 515-526.
- 조홍제, 조인률(1998). "분포형 유출모형을 이용한 홍수유출해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제2호, pp. 199-208.
- 한국수자원공사(1993). 지리정보시스템을 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구, pp. 1-180.
- Band, L., and Mackay, D.S. (1998). "Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 897-901.
- Beven, K.J. (1984). "Infiltration into a class of vertically non-uniform soils." *Hydrological Science Journal*, Vol. 29, pp. 425-434.
- 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 Resources Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 1681-1692.
- Creed, I.F., and Band, L.E. (1998) "Export of nitrogen from catchment within a temperate forest : Evidence for a unifying mechanism regulated by variable source area dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 11, pp. 3105-3120.
- Govindaraju Rao S. (1996). "Modeling overland flow contamination by chemicals mixed in shallow soil horizons under variable source area hydrology." *Water Resources Research*, Vol. 32, pp. 753-758.
- Holmgren, P.B., and Rose, C.W. (1994). "Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid-based elevation models: An empirical evaluation." *Hydrological Process*, Vol. 8, pp. 327-334.
- Jenson, S.K., and Dominique, J.O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 1593-1600.
- Kirkby, M.J. (1975). "Hydrograph modeling strategies." *Process in physical and human geography*, Heinemann, pp. 69-90.
- Moore, I.D. (1995). "Hydrologic modelling and GIS." *GIS and environmental modeling : Progress and research issues*, GIS World Inc., Fort Collins, Colorado.
- Morris, D.M., and Heerdegen, R.G. (1998) "Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological application." *Geomorphology*, Vol. 1, No. 2, pp. 131-141.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles." *Journal of*

Hydrology, Vol. 10, pp. 282-290.

Quinn, P.F., Beven, K.J., and Lamb, R. (1995).

“The $\ln(a/\tan B)$ INDEX : How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework.” *Hydrological 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.” *Hydrological Process*, Vol. 5, pp. 59-80.

Saulnier, G.M., Beven, K.J., and Obled, C. (1997).

“Digital elevation analysis for distributed hydrological modelling: Reducing scale dependence in effective hydraulic

conductivity values.” *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2097-2101.

Wigmosta, M.S., and Lettenmaier, D.P. (1999).

“A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow.” *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 255-264.

Wolock, D.M., and McCabe, G.J. (1995).

“Comparison of single and multiple flow-direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL.” *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1315-1324.

(논문번호:99-041/접수:1999.05.18/심사완료:1999.07.07)