TOPMODEL의 이해

김 상 현 (부산대학교 환경공학과 조교수)

1. 서 론

TOPMODEL은 사면 유출시 일어나는 표면유출과 기저유출을 분산형 변동 포화 영역의 개념을 도입하여 비교적 적은 수의 매개변수와 물리적 근거를 기반으로한 수문모형으로 University of Leed에서 처음 개발되었다. Kirkby 박사가 제안한 지형지수 (a/tanB)로부터 개발된 TOPMODEL은 유역의 지형적 특성으로부터 수문학적 거동을 공간적으로 표현하도록 구성되어 있다. Lancaster University의 Beven 교수를 중심으로 하는 TOPMODEL 연구팀은 지난 20여년간의 연구를 통하여 괄목할 만한 진전을 이룩하였다. 특히 최근의 수치지형모형(Digital Elevation Model)의 일반화는 TOPMODEL이 많은 관심을 일으키는 수문모형이 되게 하였다. 이 모형은 수문거동에 대한 개념적인 시각이 모형의 기본구조를 이루고 있지만 이를 구성하는 매개변수가 현장에서 측정 될 수 있는 이유로 인하여 '물리적 근거를 가진 수문모형' 이라 불리기도 한다. 본 기고에서는 정립된 TOPMODEL의 이론과 더불어 최근에 이루어진 TOPMODEL 관련 연구를 소개함으로 독자들의 전반적인 TOP MODEL에 관한 이해를 돕고자 한다.

2. TOPMODEL 기본 이론

영국 상류부 소유역의 유출 모형화를 위해 처음으로 개발된 TOPMODEL은 (Beven 등, 1983), 미국 동부(Beven와 Wood, 1983; Hornberger 등, 1985), 뉴질랜드(Robson 등, 1993)등의 온난다습한 유역에서 우수한 적용성을 검증 받았고, 남부 프랑스의 건조한 유역에서도 성공적인 유출추적 능력을 보여주었다(Durand 등, 1992). 특히 Franchini (1991, 1996)등은 TOPMODEL을 STANDFORD IV, SACRAWENTO, TANK, APIC, SSARR, XINAN JJANG, ARNO등의 모형과 비교하여 적용성의 우수함을 보여주었다.

TOPMODEL 개념에 근거한 홍수빈도해석에 관한 연구도 유출경로별 빈도 분포해석(Beven, 1984), 유역별 유출 유사 계수의 제안(Sivapalan 등, 1990)등으로 진행되었다. 특히 지형, 토질 혹은 식생의 공간적 분포를 활용하는 TOPMODEL의 구조와 지형정보시스템(GIS)과의 연계에 관한 연구는 Water Information System에서의 구현(Romanowicz 등, 1993), SPANS 모형 언어를 사용한 연구(Stuart 와 Stocks, 1993), GRASS에서의 모형화(Chairat 와 Delleur, 1993; Kim, 1996, 1997) 등으로 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다.

TOPMODEL은 다음과 같은 세 가지 기본 가정에 근거하여 사면유출 과정을 상당히 간략화시킨 함수적 구조로서 체계화된 것이다. 첫째는 유역 내에서의 포화 성향이 정상상태의 가정하에 나타내어 질 수 있다는 것이다. 이는 유역내의 지하수면의 공간적 분포상황이 지형 지수인, ln(a/tanB), (a는 등고선 길이당 누가면적, tanB는 지표면 경사)로 일컬어지는 유역내의 임의의 지점에서의 포화상태가 발생될 수 있는 정도를 나타낼 수 있다는 것이다. 이와 비슷한 가정하에서 출발된 '습도' 계수가 제안되기도 했다(O' Langhlin, 1986). 둘째 가정은 유역내 지하수면들의

동수경사가 지표면 경사인, tanB로 표현될 수 있다는 것이다. 따라서, 많은 상위 경사 지역으로부터의 배수면적과 상대적으로 완만한 경사를 가진 지역은 높은 지형지수, 즉 높은 포화 성향을 보여준다. 셋째 가정은 전달계수가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소한다는 것이다. 이 가정은 토양 투수계수의 자료나 등방가정에서의 투과함수 유도를 통해 검증되어졌다.(Beven, 1984). 이를 수식으로 표시하면,

$$T = T_0 \exp(-fZ) \tag{1}$$

여기서 T는 전달계수, T_0 는 흙이 포화되었을 때의 가로방향 전달계수, Z는 지하 수면까지의 깊이 그리고 f는 비례 상수이다.

임의의 지점에서 연속방정식과 방정식(1)을 조합하여 약간의 수식 전개를 수행하면 TOPMODEL의 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(Beven 등, 1983).

$$Z_x = Z + 1/f\ (\lambda - \ln(a/\tan B)_x) + 1/f\ (\ln T_0 - \ln T_e) \tag{2}$$

여기서 Z_x는 임의의 지점에서의 지하수면 깊이, Z는 유역내의 평균지하수면의 깊이, λ는 지형지수의 유역내 평균값 그리고 $\ln T_e$는 $\ln T_0$의 유역내의 평균값을 지칭한다.

위 식에서 유역의 평균지하수면과 유역내 임의의 지점에서 지하수면의 차는 지형지수의 평균값과 임의의 지점 값의 차와 전달계수의 평균값과 임의의 지점 값의 차이로 나타냄을 알 수 있다. 이는 지형지수와 전달계수의 공간적 분포 상황을 통해 유역의 공간적 수문거동도 추적할 수 있음을 의미한다.

지하수면, 강우강도 그리고 지표면 침투능의 공간적 분포로부터 다음과 같은 네가지 유출 경로의 발생 여부와 크기를 산정할 수 있다.

강우강도가 침투능보다 큰 지역에서는

$$Q_{horton} = \Sigma\ a_x\ |i\text{-}Ko|\ /\ A \tag{3}$$

지하 수면이 지표면과 같거나 큰 지역에 내리는 강우는

$$Q_{Dunne} = \Sigma\ a_x\ i\ /\ A \tag{4}$$

지하수면의 지표면 초과로 인한 지하수가 지표수로 유출되는 요소는

$$Q_{return} = \Sigma\ a_x\ |Z\ n_{drain}|\ /\ A \tag{5}$$

그리고 지하수의 하천 유출의 기여는

$$Q_b = (T_0 \tan B)_x \exp(-fz_x) \tag{6}$$

로 나타날 수 있는데 여기서 a_x는 각 조건을 만족하는 유역 면적, A는 전체 유역면적 , i는 강우 강도, K_0는 지표면 침투능, 그리고 n_{drain}은 유효 공극률이다.

3. TOPMODEL개념의 일반화

Ambroise(1996)등은 TOPMODEL의 기본가정 중 하나인 exponential한 투수계수의 감소를 완화하기 위한 연구를 실시하였다. 실제로 토양층 상단부에서 자주 발견되는 특성인 토양투수계수의 깊이에 따른 exponential한 감소양상은 (Beven, 1984) 기저유출 감쇄곡선에 중요한 영향을 미치기 때문에 복잡한 특성을 가진 자연유역 기저유출 감쇄곡선을 나타내는데는 한계가 있을 수 있다. Tallaken(1995)이 종합한 여러유역의 기저유출 감쇄곡선은 다음과 같은 두 종류의 함수로 나타난다. 첫째는 두꺼운 대수층과 전형적인 소하천에 의해 배수되는 지역에는

$$Q_b = Q_s \exp(-t/t_s) \tag{7}$$

와 같은 exponential function으로 나타나고
둘째는 얇은 대수층 지반의 화강암지역에서 잘 배수

되는 2 차 hyperbolic function으로 나타난다.

$$Q_b = Q_s (t/t_s)^{-2} \tag{8}$$

여기서, 비유량 Q_s 에 대한 비시간 t_s는 전통적인 TOPMODEL구조에서 나타나는 1차 hyperbolic function인

$$Q_b = Q_s (t/t_s)^{-1} \tag{9}$$

와 동일하다. 이것은 TOPMODEL이 충분한 보정을 거친후에도 긴 감쇄곡선에 대한 모의가 성공적이지 못하는 경우들에 대한 이유를 설명 해 줄 수 있다.

표 1은 세가지 형태의 투수계수 감쇄 즉 exponential, hyperbolic,linear 경우의 TOPMODEL 모형구조의 유도과정을 보여주고 있다. 이중 Linear 감쇄곡선 경우의 수식들은 O'Loughlin (1986)에 의해 제안된 것이다. 이들 세가지 가정의 유도는 각각 1차 hyperbolic, 2차 hyperbolic 그리고 exponential 기저유출 감쇄곡선의 형태로 유도됨을 알 수 있다.

Beven(1986)에 의해 제안된 토양 지형지수인 $a/(T_0\tan B)$, 또한 각 경우에 $\ln(a/T_0 \tan B)$, $\sqrt{a/T_0\tan B}$, $a/(T_0\tan B)$로 나타나며, 유역 평균값 역시 이들의 공간 평균값으로 사용되었다.

위 세가지 경우는 포화흐름 성분의 분포가 정상상태를 따른다는 공통적인 가정하에 이루어졌다. 이 가정은 수문반응의 유사성확인과 효율적인 계산방법을 제시함으로서 kinematic wave equation이나 확장 Dupuit-Forchheimer equation과 같은 복잡한 사면

표 1. 세 가지 가정에 근거한 TOPMODEL 주요 수식의 유도 (Ambriose 등 1996)

Note	exponential	parabolic	linear
Transmissivity	$T_{Di} = T_{0i}\exp(-D_i/m)$	$T_{Di}=T_{0i}(1-D_i/m)^2$	$T_{Di}=T_{0i}(1-D_i/m)$
discharge	$q_i=T_{0i}\tan\beta_i\exp(-\delta_i)$	$q_i=T_{0i}\tan\beta_i\exp(1-\delta_i)^2$	$q_i=T_{0i}\tan\beta_i\exp(1-\delta_i)$
relative storage deficit	$\delta_i=\ln(R\zeta_i)$	$\delta_i=1-\sqrt{R\zeta_i}$	$\delta_i=1-R\zeta_i$
mean relative storage deficit	$\bar{\delta}=-\frac{1}{A}\int_A \ln(R\zeta_i)dA$	$\bar{\delta}=\frac{1}{A}\int_A(1-R\zeta_i)dA$	$\bar{\delta}=\frac{1}{A}\int_A(1-R\zeta_i)dA$
	$\delta_i-\bar{\delta}=-[\ln\zeta_i-\gamma_l]$	$(1-\delta_i)/(1-\bar{\delta})=\zeta_i/\gamma_r$	$(1-\delta_i)/(1-\bar{\delta})=\zeta_i/\gamma_a$
spatial averages of the soil-topographic index	$\gamma_l=\frac{1}{A}\int_A\ln(\zeta_i)dA$	$\gamma_r=\frac{1}{A}\int_A\sqrt{\zeta_i}\,dA$	$\gamma_a=\frac{1}{A}\int_A\zeta_i dA$
total drainage from the saturated zones	$Q_b=\sum_{j=1}^{n} l_i\exp(-\delta)\exp(-\gamma_i)$	$Q_b=\sum_{j=1}^{n} l_j a_j(1-\delta)^2\gamma_r^{-2}$	$Q_b=\sum_{j-1}^{n} l_j a_j(1-\delta)\gamma_a^{-1}$
	$Q_b=Q_0\exp(-\bar{\delta})$	$Qb=Q_0(1-\bar{\delta})^2$	$Qb=Q_0(1-\bar{\delta})$
discharge ($\delta = 0$)	$Q_0=A\exp(-\gamma_l)$	$Q_0=A\gamma_r^{-2}$	$Q_0=A\,\gamma_a^{-1}$
the time function of the base recession curve	$dQ_b/d_t=-Q_b^2/Am$	$dQ_b/d_t=-2\sqrt{Q_0}Q_b^{3/2}/Am$	$dQ_b/d_t=-Q_0Q_b/Am$
baseflow recession curve	$Q_b=Q_s(1+\tau Q_s/Am)^{-1}$	$Q_b=Q_s(1+\tau\sqrt{Q_0Q_s}/Am)^{-1}$	$Q_b=Q_s\exp(-\tau Q_0/Am)$
	$Q_b/Q_s=(t/t_s)^{-1}$	$Q_b/Q_s=(t/t_s)^{-2}$	$Q_b/Q_s=\exp(1-t/t_s)$
time offset	$t_s=Am/Q_s$	$t_s=Am/\sqrt{Q_0Q_s}$	$t_s=Am/Q_0$

D_i : 토양포화결핍도
m : 투수계수감소계수
τ : 지체시간
t : 전도시간계수
Q_s : 비유량
T_{Di} : 투수계수
q_i : 유량
R : 재충전비
δ_i : 상대포화결핍도
ζ_i : 토양지형지수
$\bar{\delta}$: 평균상대포화결핍도
A : 유역면적
$\gamma_l, \gamma_a, \gamma_r$: 토양지형지수의 공간평균
l : 등고선폭
Q_0 : 평균포화결핍도 0일시 유출(δ = 0)
t_s : Am/Q_s

유출 모의가 보여줄 수 없는 기저유출에 대한 계산이나 매개변수 추정의 용의성을 보여준다.

4. 맺음말

이와 같이 Beven등에 의해 개발되어온 TOPMODEL은 그 자체가 결정된 모형구조라기 보다는 각기 상황에 따라 변형되고 응용될 수 있는 개념들의 집합체라 할 수 있다. 비교적 적은 수의 매개변수로 공간적 수문분포형상과 유출경로 추적을 실시할 수 있는 TOPMODEL은 진화하는 수문모형으로서 그 우수성이 입증되고 있다. 유역의 특성별로 모형의 구조를 자유롭게 변형시켜 활용할 수 있는 TOPMODEL은 복잡하고 과도한 매개변수 산정이라는 문제를 가지고 있는 상당수 수문모형이 보여 줄 수 없는 공간수문 분석기능과 모형구조의 유연성등을 보여줌으로써 많은 관심을 모으고 있다. 최근의 지리정보시스템(Geographic Information System)의 일반화는 수문모형이 단순한 유출추적기능만 아니라 수문기상분석, 수문공간분석, 수문수질분석등의 다양한 기능을 포함하는 형태로 발전해 나가야함을 의미하는 것으로 사료되므로 TOPMODEL에 대한 보다 많은관심과 연구가 필요하다고 생각된다.

〈참고문헌〉

Ambroise, B., J. Freer, and K. J. Beven,(1996). Application of a generalized TOPMODEL to the small Ringelbach catchment, Vosges, France, Water Resources Research, Vol. 32, pp. 2135-2145.

Beven, K. J., (1984). "Infiltration into a class of vertically non-uniform soils." Hydrological Science Journal, Vol. 29, pp. 425-434.

Beven, K. J., and Wood, E. F., (1983). "Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas." Journal of Hydrology, Vol. 65, pp. 139-158.

Chairat, S. and Delleur, J. W., (1993). "Integrating a physically based hydrological model with GRASS." HydroGIS 93:Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources, IASH Pubn. No. 211, pp 143-150.

Franchini, M. et al., (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL" Journal of Hydrology, Vol. 175, pp. 293-338.

Hornberger, G. M., Beven, K. J., Cosby, B. J. and Sappington, D. E., (1985). "Shenandoh Watershed Study: Calibration of a Topography-Based, Variable Contributing Area Hydrological Model to a Small Forested Catchment." Water Resour. Res. Vol. 10, pp. 1841-1850

O'Loughlin, E. M., (1986). "Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis." Water Resour. Res., Vol. 22, pp. 794-804.

Robson, A. J., Whitehead, P. G. and Johnson, R. C., (1993). "An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhidder catchments." Journal of Hydrology, Vol. 145, pp. 357-370.

Romanowicz, R., Beven, K. J. and Moore, R. V., (1993). "GIS and distributed hydrological models." in P M Mather(Ed.), Geographic Information Handling-Research and Applications, Wiley, Chichester, pp. 197-205.

Kim, S., (1996). "Hydrologic and water quality modeling of agricultural watersheds equipped with tile drains using a geographic information system and fractal concepts." Ph. D. dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, U. S. A..

Kim, S and J. W. Delleur,(1997). "Sensitivity Analysis of Extended TOPMODEL for Agricultural Watersheds Equipped with Tile Drains". Hydrological Processes, Vol. 11, pp. 1243-1261.

Sivapalan, M., Wood, E. F. and Beven, K. J., (1990). "On Hydrological Similarity:3. A dimensionless flood frequency distribution." Water Resour. Res., Vol. 26, pp. 43-58.

Stuart, N. and Stocks, C., (1993). "Hydrological modeling within GIS: an integrated approach, in HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources." IAHS Publ. no. 211, pp. 319-329.

Tallaksen, L. M.,(1995) A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology, Vol. 165, pp. 349-370.