

개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구

Application of Improved Algorithm for Topographic Index Calculation

이지영**, ○ 김상현*, 김건목**, 정선희**, 김경현**

1. 서론

비점원 오염물질의 거동을 파악하는 데는 흐름 경로의 불확실성과 강우사상과의 연계성 등으로 인해, 이를 해결하기 위한 사면 유출시 공간적 수문해석이 선행되어야 한다. 수문 사상을 해석하기 위한 대다수 모형들은 통합형 모형(Lumped Model)으로 오염 발생원으로부터 하천 유입지점까지의 대상 유역 내 공간적 차별성의 반영을 간과함으로써 비 점원 오염현상에 대한 인과관계를 규명하는데 활용되지 못하고 있다. 이에 반해 분포형 모형(Distributed Model)은 국부적인 유역 인자의 상태와 변화를 나타낼 수 있다는 점에서 비 점원 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(Creed 와 Band, 1998; Govindaraju, 1996) 지형지수를 활용한 비점원 오염현상에 대한 연구의 필요성을 보여주고 있다.

지형지수를 산정하기 위해서는 수치지형모형(Digital Elevation Model)을 구축하고 적절한 알고리즘을 활용해야 하는데, 산지지형과 평지지형의 혼합형태를 이루고 있는 국내지형에는 지형특성별로 적절한 알고리즘의 도출이 필요하다. 또한 DEM에서의 수로망 격자를 구분하여 지형지수를 계산하는 것은 수문모의에서 수로격자효과를 나타낼 뿐만 아니라, 격자크기에 따른 최적화된 투수 계수의 민감도를 감소시키는데도 기여한다.(Saulnier 등, 1997) 따라서, 본 연구의 주안점은 유출기여면적에 대한 지표인 지형지수(Topographic Index) 산출하는데 따른 영향인자들을 조사하고 이를 바탕으로 개선된 알고리즘을 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 간략화 시킨 함수적 구조를 가진 체계화된 모형이다. 첫째 가정은, 유역 내에서의 포화 성향이 정상상태의 가정 하에 나타나어 질 수 있다는 것이다. 이는 유역내의 지하수면의 공간적 분포상황이 지형 지수인 (Kirkby, 1975), $\ln(a/\tan B)$, (a 는 등고선 길이당 상부사면 누적면적, $\tan B$ 는 지표면 경사)로 나타냄으로서, 유역내의 임의의 지점에서의 포화 현상이 발생할 수 있는 정도를 나타낼 수 있다는 것이다. 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.

* 부산대학교 환경공학과 조교수

** 부산대학교 환경공학과 석사과정

이 가정은 토양 투수계수 자료나 등방 가정에서의 투과함수 유도를 통해 검증되어졌다.(Beven, 1984)

포화층에서의 흐름과 유출기여면적(variable source area)의 예측을 통해, 최종 유출 구에서의 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 깊이에 따른 포화 투수계수의 변화율, a 는 x 지점에서의 등고선 길이 당 상부사면 누적 면적, $\tan B$ 는 지표면 경사 구배, λ 는 지형지수의 유역평균값이다.

식 (1)은 포화된 지표면적의 위치와 범위를 결정하기 위해 유역 내 모든 지점에 대해 적용되며, 지형지수가 지표유출(Overland Flow)를 유발하는 기여면적의 발생에 관한 지형적 가능성에 직접적으로 관련됨을 보여준다. 특정 지점에 대한 높은 지형지수는 강우시 그 지점에 대해 포화에 의한 유출 발생의 잠재성이 큼을 나타낸다.

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

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

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

2.2 지형지수(Topographic Index)

2.2.1 계산알고리즘

DEM을 이용하여 지형지수의 공간적 분포를 계산하기 위한 알고리즘은 그 흐름 분할(Flow Apportioning)방법에 따라 크게 일방향 알고리즘(Single Flow Direction)과 다방향 알고리즘(Multiple Flow Direction)로 나누어진다.

일방향 알고리즘(SFD)은 Jenson and Dominique(1988)가 발표한 단일방향흐름 추적법에 기초하는데, 이는 모든 지점에서 지하수 흐름이 각 지점으로부터 가장 경사가 급한 방향으로 향한다고 가정한다. 지형정보 시스템의 수문 해석 프로그램의 대부분이 이 알고리즘을 적용하고 있다. 이 알고리즘은 지형지수 산정에 있어 오차를 줄이기 위해 DEM에 대해 산봉우리와 같이 흐름이 분산되는 발산점과 저수지와 같은 흐름이 수렴하는 수렴점 및 댐과 같이 평평하거나 급경사에서 완경사로 변하는 선상지와 같은 평지점에 대한 전처리가 요구된다. 특히, SFD 알고리즘은 지형상 아주 경사가 급한 계곡이나 배수 지역 등에 적합하며, 상대적으로 완경사 지역에 대해서는 흐름 분할을 묘사하는데 문제점이 존재한다.

다방향 흐름 알고리즘(MFD)은 Quinn 등(1991)이 제안한 흐름분산법에 근거하고 있으며, 이는 모든 지점에서의 흐름이 한 지점으로부터 그보다 고도가 낮은 모든 방향으로 형성된다고 가정한다. 최근 발표된 Topmodel연구의 대다수가 이 알고리즘을 활용하고 있다.

MFD 알고리즘은 그 특성상 흐름이 분산되는 지형에 아주 적합하며 경사가 급한 지형에 대해서는 SFD 알고리즘보다 그 적용성이 낮다. 그러나, SFD 알고리즘은 MFD 알고리즘에 비해 그 적용성을 반영하기 위한 대상 지형의 형태가 제한되어있다. Moore(1995)는 두 알고리즘으로부터 계산된 지형지수의 분포를 비교한 결과, MFD 알고리즘이 SFD 알고리즘보다 유역의 완경사 지역에 대해 더욱 실제에 가까운 등고선 길이 당 상부사면 누적면적 값의 분포를 나타낸다고 보고했다.

2.2.2 수로형성면적값, CIT(Channel Initiation Area Threshold)

전 유역에 대한 지형지수 계산시 실제 지형상에서 수로를 포함하거나 그 자체가 수로인 격자들에 대해서는 유출 지점까지의 상부사면 누적면적 값의 증가로 지형지수 값이 비합리적으로 크

계 계산된다. Topmodel은 기본적으로 유역 내 격자들이 지형지수를 통해 상호 독립적으로 유출지점의 유출량에 기여하므로 상부사면 누적면적에 의한 수로부분의 큰 지형지수 값에 적절한 처리가 요구된다. Morris와 Heerdegen(1989)은 처음으로 영구 수로가 정의될 수 있는 최소의 상부사면 누적 면적으로 수로형성면적값, CIT(Channel Initiation Area Threshold) 제안했고 이어서 Quinn등(1995)은 각 격자의 상부사면 누적면적(A)과 설정된 CIT 값을 비교하여 A가 CIT보다 크면, 이 격자를 수로 격자로 식별하고 지형지수 계산에서 제외시키고 일단, 수로 격자로 인식된 격자의 하상 방향으로의 상부사면 누적면적의 분할은 그 격자에서 가장 경사가 급한 방향으로만 일어난다고 가정하여 CIT를 고려한 지형지수를 계산하였다.

2.2.3 구배 역지수(H, slope exponent)

Holmgren(1994)는 MFD 알고리즘의 급경사 지역에 대한 흐름을 분산을 보완하기 위해 상부사면 누적면적의 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

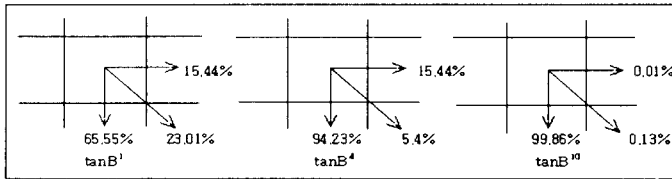


그림 1. 흐름 분할에 대한 구배 역지수의 영향

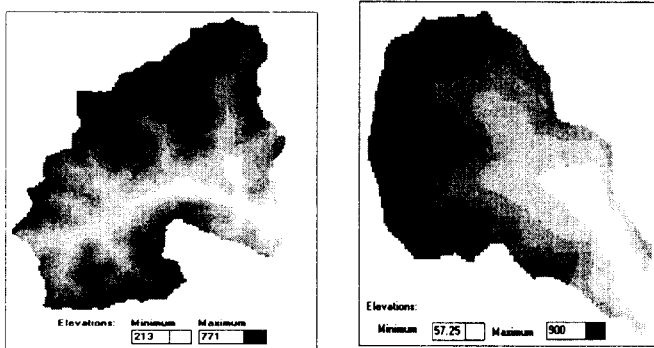
식(3)은 MFD 알고리즘의 한 격자에 대한 상부사면 면적분할식에 H인자가 고려된 것으로, 이는 대상격자에 대해 주위 격자들 중 경사구배가 상대적으로 큰 방향의 격자로 더 많은 상부사면 누적면적을 할당하는 효과를 나타낸다. 그림 3은 H값의 증가에 따른 면적 분할의 효과를 나타낸다. 식 (3)에서 H=1이

면, 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

청도천 유역의 한계천 소유역과 위천 유역의 동곡 소유역을 대상유역으로 적용하였다. 각 대상유역의 면적은 18.6km², 33.6km²이며, 수로 연장은 8.8km, 8.0km이고 평균 경사도는 각각 39.6%,

41.97%로 대체적으로 경사가 급한 지형적 특성을 지닌다. 대상 유역에 대한 수치지형모형(Digital Elevation Model)은 1: 5,000의 지형도를 이용하여 벡터(vector) 자료의 형태로 추출하였고, 이를 래스터(raster) 자료형태로의 변환과 평균 내삽법을 이용하여 격자구조를 지닌 100m, 50m, 30m, 20m, 10m DEM으로 완성하였다.



(a) 동곡 소유역

(b) 한계천 소유역

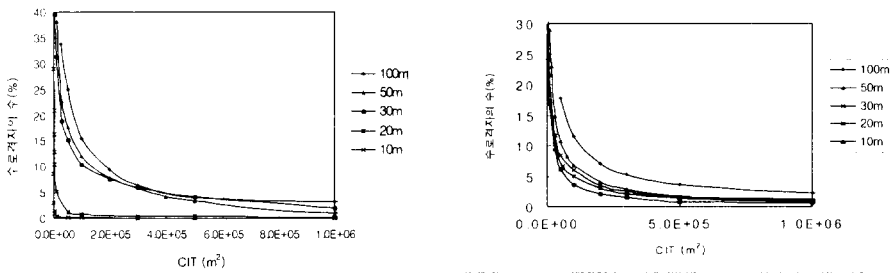
그림 2. 대상 유역에 대한 고도 분포

3.1 CIT

모든 격자크기의 DEM에 대해 H는 1로, CIT값의 범위는 유역의 면적을 기준으로 점점 감소시켜가며 적용하였다. 그림 3의 (a)와 (b)는 한제천과 동곡 소유역에 대해 CIT 적용에 따른 수로격자수의 분포경향을 나타내며, CIT의 감소에 따라 각 격자 크기에 대한 수로 격자 수의 분포가 증가하는 경향을 보인다.

Quinn(1995)의 연구에 따르면, 수로 격자수의 분포에 급격한 변화가 발생하는 CIT값을 최적의 CIT값으로 설정할 수 있다고 보고했다. 본 연구의 격자 크기에 따른 CIT값은 대략 두 대상유역의 100m, 50m, 30m에 대해서 동일하게 각각 200,000m², 100,000m², 60,000m²으로 설정하였고, 20m와 10m에 대해서는 두 유역에 대해 다른 분포를 보이니, 격자 크기가 작을수록 보다 최적의 CIT값이 작아짐을 알 수 있다.

최적의 CIT값의 적용은 CIT값이 부적절하게 설정되었을 때 나타나는 비현실적인 가변적 기여면적의 분포성향을 최소화할 수 있다.



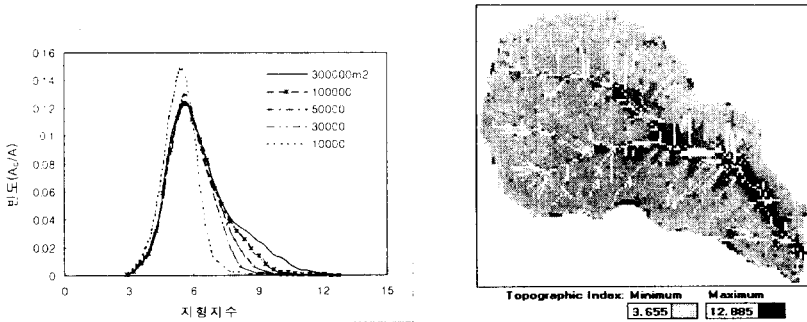
(a) 한제천 소유역

(b) 동곡 소유역

그림 3. 수로형성면적의 감소에 따른 격자크기별 수로 격자수의 분포 변화

그림 4는 한제천 소유역의 50m DEM에 대해 100,000m²의 CIT값을 적용하였을 때 지형지수의 분포를 나타낸다. (a)는 CIT값의 감소에 따라 수로 격자의 영향에 의한 지형지수 최대값이 줄어들고 있음을 확인할 수 있고, (b)의 유역 형상 내 흰색부분은 수로 격자의 분포 상태를 나타낸다.

여기서, 최적의 CIT 값의 적용에 의한 수로 격자들의 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 지형지수의 산정시 반영하는 것이다.



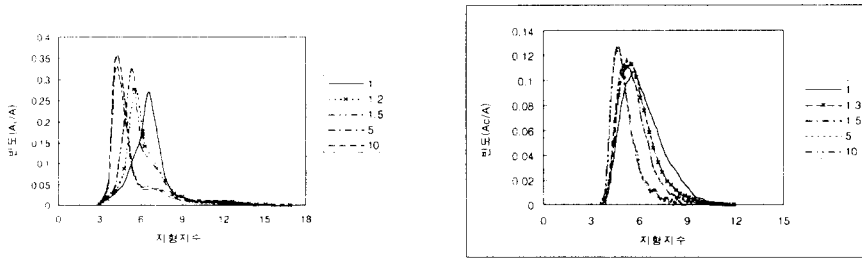
(a) CIT감소에 따른 지형지수의 분포 변화

(b) CIT=100,000m²에 대한 지형지수의 공간적 분포

그림 4. 한제천 소유역의 50m DEM에 대한 CIT값의 적용결과에서

3.2 구배 먹지수(H)

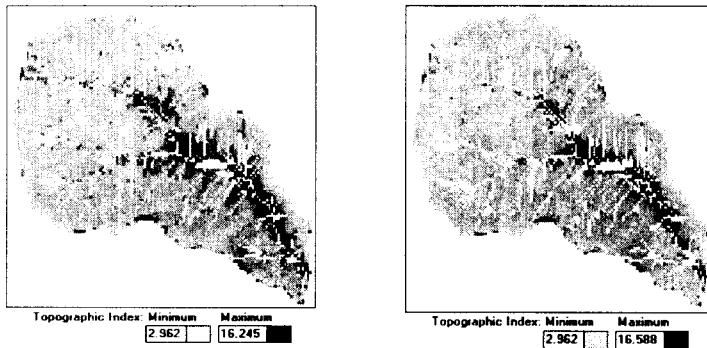
두 지역의 모든 격자크기에 대해 H인자를 고려한 MFD 알고리즘을 적용하였다. 대표적으로 각 대상 지역의 50m DEM에 적용한 결과, 그 지형지수 분포는 그림 5에 나타난 바와 같다. (a), (b) 모두 분포 모양을 통해 H값의 증가에 따라 전체 지형지수 값이 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 H인자가 급경사 방향으로 상부사면 누적 면적을 더 많이 분배시킴으로써, 상대적으로 완경사 방향의 격자들에 대한 누적면적값이 작아져서 지형지수의 전체 분포가 작아지는 것으로 사료된다.



(a) 한재천 소유역 50m DEM

(b) 동곡 소유역 50m DEM

그림 5. H인자를 고려한 지형지수 산출결과



(a) H=1인 경우

(b) H=5인 경우

그림 6. 한재천 소유역의 50m DEM에 대한 H인자에 의한 지형지수 분포

또한, 두 대상유역에 대해 H가 5이상에서는 거의 동일한 분포결과를 보이는데 이는 두 대상 유역의 가파른 지형적 특성에 의해 H 증가에 따른 상부사면의 분할면적에 변화가 없기 때문으로 판단된다. 그림 6의 (a), (b)는 H값 1과 5에 대한 지형지수 분포를 나타내며 비교결과, H증가에 따른 흐름 수렴효과의 발생으로 더 많은 수로가 생성되었음을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 통해, 급경사 지역에서의 MFD 알고리즘의 흐름 분산효과를 최소화하고 SFD 알고리즘의 흐름수렴효과를 유발하기 위해 적절한 H값의 선택이 요구되는데, 적용 예서는 1~2사이 해당되는 H값의 적은 변화에도 지형지수 분포의 변화가 크게 나타나고, 1과 1.5사이의 값을 이용할 때 급경사 지역에 대한 흐름 분산을 최소화하고 흐름 수렴의 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그러나, H가 5이상인 경우에는 SFD 알고리즘의 경향과 일치하여 흐름 분산효과를 거의 나타내지 않으므로 부적합하다. 상대적으로 경사가 완만한 지형적 특성을 지닌 유역에 대해서는 보다 넓은 범위의 H값에 대한 영향을 고루 나타내어 H값의 선택에 있어 유연성이 있을 것으로 예측된다.

4. 결론

본 연구에서는 MFD 알고리즘을 바탕으로 한 개선된 지형지수 산정방법을 국내 유역에 적용 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지형지수 산정시 수로형성면적 즉, CIT(Channel threshold area)의 도입은 포화지역의 분포상태 변화로부터 강우시 수로의 가변성을 고려함으로써, 실제 지형에서 수로이거나 수로에 인접한 지역으로 예측되는 부분에 대한 지형지수를 합리적으로 처리할 수 있다. 특정한 격자 크기의 DEM에 대한 최적 CIT값을 적용함으로써, 기존 MFD 알고리즘에서 나타난 최종 유출지점에서의 급격한 유출량 증가 문제를 해결할 수 있다.
2. 지형지수 산정시, 구배역급수 즉, H인자의 도입은 유역 내의 완경사 지역과 급경사 지역에 대한 상부사면 면적 분할에 영향을 미쳐, MFD 알고리즘 상에서 오목한 지형의 흐름발산 문제를 최소화하여 흐름 분산과 수렴에 대해 보다 실제 현상에 가까운 효과를 유발한다. 유역의 지형적 특성과 격자 크기에 맞는 H인자의 선택은 보다 정확한 지형지수 산정에 일정 기여를 한다.

5. 참고문헌

- Beven, K.J. (1984). "Infiltration into a class of vertically non-uniform soils." Hydrological Science Journal, Vol. 29, pp. 425-434.
- I.F. Creed and L.E. Band (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, pp. 3105-3120.
- Kirkby, M.J. (1975). "Hydrograph modeling strategies." Process in Physical and human Geography. Heinemann, pp. 69-90.
- Holmgren, P. B., and Rose, C.W. (1994). "Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid-based elevation models : An empirical evaluation." Hydrol. Process, VOL. 8, pp. 327-334.
- P. F. Quinn, K. J. Beven 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.
- Rao S. Govindaraju. (1996). "Modeling overland flow contamination by chemicals mixed in shallow soil horizons under variable source area hydrology." Water Resour. Res. Vol. 32, pp. 753-758
- S. K. Jenson and J. O. Dominique (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, pp. 1593-1600.
- Saulnier, G. M., Beven, K. J., Obed, C. (1997). " Digital Elevation Analysis for distributed hydrological modelling: Reducing Scale Dependence in Effective Hydraulic Conductivity Values", Water Resources Research, Vol. 33, pp. 2097-2101.