

산지유역 지하수 개발을 위한 TOPMODEL의 이용

김 상 준 | 경원대학교 토목환경공학과 교수
윤 성 용 | 안산공대 토목공학과 교수

1. 머리말

요즈음 물부족 문제가 국가적인 관심사로 되면서 지하수의 중요성이 커지고 있다. 지하수는 총량적으로 보면 지표수에 비해 소량이나 지표수가 갖지 못하는 나름대로의 장점을 가지고 있다. 예컨대 지하수는 땅속에 존재하므로 극심한 가뭄시에 비상용으로 활용할 수 있고, 지표수의 공급체계가 미약한 산간 지역이나 농촌 지역에서 자체적인 물공급 시스템의 역할을 할 수 있으며, 혹은 일반적으로 지표수에 비하여 수질이 양호하므로 음용수로 사용하기에 적절하다. 우리나라는 국토의 대부분이 산지이며 특히 충적층의 발달이 미약하므로 지하수를 저장할 수 있는 자연적인 저류 영역이 작다. 다시 말하자면 수자원의 이용면에 있어서는 우기에 많은 강우가 집중되는 기후적인 취약성과 더불어 지형학적인 혹은 지질학적인 취약성도 있는 것이다. 우기에 집중되는 강수를 잡아두기 위해서는 댐을 만드는 것이 가장 효과적이거나 지표에 건설하는 댐과 더불어 땅속에 존재하는 지하수를 적절히 관리하고 이용하는 것도 수자원 확보에 많은 도움을 줄 수 있다(건설교통부·한국수자원공사, 2001).

지하수는 수문학적인 관점에서 볼 때는 지표수와 떼어 생각할 수 없다. 요즈음 하천의 건천화를 막기 위하여 우수의 침투량을 늘리기 위해서 유역의 피복 조건을 개선하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있는데 이는

유역 내에서 지하로 침투한 물이 많을수록 지표수인 하천수의 마름증을 덜 수 있다는 간단한 예이기도 하다(김상준, 2002). 따라서 산지 유역의 지하수의 양과 흐름 특성을 파악하기 위해서는 유역 전반에 대한 지하수 혹은 지표수의 유출 구조를 파악해야 하는 것이 우선적인 과제가 된다. 주지하는 바와 같이 지하수는 중요한 지하자원이지만 일반적인 지하자원과는 다르다. 여기서 자원으로서의 지하수의 특성을 요약하여 열거한다면,

- 1) 조사 및 해석상의 난해성 : 지하수는 땅속에 존재하면서 계속적으로 유동하므로 조사와 해석이 난해하다.
- 2) 광역성 : 지하수는 일반적으로 넓은 면적에 분포하며 땅이 있는 곳이면 어느 곳에서도 존재하는 광역적인 자원이다.
- 3) 연관성 : 한 곳의 지하수를 퍼내면 인근 지역의 지표수나 지하수가 영향을 받는다.
- 4) 영속성 : 지하수는 꺼내서 사용하면 언젠가는 그 자리에 다시 지표수로 채워지는 경우가 많으므로 일반적인 지하자원에 비한다면 영속적이다.
- 5) 취약성 : 지하수는 한번 오염되면 다시 환원하는데 많은 노력과 비용이 요구된다.

지하수를 개발하기 위하여서는 유역내의 물의 저류 상황과 순환과정에 대한 정량적인 정보가 필요하다. 산

지 유역은 일반적으로 침투율이 크므로 지표 흐름에 대한 지하 흐름의 비중이 크며 극단적으로는 지표 흐름이 없어도 많은 양의 직접 유출이 발생할 수 있는 특성을 가지고 있다. 다시 말하자면 산지 유역에서는 지표수와 지하수의 상호 연관성 혹은 순환성이 크다는 의미이다. 본고에서는 산지 유역의 물 순환을 파악하기 위한 수문/수리학적 모형의 일례를 소개하여 산지 유역 지하수 개발 및 해석상의 이해를 제고하고자 한다.

2. 산지유역 지하수 해석을 위한 TOPMODEL의 이용

전술한 바와 같이 산지 유역의 지하수 해석 모형의 조건으로는 지표/지하 강우 유출 구조를 기술할 수 있어야 하며, 여기에 더불어 고저차가 심하고 지형의 굴곡이 심한 산지 유역 특성을 반영할 수 있는 모형이 필요하다. 여기서는 이러한 조건에 부합하는 모형으로서 TOPMODEL을 그 일례로 채택하여 간략히 기술하기로 한다.

2.1 개요

TOPMODEL은 Beven과 Kirby에 의해 시작된 이후, 1997년 Window Version이 개발되기까지 많

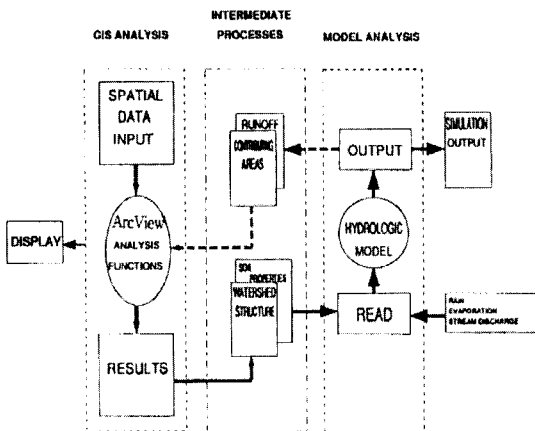


그림 1. Arc/View와 TOPMODEL의 연결계통도

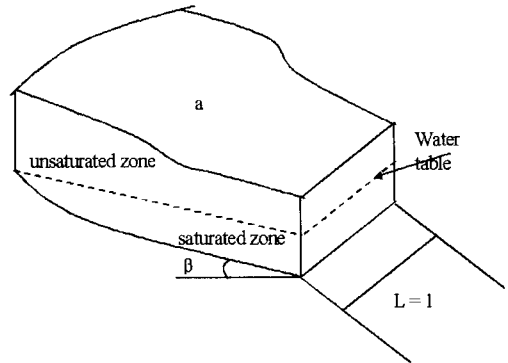


그림 2. 지형인자의 계산에 사용된 변수 (Chairat, 1993)

은 학자들에 의해 연구되고 보완/수정을 거치며 발전하였다(Beven과 Wood, 1983 ; Robson 등 1993). 근자에는 TOPMODEL과 지형정보시스템(GIS)과의 연계에 관한 연구가 주류를 이루며, SPANS모형 언어를 사용한 연구(Stuart와 Stocks, 1993), GRASS에서의 모형화(Chairat와 Delleur, 1993), DTM(Digital Terrain Analysis) 개발(Quinn 등, 1995), AVTOP모형 개발(Huang과 Jiang, 2002)을 그 예로 들 수 있다. 그림 1은 Arc/View와 연계된 계통도를 나타낸다.

2.2 기본 이론

TOPMODEL의 개념(그림 2 참조)에는 다음과 같은 세개의 기본 가정이 있다.

- 가정 1 : 포화층의 거동은 연속적인 정상상태이다.
- 가정 2 : 포화층의 동수경사는 지표지형경사와 같다.
- 가정 3 : 전달계수가 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수함수적으로 감소한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T = T_0 \exp(-S/m) = T_0 \exp(-fz) \quad (1)$$

여기서 T 는 전달계수, T_0 는 포화상태의 횡방향 전달계수, S 는 지역적 저류 부족량, z 는 지하수면까지의 깊이, m 과 f 는 매개변수이다.

지점 i에서 단위 등고선 길이당 하향의 지하수 유출량은 다음식과 같다.

$$q_i = -T_0 \tan \beta e^{-fz_i} = ra_i \quad (2)$$

여기서 $\tan \beta$ 는 지형경사도, ai 는 지점 i를 통해 배수되는 단위등고선 길이 당 경사면의 면적, r는 지하수위로 유입되는 충전량을 나타낸다. 식(2)를 z_i 에 대해서 정리한 후 전유역에 대한 평균치(\bar{z})를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{z} = z_i - \frac{1}{f} \left[\lambda - \ln \frac{a}{T_0 \tan \beta} \right] \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum \ln \frac{a}{T_0 \tan \beta} \quad (4)$$

여기서, \bar{z} 는 평균지하수위, A는 유역 총면적, $\ln \frac{a}{T_0 \tan \beta}$ 는 토양 지형상수이다. T_0 가 일정하면 식(3)과 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda = E \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} \right] - \ln T_0 \quad (5)$$

$$z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} - E \left[\ln \frac{a}{\tan \beta} \right] \right] \quad (6)$$

식(6)에서 알 수 있는 바와 같이 지하수위의 깊이 z_i 는 f와 지형상수($\ln \frac{a}{\tan \beta}$), 그리고 \bar{z} 에 의해 결정할 수 있다. 매개변수 f와 지형상수는 흐름의 거동을 대표하는 인자로서 이러한 값들은 유역 상호간의 수문학적 유사성을 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다.

2.3 시범유역에의 적용

TOPMODEL을 적용하기 위한 유역으로서 IHP 대표 유역(국제수문개발계획 연구보고서.1996 2001, 건설교통부)인 보청천, 위천 유역과 보청천 소유역인 삼성유역, 그리고 위천 소유역인 동곡유역 등을 대상 유역을 선정한다. 표 1은 각 유역에 대한 유역특성을 보여주고 있는데 전형적인 산지유역의 특성을 나타내고 있다(그림 3, 그림 4 참조). 한편 TOPMODEL에서 사용되는 지형정보를 얻기 위해 Arc/View를 이용하여 대상유역의 격자망을 표 2와 같이 결정하였다.



그림 3. 보청천 대표유역도



그림 4. 위천 대표유역도

표 1. 유역의 특성

유역	보 청 천		위 천	
	IHP 대표유역	삼성 소유역	IHP 대표유역	동곡 소유역
유역면적(km ²)	476	73	473	107
유로연장(km)	735	13	43	22
형상계수(F)	0.166	0.185	0.258	0.318
하도밀도(Dd)	0.111	0.401	1.57	1.49
유역평균경사(J, rad)	0.18	0.31	0.34	0.37

표 2. 대상유역의 격자망

격자망 \ 유역	보청천		위천	
	IHP 대표유역	삼성 소유역	IHP 대표유역	동곡 소유역
행(row)	96	88	130	96
열(column)	88	60	91	80
격자간격(m)	300	150	300	150

표 3. 추정된 매개변수

매개변수 \ 유역	보청천		위천	
	IHP 대표유역	삼성 소유역	IHP 대표유역	동곡 소유역
m(m)	0.008	0.15	0.087	0.157
lnT ₀ (ln m ² /h)	13.81	10.5	11.88	10.55
SRmax(m/h)	0.05	0.022	0.032	0.05
SRint(m/h)	0.05	0.09	0.05	0.05
Chvel(m/h)	3600	3600	3600	3600

표 4. 매개변수의 최적화 기준에 따른 계산결과

기준 \ 유역	보청천		위천	
	IHP 대표유역('96)	삼성 소유역('96)	IHP 대표유역('97)	동곡 소유역('96)
Efficiency	0.29	1.04E-4	0.017	-0.332
SSE	0.058	0.010	0.294	0.001
SLE	2500	322	1720	2530
SAE	2.279	0.727	1.959	0.214
Balance	5.03E-7	4.36E-7	2.91E-7	5.72E-7

격자망으로 구상된 유역의 지형자료를 DTM(Digital Terrain Analysis)에 입력하여 sink항을 제거하였고 이들 자료를 이용하여 $\frac{a}{\tan \beta}$ 의 분포도와 각 격자망에 대한 $\frac{a}{\tan \beta}$ 의 값을 발생하였다.

보청천과 위천유역의 관측 자료는 IHP 보고서에서 일우량, 일증발산, 일유량자료를 이용하였다. TOPMODEL에 사용되는 매개변수는 10여 가지이나 중요 매개변수는 감소상수 m, 포화상태의 횡방향 저탈계수의 대수값 lnT₀, 식생 뿌리구간의 물보유능력 SRmax, 식생 뿌리구간의 물부족량 SRint 그리고 유역하도내의 유속 Chvel 등 5가지이다. 1996년도의 보청천과 위천의 해당유역 강우-유출사상에 대한 각 변수의 추정을 물리적으로 타당한 범위 안에서 Monte-Carlo방법을 이용하여 실시하였으며 변수의 산정 기준은 Nash와 Sutcliffe Criterion (Efficiency, 재현정도)와 SSE를 기준으로 실시하였다. 재현정도(Efficiency)는 (1-오차의 분산)/측정유

량 분산값이다. 깊이에 따른 투수계수 감소곡선을 나타내는 매개변수 m은 매우 민감하고 모형의 보정에 중요한 역할을 차지하므로 결정을 신중히 하였다. lnT₀의 포화투수계수 값은 실제 측정된 투수계수 값보다 크게 추정되고 격자간격에 의해 그 값이 변하기 때문(Franchini 등, 1996)에 물리적인 값보다는 보정된 매개변수 값을 사용하였다. 상대적으로 SRint, Chvel 등의 변수는 상대적으로 덜 민감함을 알 수 있었고 결국 장기유출을 모의하는 경우 m, lnT₀, SRmax의 3가지가 중요변수가 된다. 추정된 매개변수의 결과를 표 3에 기술하였다. 결정된 매개변수값으로 계산된 재현정도의 값과 그 외의 변수 산정기준에 대한 계산결과를 표 4에 제시하였다. 표 4에서 SSE와 SLE는 각각 모든 시간격자의 측정유량과 계산유량의 오차에 대한 제곱합과 대수 제곱합이다. 또한 SAE는 모든 시간격자의 측정유량과 계산유량의 오차에 대한 절대합이다.

각 유역의 1996년 강우-유출사상에 대해 결정된 매개변수를 이용하여 1997년의 유출에 대한 모의 결과를 그림 5과 그림 6에 나타내었다. 여기서 모의 결과는 대부분 양호하다. 그러나 위천 유역의 결과는 기

저유량에 대해서는 잘 모의했지만 침투유량에 대한 모의가 미흡하다는 것을 알 수 있다. 위천 유역의 경우에는 유역출구 부근에 좌우 하천이 대칭적으로 놓여 있을 뿐만 아니라 이들 좌우 유역의 지형적 특성도

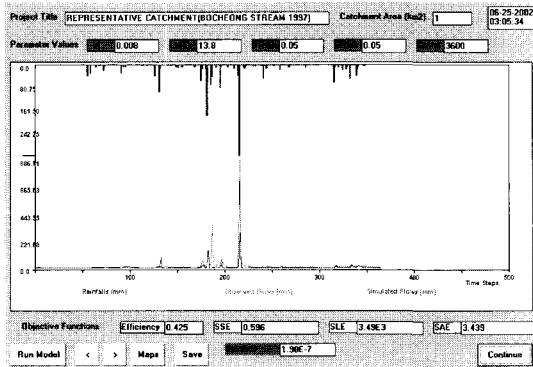


그림 5. 보청천 대표유역의 유출모의 (1997년)

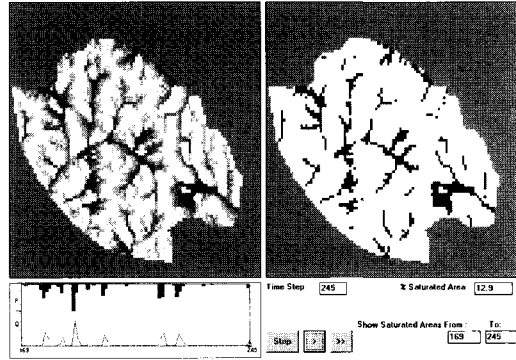


그림 8. 동곡 소유역의 포화 영역 ('97.6.5 - '97.8.31)

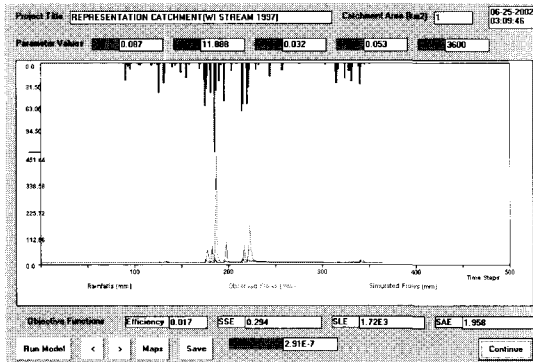


그림 6. 위천 대표유역의 유출모의 (1997년)

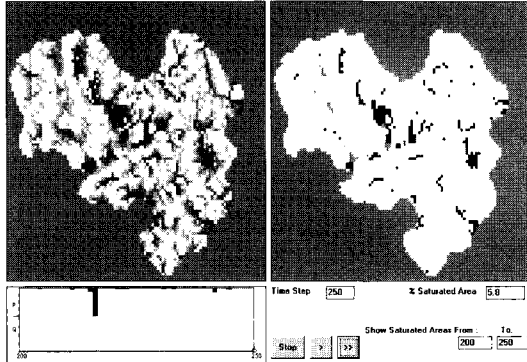


그림 9. 보청천 대표유역의 최대 포화 영역 (1997년)

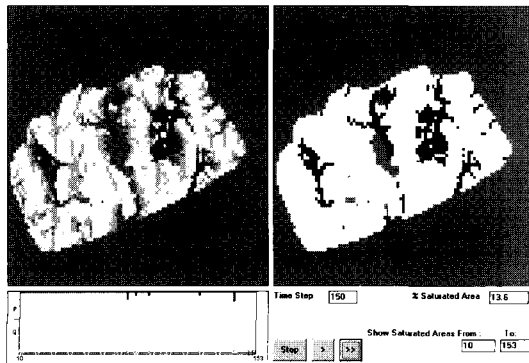


그림 7. 삼성 소유역의 포화 영역('96.1.1 - '96.6.26.)

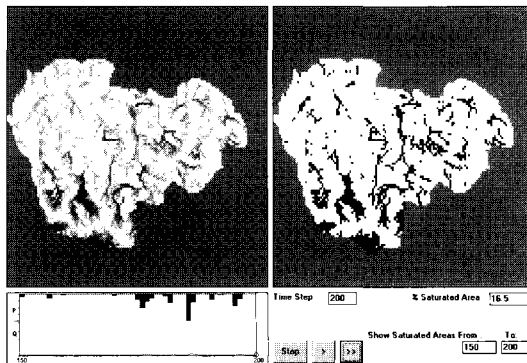


그림 10. 위천 대표유역의 최대 포화 영역 (1997년)

표 5. 포화면적과 유출비율의 결과 (%)

결과	보 청 천				위 천			
	IHP 대표유역		삼성 소유역		IHP 대표유역		동곡 소유역	
	96	97	96	97	96	97	96	97
최소 포화면적	5.8	3.9	13.6	13.6	10.3	12.3	10.3	8.0
최대 포화면적	28.3	7.5	17.8	22.6	16.0	21.8	16.0	12.9
포화면적의 유출비율	29.16	7.11	18.53	37.89	47.48	20.11	50.87	73.78
기저유출	70.84	92.88	81.46	62.11	52.52	79.89	49.12	21.19

다르게 나타나기 때문에 전체유역을 하나의 유역으로 보고 첨두유량을 모의하는 것이 무리가 있었다고 판단된다.

포화영역은 강우발생에 따른 지표면 유출과 중간유출이 발생하는 영역이라는 물리적 의미를 갖는 기여면적(contribution area)에 해당한다. TOPMODEL에서 포화영역은 지정한 시간대별로 동영상으로 처리된다. 최대, 최소 포화영역의 비율에 해당하는 일자를 검색해보고 일자를 고정하여 일정기간에 정지된 포화영역의 화면이 그림 7 그림 10에 제시되어 있다. 그림에서 포화영역의 비율이란 전유역의 면적에 대한 포화영역 면적의 비를 뜻한다. TOPMODEL에서는 전체유역면적에 대한 포화면적의 최대, 최소 비율과 포화면적을 통한 총유출에 대한 유출비율 그리고 기저유출의 비율에 대한 결과가 도출되며 표 5는 그 결과를 보여주고 있다.

유출 모의를 위해서는 1년간의 장기일자료(일강우량, 일증발산량, 일유출량)를 사용했으며 1996년에 획득된 자료로 매개변수를 추정하여 모형을 보정하였고 이를 1997년에 적용하여 모형을 검증하였다. TOPMODEL의 적용결과 만족할 만한 모의 결과를 얻을 수 있었다. TOPMODEL은 장기유출을 모의하는 경우 단지 3개의 매개변수(m , $\ln T_0$, SR_{max})만이 필요하므로 비교적 간단한 모형이며 시각적인 자료 제공이 우수하다. 강우사상에 대한 포화유역의 형상은 일자별로 그 분포도의 변화를 알 수 있었으며 이들 포화영역의 분포도는 천층지하수를 개발 가능지점을 평가하기 위한 자료가 될 수 있다. 또한 최대포화면적은 지하 Storage의 증대를 가져오는 지하댐 등의 지하저류시설 개발시 저류량과 개발 가능량을 산

정하는데 유용하게 사용할 수 있다. 각 유역에 대한 모의 결과 유역의 경사도가 클수록 총유출에 대한 기저유출의 비율은 작아지며 유역면적이 커질수록 기저유출의 비율이 크다. 산지 유역의 천층 지하수는 강우사상에 대한 의존도가 크며 지하댐 등의 지하 저류시설이 필수적으로 설치되어 저류량을 증대하여야만 개발이 가능하다. 결국 TOPM-ODEL을 통하여 산지 유역의 수문특성을 파악할 수 있고 지형정보를 이용한 지하수 개발 가능지점 및 개발량에 대한 정보를 제공할 수 있다.

3. 맺음말

산지 유역의 지하수 개발은 지역의 특성과 주변 여건을 고려하여 구체적인 상황 인식하에서 이루어져야 한다. 우리나라의 경우 댐 건설과 광역 상수도의 확충으로 혜택을 보는 곳은 주로 대도시 지역을 중심으로 되어 있고 산간 지역은 상대적으로 소외되어 있다. 따라서 지하수 자원을 이용하는 산지유역의 용수 확보는 수자원의 균형적인 보급과 이용이라는 측면에서 의미가 있다. 또한 지하 관정을 개발하여 갈수기에 취수하고 풍수기에 재충전하는 이용 효율을 높이기 위해서는 지하댐 등과 같은 구조물에 의한 저류지 확보가 필요하다. 그동안 산지 지역에 많은 지하댐 시공 사례가 있으나 고저 굴곡이 심한 산지의 흐름 및 유출을 잘 이해하지 못하여 소기의 목적을 이루지 못한 사례가 많다. 지하수 개발은 지표수의 경우와는 달리 소규모이며 광역적이라는 특성이 있으며 산지 지역에서는 특히 이러한 특징이 두드러진다. 따라서 시공간적

으로 끊임없이 변화하는 수자원의 유동상황을 보다 정확하게 파악할 수 있는 수문/수리 모형이 유역 전체를 대상으로한 효율적인 관리 시스템을 수립하는데 절실히 필요한 시점에 있다. TOPMODEL은 이러한 목적을 위하여 유용하게 사용될 수 있을 것이다. TOPMODEL의 특징을 한마디로 요약하면 단순성과 시각적 예측성이다. 즉 추정하여야 할 매개변수가 적 으면서도 효율면에서 매우 우수한 것으로 알려지고 있다. 그러나 분산형 모형으로서의 TOPMODEL의

이론과 이용성은 추후로도 많은 연구가 필요하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참/고/문/헌

- 건설교통부, 1996 2001, 국제 수문개발 계획 (IHP) 연구보고서.
- 건설교통부·한국수자원공사, 2001, 수자원장기종합 계획보고서
- 김계현, 1998, GIS 개론, 대영사.
- 김상준, 2002, 탄천수계 하천 유지용수 확보방안 연구, 성남시.
- 한국건설기술연구원, 1995, 강우예보의 시공간 특성을 고려한 홍수예보모형의 개발
- Acharya, R.C., Leijnse, A., 2002, Recovery of hydrocarbons: A perspective through HYPON, 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague,.
- Bathurst, J.C., Wicks, J.M., and O'Connell, P. E., 1995, The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system, in Computer models of watershed hydrology edited by V.P. Singh, pp 563-594.
- Beven, K. J., and Kirkby, M. J., 1979, A physically based variable contributing area model of basin hydrology Hydrol. Sci. Bull., 24(1), pp 43-69.
- Beven, K. J., and Wood, E. F., 1983, Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas, J. of Hydrol. 65, pp 139-158.
- Beven, K. J., 1997, TOPMODEL ; A Critique, Hydrological Processes, Vol. 11, pp 1069-1085.
- Bierkens, M.F.P., 2002, Using stochastic simulation and cost model to designing monitoring networks for groundwaetr pollution, 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague,, pp 310-314.
- Huang, B. and Jiang B., 2002, AVTOP ; a full integration of TOPMODEL into GIS, Environmental Modelling & Software, 17, pp 261-268.
- Calver A., Wood, W. L., 1995, The institute of hydrology distributed model, in Computer models of watershed hydrology edited by V. P. Singh, Water Resources Publications, pp 595-626.
- Chairat, S. and Delleur, J. W., 1993a, Effects of the topographic index distribution on the predicted runoff using GRASS, Proc. Amer. Water Resour. Assoc. Symp. on Geographic Information Systems in Water Resources, Mobile, Al. March.
- Chairat, S. and Delleur, J. W., 1993b, Integrating a physically based hydrological model with GRASS, in K Kovar and H P Nachtnebel (Eds). HydroGIS 93: Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources, IAHS Pubn. No. 211, pp 143-150

- Chairat, S. and Delleur, J. W., 1993c, Effects of the topographic index distribution on predicted runoff using GRASS, *Water Resour. Bull.*, 29(6), pp 1029-1034
- Dagan, G., 2002, Flow and transport in highly heterogeneous formations : Conceptual uncertainty and solution for multi-indicator permeability structure, 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague,, pp 139-142.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. and Todini, E., 1996, Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL, *J. Hydrology*, 175, pp 293-338.
- Quinn, P. F., Beven, K. J. and Culf, A., 1995, The introduction of macroscale hydrological complexity into land surface-atmosphere transfer function models and the effect on planetary boundary layer development, *J. Hydrology*, 166, pp 421-444.
- 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 in the TOPMODEL framework. *Hydrol. Process*, 9, pp 161-182.
- Robson, A. J., Neal, C. and Beven, K. J., 1995, Linking mixing techniques to a hydrological framework - an upland application, to appear in S Trudgill (Ed.) *Solute Modelling in Catchment Systems*, Wiley, pp 347-370
- Robson, A. J., Whitehead, P. G. and Johnson, R. C., 1993, An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments, *J. Hydrol.*, 145, pp 357-370.
- Stoppelenburg, F.J., Kovar, K., Pastoors, M.J.H., Tiktak, A., Leijnse, A., 2002, Two-way coupling of 1-D unsaturated-saturated flow model SWAP with 3D saturated regional groundwater flow model LGM:time-average coupling approach, 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague,, pp 575-580.
- Stuart, N. and Stocks, C., 1993, Hydrological modelling 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.
- Valstar, J., Minnema, B., 2002, Using a Bayesian estimation algorithm for estimating parameter uncertainty and optimisation of monitoring networks, 4th International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Prague,, pp 299-301.