

Application of Generalized Transmissivity Decreasing Function in TOPMODEL Operation

김상현* / ○정선희** / 이학수** / 손현진**

1. 서론

TOPMODEL은 확립된 수문모형이라기 보다는 적절한 물리적 이론과 적은 수의 매개변수를 이용하여 분포된 유역반응을 모의하는데 이용되는 개념의 집합체라 할 수 있다(Beven, 1997). 유역의 수문과정에 대한 양적-질적 이해를 위해서 수치모형의 표현 향상을 위한 유역특성을 고려한 모형구조의 변화가 가능하다(Ambroise 등 1996b). 이러한 모형구조 일반화와 관련된 최근 연구들은 기존의 TOPMODEL에 이용되어지는 지표하에서의 투수량계수의 지수형 감소 함수에 대해서 포물선형, 선형 그리고 멱급수형의 감소함수를 제안했다(Ambroise 등 1996a; Iorgulescu와 Musy, 1997). Ambroise 등은 지표하에서의 투수량계수의 포물선형과 선형적 감소를 France의 Voages 산지에 위치한 Ringelbach 유역에 적용한 바 있다(Ambroise 등 1996b). 기존의 TOPMODEL은 지표하에서 투수량계수가 지수함수적으로 감소한다는 가정에서 1차 쌍곡선 형태의 감쇠곡선을 도출하게 되는데, 이는 복잡한 특성을 가진 자연유역 기저유출 감쇠곡선을 나타내는 데는 한계가 있을 수 있다(김상현 1999). 본 연구에서는 위천지역의 동곡 소유역에 대해서 토양단면에서 투수량계수의 멱급수 감소모형 TOPMODEL을 적용해서 각 모형에 대한 효율을 기존의 TOPMODEL과 비교하였다. 그리고 기존의 모형에 Monte Carlo 모의 기법을 추가하여 다양한 매개변수 조합이 모의에 주는 영향을 종합적으로 검토하였다.

2. 본론

2.1 TOPMODEL 투수량계수 감소함수의 일반화 이론

지리정보 시스템(GIS)를 활용하여 강우-유출 수문곡선을 예측하는 기존의 TOPMODEL은 아래의 4가지 가정에 기반한다. 첫째 유역내에서 사면유출의 거동이 정상상태라는 가정이고, 두 번째 지하수면의 동수경사는 지표면 경사와 같다는 가정이다. 세 번째는 지표하에서의 투수량계수가 지수함수적으로 감소한다는 것이고, 네 번째 포화지역으로의 유입율 R 이 일정하다는 가정이다.

O'Loughlin, Ambroise, Iorgulescu와 Musy, 등은 각기 지표하에서의 투수량계수의 지수함수적 가정을 완화시키기 위해 선형적 감소, 포물선형 감소, 멱급수형 감소를 제안한다. Iorgulescu와 Musy의 멱급수형 투수량계수 감소함수는 O'Loughlin이 제안한 토양내 투수량계수의 선형적 감소

* 부산대학교 환경공학과 조교수

** 부산대학교 환경공학과 석사과정

와 Ambroise등이 제안한 포물선형적 감소를 포함하는 형태라 할 수 있다(O'Loughlin, 1986). 유역의 토양과 기반암의 특성에 따라서 먹급수를 변화시킴으로서 지형적 특수성을 반영할 수 있는 투수량계수의 먹급수형 감소모형은 식(1)으로 나타낼 수 있다.

$$T_i = T_0(1 - fz_i)^n \quad (1)$$

유역내의 임의의 지점에서의 횡방향 유출량은

$$a_i R = T_0 \tan \beta_i (1 - D_i/M)^n \quad (2)$$

식 (2)로 나타내어 질 수 있다. 여기서 D_i 는 임의지점에서의 포화 저장부족량이고, M 은 침투층의 최대 중력저장량을 나타내는 것으로 먹급수형에서는 지수형과 달리 유한한 값을 가진다. $fz_i = D_i/M = \delta_i$ 의 관계가 성립한다(Ambroise 등, 1996a; Iorgulescu, 1997). δ_i 는 임의지점에서의 상대 저장부족량을 나타낸다. 먹급수형에서 유역 평균 포화 저장부족량과 임의의 지점에서의 상대적 저장부족량과의 관계를 나타내면 다음과 같다(Iorgulescu 등, 1997).

$$(1 - D_i/M)/(1 - D/M) = G_i/\gamma, \quad G_i = (a_i/(\tan \beta_i T_0))^{1/n} \quad (3)$$

여기서 G_i 는 유역 내 임의지점에서의 먹급수형 지형지수를 나타내고, γ 는 먹급수형 지형지수의 유역전체의 평균값을 나타낸다. 포화지역으로부터의 총 유출량은 하천으로 유입되는 기저유출의 합으로부터 구할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면

$$Q_b = Q_0(1 - \bar{\delta})^n, \quad Q_0 = A(\gamma_n)^{-n} \quad (4)$$

로 평균 상대 저장부족량, $\bar{\delta}$, 이 0 일 때의 유출을 나타내고, Q_b 는 포화지역의 총 기저유출량, A 는 상부사면 누가 면적의 합이다. 총 기저유출량을 보존법칙을 사용해서 나타내면 아래와 같이 나타낼 수 있다(Ambroise 등, 1996a).

$$Q_b = AM \frac{d\bar{\delta}}{dt} \quad (5)$$

그리고, chain rule을 이용해서 식을 정리하고, 식(5)를 $\bar{\delta}$ 에 대해서 미분 정리하여 대입하면 아래의 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ_b}{dt} = -n \frac{\sqrt[n]{Q_0}}{AM} Q_b^{\frac{(2n-1)}{n}} \quad (6)$$

식 (6)을 지체시간에 대해서 적분하면 각 먹급수(n)에 대한 기저유출 감쇠곡선식을 얻을 수 있다.

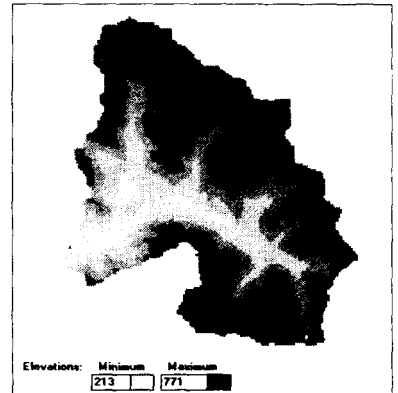


그림 1. 동곡 소유역의 수치지형도 (50m DEM)

2.2 토양내 단면에서의 먹급수형 투수량계수 감소의 적용

국제수문개발계획(IHP) 대상유역중의 하나인 위천 대표시험유역의 동곡 소유역을 대상으로 GIS 소프트웨어인 GRASS (USCERL, 1991)를 활용하여 수치지형도를 획득하였다. 지형지수는 50m 격자의 수치지형도를 이용해서 다방향 흐름

(Multiple Flow Direction)알고리즘을 적용했고, 이때 사용되어진 동곡소유역의 수치지형도는 그림 1에 나타내었다. 동곡 소유역은 유역면적 33.6km², 유로연장 8.0km이고, 고도는 212m-769m이고, 지형경사는 급한 편이다. 유출모의를 최적화하기 위한 매개변수 보정과정의 신뢰성 향상을 위해 TOPMODEL에 Monte Carlo 모의함수를 추가하여 난수를 발생시키게 했다(Press 등, 1992). 발생된 임의의 매개변수에 대해서 각각 유출을 모의하고, 효율을 Nash와 Sutcliffe의 효율계수 식을 이용해서 계산했다.

그림 2는 동곡 소유역에 대한 각 먹급수에 대한 지형지수 지도와 지수형 지형지수의 분포이다. 각각의 분포는 최대값과 최소값을 15개의 색상으로 분류해서 나타내었고, 지도에서 흰색이 높은 지형지수를 나타내고 색상이 짙어질수록 지형지수의 값이 작아진다. 특히, 급수가 2와 3인 경우에 지형지수의 변화가 급격한데, 이는 유출모의 결과의 효율이 먹급수가 2인 경우와 3인 경우에 가장 높은 것에서도 확인될 수 있다.

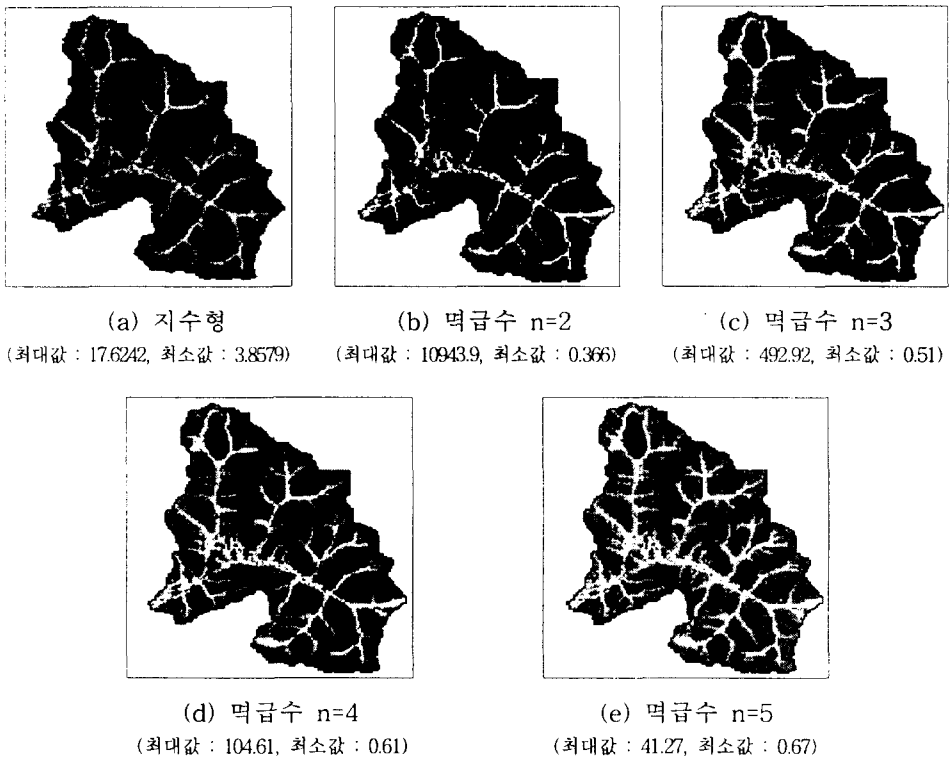


그림 2. 동곡 소유역의 지수형 지형지수와 먹급수형 지형지수의 분포도

그림 3은 국제수문개발계획(IHP) 시험유역의 강우유출 사상 중 신뢰할 만한 여섯 가지 강우 사상의 투수량계수 감소함수 일반화 모형들의 최대효율도출의 적용결과를 보여주고 있다. 전반적으로 모든 형태의 모형이 강우유출사상을 적절히 기술하고 있으나 가저유출 감소곡선 부분의 각 모형에 따른 현격한 차이는 도출되지 않았다. 이는 최대모의 효율 도출이 관측치와 모의치 사이의

침투유량 일치에 많은 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다. 포화초과유출에서 기인되는 지표면유출이 침투유량에 기여하는 바를 보다 합리적으로 반영하기 위한 과정들은(Sauliner, 1997 ; Wigmosta, 1999) 합리적 침투유량 산정에 일정기여를 하고 최대모의 효율의 매개변수조합에 영향을 줄 것으로 판단된다.

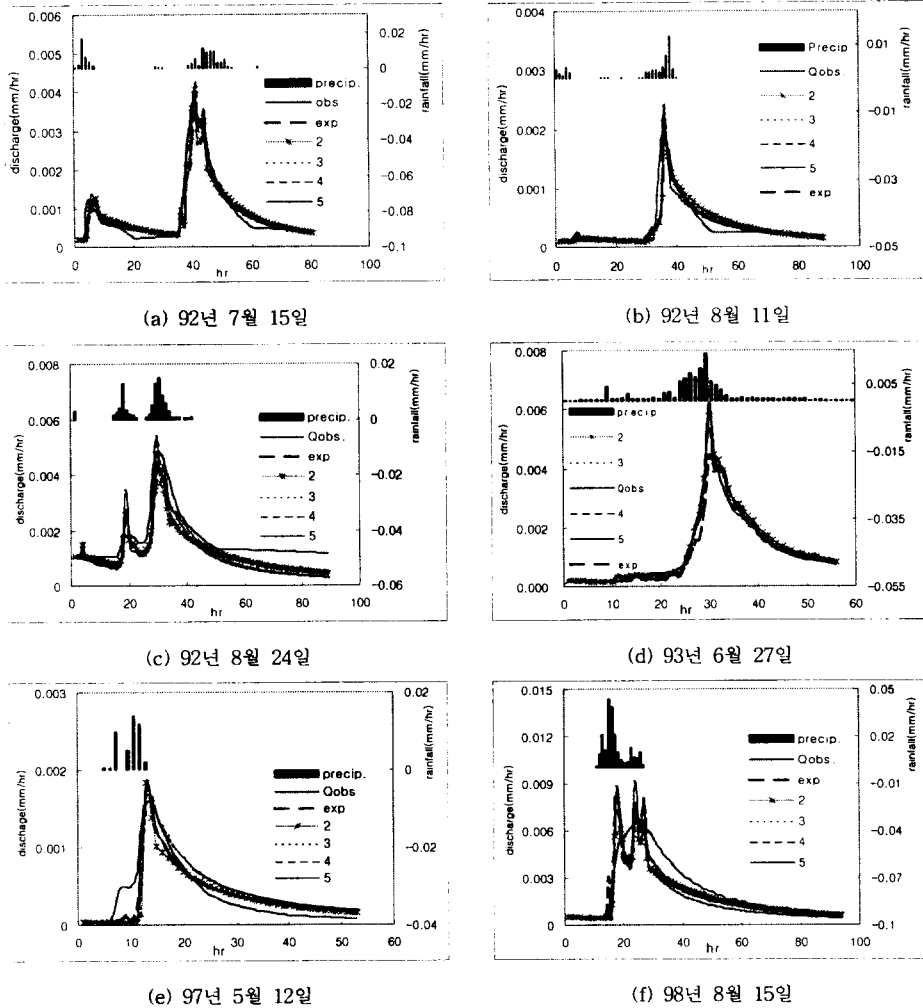


그림 3. 여러 강우사상에 대한 투수계수의 지수형 감소모형과 멱급수형 감소모형의 적용 결과 (exp는 지수형 감소 모형, 2, 3, 4, 5는 멱급수형 감소모형의 멱급수, Qobs는 관측된 유량, precip는 강우량)

표 1은 각 강우사상에 대한 주요 매개변수들의 최대값과 최소값은 각 모형의 성능을 비교하기 위해 시행착오법으로 구해진 값들이다. 여기서 root zone storage는 차단과 증발에 의한 함수로서 강우가 지표로 침투되기 전에 감소되는 양이라고 할 수 있다.

표 1. 각 강우사상별 주요매개변수의 최대값과 최소값

		92/07/15	92/08/11	92/08/24	93/06/27	97/05/12	97/05/12*	98/08/15
SZM	최대값	0.08	0.09	0.12	0.12	0.12	0.08	0.3
	최소값	0.007	0.005	0.006	0.009	0.06	0.06	0.02
TD	최대값	40	40	90	30	90	40	65
	최소값	5	5	4	3	4	5	3
SRMAX	최대값	0.03	0.09	0.009	0.002	0.009	0.04	.07
	최소값	0.003	0.03	0.003	0.00008	0.003	0.02	.002
SRO	최대값	0.02	0.009	0.02	0.099	0.02	0.005	0.075
	최소값	0.003	0.003	0.0003	0.0009	0.003	0.003	0.003

05/12/97: 떡급수 2, 3, 4인 경우에 적용된 매개변수, 05/12/97*: 떡급수 n=5에 적용된 조정된 매개변수
 SZM: 매개변수 m에 해당하는 것으로 유효저장 용량, TD: 단위 부족량에 대한 지연시간
 SRMAX: root zone storage의 최대값, SRO: root zone storage의 초기값

표 2은 6개의 강우사상에 대한 70%이상의 효율을 나타내는 난수의 개수를 전체 난수발생 개수의 비율로 나타내었다. 92년 8월 24일 강우사상은 효율이 50% 이상인 것의 비율이다. 표 2와 그림 2에서 볼 때 전체적으로는 지수형보다는 떡급수형이 최대효율이 높고, 또 특정 효율 (70% 또는 50%)이상인 경우도 많이 나타난다. 특히, n=2인 경우와 n=3인 경우에 있어서 다른 떡급수 감소 모형보다 강우사상에 관계없이 비율이 높게 나타나고 있다.

표 2. 강우사상별 유추모형별 Monte Carlo Simulation 모의효율 (일정모의효율이상의 모의 개수 / 전체 모의 개수)

효율 \ 강우사상	92/07/15	92/08/11	92/08/24	93/06/27	97/05/12	98/08/15
지수형 감소	71/500	29/500	41/500	42/500	6/500	46/500
떡급수형 감소 (n=2)	356/500	173/500	62/500	425/500	0/500	224/500
떡급수형 감소 (n=3)	222/500	230/500	87/500	364/500	71/500	222/500
떡급수형 감소 (n=4)	90/500	205/500	35/500	314/500	31/500	204/500
떡급수형 감소 (n=5)	103/500	135/500	1/500	283/500	85/500*	82/500

*: 조정된 매개변수를 적용한 결과

3. 비교고찰

본 연구의 경우 효율의 최대값은 각각의 강우사상에 대해서 토양단면에서 투수량계수 감소함수의 변화에 관계없이 거의 비슷하다. 그러나, 난수를 발생시켜 가면서 광범위한 매개변수의 조합이 모형의 거동에 미치는 영향을 검토하면, 떡급수 n=2와 떡급수 n=3인 경우에 효율이 70% 또는 50%이상인 비율이 높다. 특히, 지수형 감소곡선의 형태에 비해서는 떡급수 감소곡선의 형태의 적정도의 비율이 월등히 높음을 발견할 수가 있다.

떡급수형의 지형인자는 지수형에 비해서 그 분포범위가 넓다. 그리고, 지수형에 비해서 분포에서 크게 벗어나 있는 극한치가 존재한다. 이와 같은 극한치의 존재는 모형의 보정 과정에 부정적인 영향을 미치므로 본 연구에서는 3%에 해당하는 극값을 실제 유출량 계산에는 포함시키지 않

았다. 임의로 배제시킨 지형지수는 강우초기에 유출량에 기여하는 것으로 이들의 효과를 검토해 보았다. 먹급수 3, 4와 5에 대해서 배제시킨 비율이 작아질수록 강우초기의 유출량의 값이 적은 쪽으로 증가함을 확인하였다. 이는 매개변수 보정 과정에 중요한 영향을 주는 요소로 극소수 극한 치에 의해서 전체의 유출 과정에 대한 매개변수가 변화됨을 의미한다. 이들 극한치의 지형인자들이 가지는 수문학적 설명은 강우유출시 발생하는 수로의 형성으로 기술될 수 있고 수로격자의 사면유출 계산시 배제에 관한 긍정적 효과도 검토된 바 있다(Saulrier 등, 1997).

4. 결론

1. 경사가 급한 국내의 산지지형에 대한 토양단면에서 최적의 투수랑계수의 감소 형태를 찾고자 하는 과정에서 유출모의 결과 투수랑계수의 먹급수형 감소는 강우사상에 따라 다소의 차이는 있지만 지수형 감소 못지않게 예측력이 뛰어나고, 특히 먹급수 2와 먹급수 3인 경우에 모의효율이 높은 것으로 나타났다.
2. 난수발생기법을 활용한 모형거동의 광범위한 검토도 실시되었고, TOPMODEL 일반화 과정의 국내 산지유역 적용과정에서 유출모의시 활용될 수 있는 매개변수들의 범위를 제시하였다.

5. 참고문헌

- 김 상 현 (1999). "TOPMODEL의 이해" 한국수자원학회지, Vol. 32, No. 2, pp. 30-33.
- Ambroise B., Freer J. and Beven K., (1996a). "Application of a generalized TOPMODEL to the small Rigelbach catchment, Vosges, France." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp.2147-2159.
- Ambroise B., Freer J. and Beven K., (1996b). "Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No.7, pp. 2134-2145.
- Beven, K. J., Lamb R., Quinn P., Rominowicz R. and Freer J. (1995). *TOPMODEL, Computer Model of Watershed Hydrology*, edited by V. P. Singh, Water Resour. Publications, pp. 627-668.
- Beven, K. J. (1997). "TOPMODEL :A CRITIQUE." *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp.1069-1085.
- Iorgulescu I. and Musy A. (1997). "Generalization of TOPMODEL for a power law transmissivity profile." *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp. 1353-1355.
- Nash, J. E., and Sutcliffe J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion for principles." *J. of Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
- O'Loughlin E. M. (1986). "Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic analysis." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, pp. 794-804.
- 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." *Hyorol. Proce.*, Vol. 9, pp. 161-182.
- Wigmosta M. S., Lettenmaier D. P. (1999). "A comparison of simplified method for routing topographically driven subsurface flow" *Water Resour. Res.*, Vol. 135, No. 1, pp. 255-264.