

지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석연구

Runoff Analysis of Modified TOPMODEL with Subsurface Storm Flow Generation Mechanism

이 학 수* / 한 지 영** / 김 경 현*** / 김 상 현****

Lee, Hak Su / Han, Ji Young / Kim, Kyung Hyun / Kim, Sang Hyun

Abstract

This paper investigates the applicability of a modified version of TOPMODEL considering shallow subsurface storm flow in a forested mountaneous catchment. The macroporous soil structure provides a hydrological pathway for rapid runoff generation. A modified version of TOPMODEL introduces the two-storage system to analyze the hydrograph recession including rapid subsurface storm flow component. The two-month continuous hydrologic simulations of sulmachun watershed suggest that a modified version of TOPMODEL represents comprehensive and realistic flow generation mechanism comparing to those of an original version of TOPMODEL. The results of parameter calibration with Monte-Carlo method indicate a modified version of TOPMODEL produces a set of physically meaningful parameters.

keywords : TOPMODEL, Subsurface Storm Flow, Runoff Analysis

요 지

본 연구에서는 지표하층과 암반층 사이의 지표하흐름을 기존 TOPMODEL의 구조에 연계시킨 수정 TOPMODEL의 국내 유역 적용성을 검증하였다. 지표하층에 존재하고 있는 대공극은 신속한 유출발생을 위한 수문경로를 제공하고 있으며, 수문감쇠곡선 분석을 위한 이중저류체계의 필요성을 의미한다. 실마천 유역을 대상으로 2개월간의 연속적인 유역수문거동을 모의한 결과 수정 TOPMODEL은 기존 TOPMODEL에 비해 유출발생과정을 보다 포괄적이고, 현실적으로 재현할 수 있는 것으로 밝혀졌다. Monte-Carlo 방법을 도입한 매개변수 산정결과도 수정 TOPMODEL의 경우가 물리적으로 타당한 것으로 밝혀졌다.

핵심용어 : TOPMODEL, 지표하 흐름, 유출 분석

- * 부산대학교 청정공학협동과정 석사과정
Graduate Student, Dept. of Clean Technology, Pusan National Univ. (E-mail : haksulee@hanmail.net)
- ** 부산대학교 환경공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Environmental Engrg. (E-mail : blanc1107@hanmail.net)
- *** 부산대학교 환경기술·산업개발연구센터 연구원
Research Assistant, IETI Pusan National Univ. (E-mail : validity@pusan.ac.kr)
- **** 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. (E-mail : kimsangh@pnu.edu)

1. 서 론

유역 수문과정의 구체적인 기술은 유역내 수문과정에 대한 보다 정확한 물리적 해석을 하는데 기여할 뿐만 아니라, 수문곡선 예측력 향상에 도움을 준다. 강우시 유역의 총유출 수문곡선은 일반적으로 지표면 유출량, 수로상 강수, 조기 지표하 유출량, 지연 지표하 유출량, 지하수 유출량에 의해 구성되는데(윤용남, 1998), 이들 중에서 시간적으로 지연된 지연지표하 유출량과, 다른 유출수에 비해 적은 양으로 고려되는 수로상 강수를 제외한다면 대부분의 흐름기여분은 지표면 유출량, 조기 지표하 유출량(이하, 지표하 유출량이라 한다.), 지하수 유출량에 의해 구성되는데, 이들의 유출량에 대한 기여정도를 알기 위해 N-day법, 수평직선 분리법, 지하수 감수곡선법 등이 사용되고 있으나(Chow, 1988), 이들의 기여분에 대한 정확한 해석은 유역마다 다를 것으로 판단되며, 실제 유역의 지형과 지질 등을 고려한 유역유출모형이 필요하다고 판단된다.

강우시 일시적으로 생성되는 지표하 흐름층의 존재는 여러 연구에서 밝혀졌으며(Barling 등, 1994; Hammermeister 등, 1982a, 1982b; Lowery 등, 1982; Scanlon 등, 2000), 이 흐름의 중요도 또한 여러 문헌에서 강조되고 있다(Hewlett 과 Hibbert, 1965; Whipkey, 1965; Weyman, 1973). 지표하 흐름층의 형성은 낮은 투과도를 가지는 토양층 위에 위치한 토양층내의 흐름이거나, 천천히 수직배수되는 침윤선 위의 가로방향 흐름이거나, 또는 지표부근의 생물이나 식생뿌리의 영향에 의해 형성된 대공극을 따른 흐름, 또는 이들의 복합적인 거동으로 해석하고 있다(Scanlon 등, 2000).

이렇게 형성된 지표하 흐름은 유역내 식생분포와 토양수분분포, 유출 생성, 에너지 흐름, 고형상 물질 이송과 밀접한 관련성을 가지고 있으므로(Scanlon 등, 2000; Wigmosta 와 Lettenmaier, 1999), 이에 대한 정확한 묘사는 지하흐름과정에 대한 물리적 해석을 가능하게 한다. 수문유출과정의 경로별 추적에 대해서는 TOPMODEL을 국내에 적용한 선행연구사례가 있다(김상현과 김경현, 1999; 정선희와 김상현, 1999).

본 연구에서는 지표하 흐름에 대한 고려를 하지 않는 기존의 TOPMODEL과 달리 지표하 흐름을 고려해 줄 수 있도록 두 개의 지하저류층을 고려하는 수정된 TOPMODEL을 사용하여(Scanlon 등, 2000) 지

표하 흐름과 지하수 흐름의 유역수문응답에 대한 기여도를 분석하고, 기존의 TOPMODEL과도 비교분석한 후, 산악지형에 대해 지표하 흐름층이 지니는 물리적인 의미에 대해서도 검토해 보는 것을 목적으로 한다.

2. TOPMODEL 구조

2.1 TOPMODEL

TOPMODEL은 소유역 강우-유출 관계를 해석하는 개념적 모형으로서, 유역내 강우에 의한 지하수 흐름을 식(1)로 기술하고 있다(Beven 과 Kirkby, 1977, 1979).

$$q_i = A_{si}\gamma \quad (1)$$

여기서 $A_{si}(=A_i/b_i)$ [m]는 단위등고선 길이 b_i [m]에 대한 상부기여면적 A_i [m^2]의 비이며, γ [m/hr]는 강우의 지하수 흐름으로의 기여분으로서, 공간적으로 균일분포한다고 가정한다. 식(1)은 토양투수량계수의 깊이에 따른 지수함수적 감소모형을 사용하여 식(2)로 표현가능하다(Beven, 1982).

$$q_i = T_i(z_i) \exp(-fz_i) \tan \beta_i \quad (2)$$

여기서, T_i 는 지표포화 투수량계수 [m^2/hr], f 는 투수량계수 감소율, z_i [m]는 지하수층까지 깊이, $\tan \beta_i$ 는 지하수층의 경사인데 지표경사와 같다고 가정한다. T_i 를 공간적으로 균일하다고 가정하면 유역내 지하수층의 변화는 식(1), (2)에 의해 식(3)으로 표현된다.

$$z_i = z_{av} + \frac{1}{f} \left[\frac{1}{A_i} \int_0^{A_i} \ln\left(\frac{A_{si}}{\tan \beta_i}\right) dA - \ln\left(\frac{A_{si}}{\tan \beta_i}\right) \right] \quad (3)$$

A_i 는 유역총면적 [m^2]이며, z_{av} [m]는 유역평균 지하수층 깊이이다. 지표면 흐름은 $z_i < 0$ 인 곳에서 생성되며 식(4)를 만족하는 지점에서 생성된다.

$$\ln\left(\frac{A_{si}}{\tan \beta_i}\right) \geq fz_{av} + \frac{1}{A_i} \int_0^{A_i} \ln\left(\frac{A_{si}}{\tan \beta_i}\right) dA \quad (4)$$

지하수 흐름의 유출기여량은 식(5)로 표현된다.

$$Q_{gw} = Q_0 \exp\left(-\frac{\bar{S}_{gw}}{m_{gw}}\right) = \frac{d\bar{S}_{gw}}{dt} \quad (5)$$

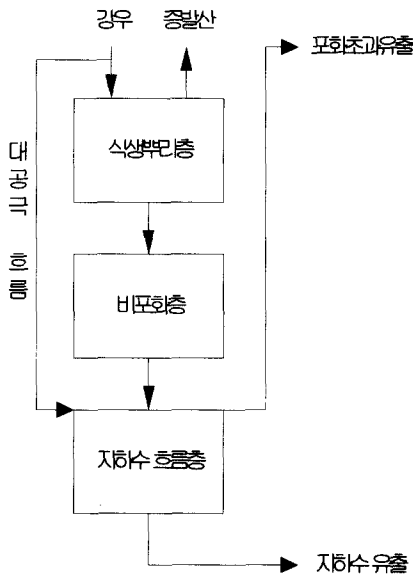
$Q_0 [m/hr]$ 는 지표포화시 지하수흐름량, $\bar{S}_{gw} [m]$ 는 평균 지하수 저류부족량, $m_{gw} [m]$ 는 지형과 토양수리특성에 관련한 매개변수이다. 지하수층으로의 유입량이 없을 경우 지하수 감소는 식(5)에 의해 식(6)으로 표현된다.

$$\frac{1}{Q_{gw}} - \frac{1}{Q_s} = \frac{\tau}{m} \quad (6)$$

여기서 $Q_s [m/hr]$ 는 지하수 유출량 감소시작시 지하수 유량이며, $\tau [hr]$ 는 지하수 감소가 시작된 시간을 기준으로 한 경과시간이다.

2.2 지표하 흐름을 고려한 TOPMODEL

지표하 흐름을 고려한 TOPMODEL과 이를 고려하지 않는 기존 TOPMODEL의 모형구조는 그림 1과 같다.



(a) 기존의 TOPMODEL 구조

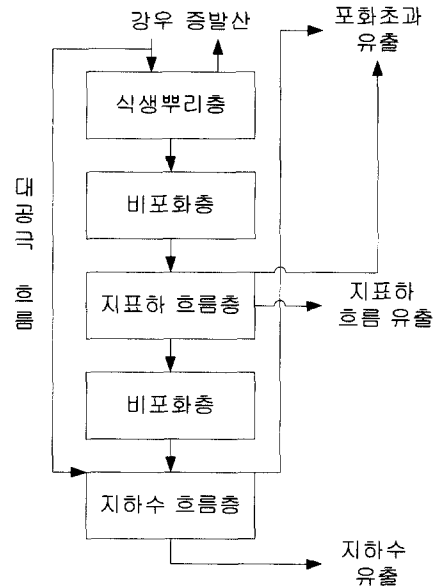
기존 TOPMODEL에선 3개의 지하 저류층을 고려하지만, 수정 TOPMODEL은 강우시 일시적으로 생성되는 지표하 흐름층을 고려할 수 있도록 2개의 지하 저류층(지표하 흐름층과 비포화층)을 모형구조내에 추가하여 5개의 지하 저류층으로 구성된다. 즉, 모형구조는 지표하 흐름층의 고려여부에 따라 구별됨을 알 수 있다. 각 지하 흐름층의 저류부족량은 식(7)과 식(8)로 표현된다(Ambrose 등, 1996).

$$S_{sf} = S_{\max_{sf}} - \frac{a/\tan\beta}{\frac{1}{A_t} \int_A (a/\tan\beta) dA} \quad (7)$$

($S_{\max_{sf}} - \bar{S}_{sf}$)

$$S_{gw} = \bar{S}_{gw} - \frac{m_{gw}}{A_t} \int_A \ln(a/\tan\beta) dA - m_{gw} \ln(a/\tan\beta)_{gw} \quad (8)$$

여기서, $S_{sf} [m]$ 는 지표하 흐름층의 저류부족량, $S_{\max_{sf}} [m]$ 는 지표하 흐름층의 최대저류부족량, \bar{S}_{sf}



(b) 지표하 흐름을 고려한 TOPMODEL 구조

그림 1. TOPMODEL 모형구조

[m]는 지표하 흐름층의 유역평균 저류부족량, S_{gw} [m]는 지하수 흐름층의 저류부족량, \bar{S}_{gw} [m]는 지하수 흐름층의 유역평균 저류부족량, m_{gw} [m]는 지하수층의 공급률을 고려한 투수량감소계수이다. 시간 간격에 따른 저류부족량의 변화율은 식(9)와 식(10)으로 표현된다.

$$\frac{\Delta \bar{S}_{sf}}{\Delta t} = -Q_{uz} + Q_{sf} + Q_v \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \bar{S}_{gw}}{\Delta t} = -Q_v + Q_{gw} = -Q_v + Q_{0gw} \exp\left(-\frac{\bar{S}_{gw}}{m_{gw}}\right) \quad (10)$$

Q_{uz} [m]는 불포화층에서 지표하 흐름층으로의 배수 유량, Q_{sf} [m]는 지표하 흐름유량, Q_v [m]는 지표하 흐름층에서 지하수 흐름층으로의 수직배수량이다. 지하수 감소구간에서의 지표하 흐름유출량 Q_{sf} [m/hr], 지하수 유출량 Q_{gw} [m/hr], 지표하 흐름층에서 지하수 흐름층으로의 수직배수량 Q_v [m/hr]은 각각 식(11), (12), (13)에 해당된다.

$$Q_{sf}(t) = Q_{tot}(t) - \left[\frac{1}{Q_{gw0}} - \left(\frac{1}{m_{gw}} \right) (t_0 - t) \right]^{-1} \quad (11)$$

$$Q_{gw} = Q_{0gw} \exp\left(-\frac{\bar{S}_{gw}}{m_{gw}}\right) \quad (12)$$

$$Q_v = \sum_{i=1}^N \min[C(S_{\max_{sf}} - S_{sf_i}), S_{gw_i}] \quad (13)$$

여기서, Q_{tot} [m/hr]는 지하수 감쇠가 시작된 이후의 총 유출량이며, Q_{gw0} [m/hr]는 지하수 감쇠초기의 지하수 유출량, Q_{0gw} [m/hr]는 최대지하수 유출량, t_0 [hr]는 지하수 감쇠시작시간이다. 식(13)에서 C 는 지하수층으로의 고정충전율로서, i 지점에서 지표하 흐름층의 최대저류부족량 $S_{\max_{sf}}$ 과 현재저류부족량 S_{sf_i} 의 차에 대한 일정비율과 지하수 흐름층의 저

류부족량 S_{gw_i} 중 작은 값을 배수하는 것으로 한다 (Scanlon 등, 2000). N 은 동일한 수문학적 거동을 보인다고 해석하는 지형지수로 구분한 소유역의 개수이다.

3. 모형 적용

3.1 대상유역

연구대상유역으로 경기도 파주시 적성면에 위치한 설마천 유역을 선정하였다. 설마천 유역은 95년부터 한국건설기술원에 의해 운영되는 시험유역으로서 임진강 상류 46km, 동경 126° 55' 54" ~ 126° 54' 57", 북위 37° 54' 57" ~ 37° 56' 23" 에 위치한 전형적 산지유역으로서, 전체유역면적 18.5 km^2 , 유로연장 11.3 km 인데, 이 중에서 영국군 전적비를 출구점으로 하는 소유역을 연구대상유역으로 선정했다. 연구대상유역은 면적 8.5 km^2 , 유로연장 5.8 km 로서 절리와 염리가 잘 발달하고 경사가 급하여 강우시 사면유출모의에 적합한 지형으로 판단된다. 식생은 활엽수림과 혼효림이 넓게 분포하며, 우량관측소가 5개, 수위관측소가 2개 설치되어 있으며 10분 단위로 운영되고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 그림 2는 1:50,000 지형도를 이용하여 10m 해상도로 구축한 대상유역의 수치고도 모형(DEM)이다. 그림 3은 구축된 수치고도모형에 다방향 흐름(Multiple Flow Direction) 알고리즘을 적용하여 계산한 지형지수지도이다(Quinn 등, 1991).

3.2 매개변수 보정

매개변수 보정을 위해 난수발생기법인 Monte-Carlo 방법을 사용하였다. 보정을 필요로 하는 매개변수는 민감도가 크다고 판단되는 것으로서, 기존 TOPMODEL은 m [m], T_0 [$\ln(m^2/hr)$], TD [hr], SR_{\max} [m], SR_0 [m]를 선정하였고, 지표하 흐름을 고려한 TOPMODEL은 SZ_m [m], GW_m [m], SR_{\max} [m], SR_0 [m], TD [hr], T_{0sz} [$\ln(m^2/hr)$], T_{0gw} [$\ln(m^2/hr)$]를 보정하였다. 선정된 변수들의 보정범위는 물리적 의미를 가진다고 판단되는 범위내에서 구했으며, 의미와 사용된 보정범위는 표 1과 같다.

목적 함수로는 식 (14)에 나타난 Nash와 Sutcliffe

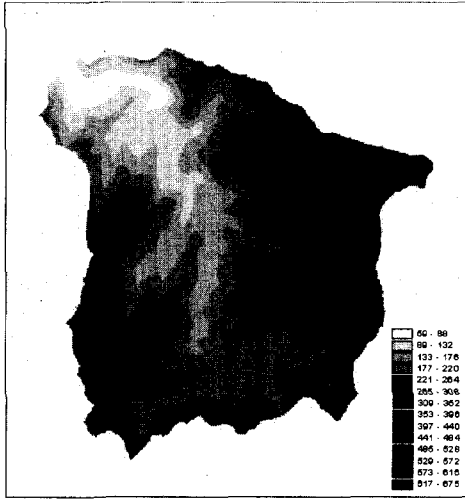


그림 2. 설마천 유역 수치고도지도(단위:m)

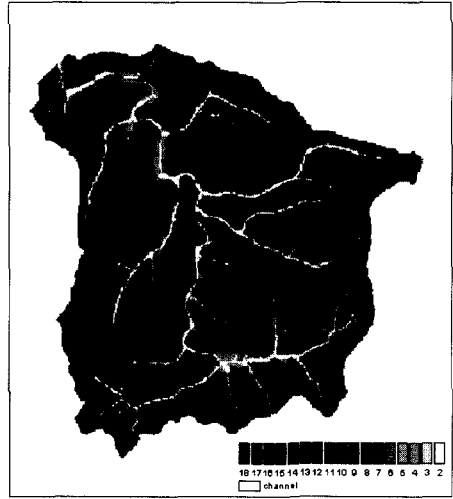


그림 3. 지형지수지도 (단위:ln(a/tan β))

표 1. 사용된 매개변수의 의미와 보정범위

매개변수	의 미	보정 범위
SR_0	식생근저층 초기저류 부족량	0 ~ SR_{max} [m]
SR_{max}	식생근저층 최대저류 부족량	0 ~ 2 [m]
TD	비포화층에서 포화층으로의 흐름지체시간	0 ~ 120 [hr]
SZ_m	지표하 흐름층의 공극률을 고려한 투수량 감소계수	0 ~ 0.1 [m]
GW_m	지하수 흐름층의 공극률을 고려한 투수량 감소계수	0 ~ 0.1 [m]
T_{0sz}	지표 포화시 지표지점에서의 투수량 계수	-2 ~ 6 [ln (m ² /hr)]
T_{0gw}	지하수층 포화시 지하수 수위에서의 투수량 계수	-2 ~ 6 [ln (m ² /hr)]

가 제안한 효율계수식을 동일하게 사용했다(Nash 와 Sutcliffe, 1970).

$$E = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (14)$$

여기서 O_i 는 i 번째 관측치, P_i 는 i 번째 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치의 평균이다.

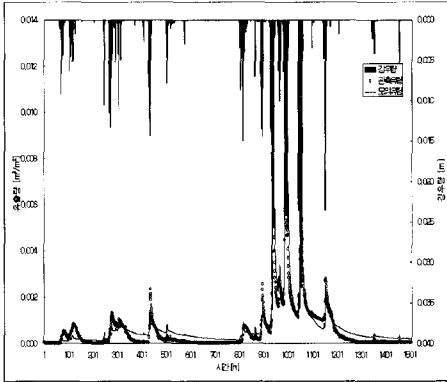
4. 결과 및 토의

수정된 TOPMODEL을 사용하여 대상유역의 강우-유출 사상을 모의하였다. 1998년 6월 28일부터 8월 30일까지 1시간 간격으로 지속된 강우-유출 사상을

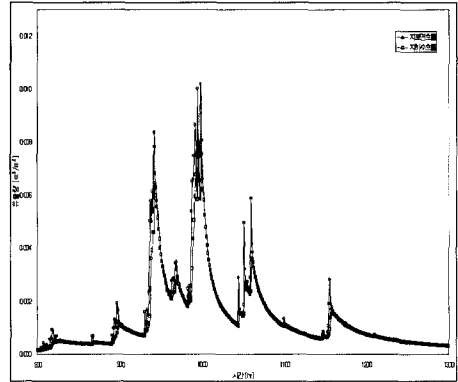
대상으로 수정된 TOPMODEL과 기존의 TOPMODEL의 수문거동 모의능력을 비교하기 위하여 Monte-Carlo 방법을 활용한 모형보정을 실시하였다. 수정된 TOPMODEL의 지하수층 고정충전율은 대상유역의 암반층 특성을 고려하여 0.1, 0.2, 0.3으로 가정하고 매개변수 보정을 실시하였다. 표 2는 보정된 매개변수들로서 각각의 모형조건에 따른 최적의 모의 효율을 보여주고 있다. 전체적으로 기존의 TOPMODEL보다 수정된 TOPMODEL의 모의효율이 높게 나타나고 있으며, 또한 기존의 TOPMODEL에서 최적 모의효율을 위한 보정매개변수 중 식생근저층 최대저류량과 초기저류량이 각각 0.00374 [m]와 0.00016 [m]등의 비현실적인 미소값으로 산출된데 비해 수정 TOPMODEL의 경우 식생근저층 최대저류

표 2. 최적효율 매개변수들

TOPMODEL version	C	SR_0	SR_{max}	TD	SZ_m	GW_m	T_{0sz}	T_{0gw}	E
Modified	0.1	0.0296	0.179	48.0	0.0268	0.0250	1.87	3.232	0.85883
Modified	0.2	0.0219	0.213	47.7	0.0207	0.0208	2.06	3.775	0.87309
Modified	0.3	0.0206	0.260	32.7	0.0227	0.0229	2.04	3.350	0.89057
Original		0.000159	0.003736	1.8072		0.0572		2.6733	0.82708



(a) 1998.6.28. ~ 1998.8.30.



(b) 1998.8.1. ~ 1998.8.21.

그림 4. 기존 TOPMODEL 모의 수문곡선

량의 경우 $0.26 \sim 0.18 [m]$, 초기저류량은 $0.029 \sim 0.021 [m]$ 로서 보정결과는 수정 TOPMODEL의 수문과정 기술구조가 대상유역의 물리적 특성을 보다 구체적으로 기술하고 있다고 판단된다. 또한 비포화층에서 포화층으로의 흐름지체시간도 기존 TOPMODEL의 경우 $1.8 [hr]$, 수정 TOPMODEL의 경우 $33 \sim 48 [hr]$ 로서 점토질 토양의 낮은 수리전도 특성을 보다 잘 구현하는 것으로 판단된다.

그림 4(a)는 기존 TOPMODEL의 모의수문곡선을 1998년 6월 28일부터 동년 8월 30일까지 관측유량과 비교도시한 것이다. 전체적으로 모의유량이 관측유량의 급격한 수문감쇠곡선을 재현하는데 한계를 보여주고 있다. 1998년 8월 1일부터 동년 8월 21일까지의 TOPMODEL 모의결과를 지표면 흐름과 지하수 흐름으로 구분하여 도시한 그림 4(b)는 유출량의 대부분이 지하수 흐름으로 나타났다. 그림 5(a), 5(c), 5(e)는 수정 TOPMODEL의 지하수층 고정충전율을 각각 0.1, 0.2, 0.3으로 가정한 경우의 모의유량과 강우량, 관측된 유출량을 비교도시하였다. 그림 4(a)와 비교하여 그림 5(a), 5(c), 5(e)는 급격한 수문감쇠곡선을 기

술하는데 있어서 수정 TOPMODEL의 우수성을 보여 주고 있다. 세 경우 모두 모의유량이 관측유량을 잘 기술하고 있으나, 1000 hr에서 1100 hr사이의 급격한 수문감쇠곡선을 기술하는데는 한계를 보이고 있다. 이는 900 hr부터 1100 hr에 이르는 집중호우로 인한 대공극 흐름경로의 발달로 수문곡선 감쇠특성이 일시적으로 변화한 것으로 예상된다.

그림 4(b)와 그림 5(b), 5(d), 5(f)는 두 TOPMODEL의 유출경로별 유출기여성분을 분리해서 도시한 것이다. 수정 TOPMODEL은 기존 TOPMODEL이 대부분의 유출이 지하수 흐름으로 분류한 것을 보다 신속한 유출경로인 지표하 흐름과 지하수 흐름으로 분리하여 기술함으로 유출발생 메커니즘을 보다 구체적으로 표현하였다. 그러나 성분별 유출 기여분의 검증은 위해서는 현장실측을 통한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다. 표 3은 모의 유출량에 대한 각 유출성분의 누계량과 비율을 보여주고 있다. 수정 TOPMODEL의 경우 지하수 고정충전율 C 가 감소함에 따라 지하수 흐름을 통한 유출성분은 감소하고 지표하 흐름과 지표면 흐름을 통한 유출성분은 증가됨을 보여주고 있다. 표 4는 수정 TOPMODEL과 기존

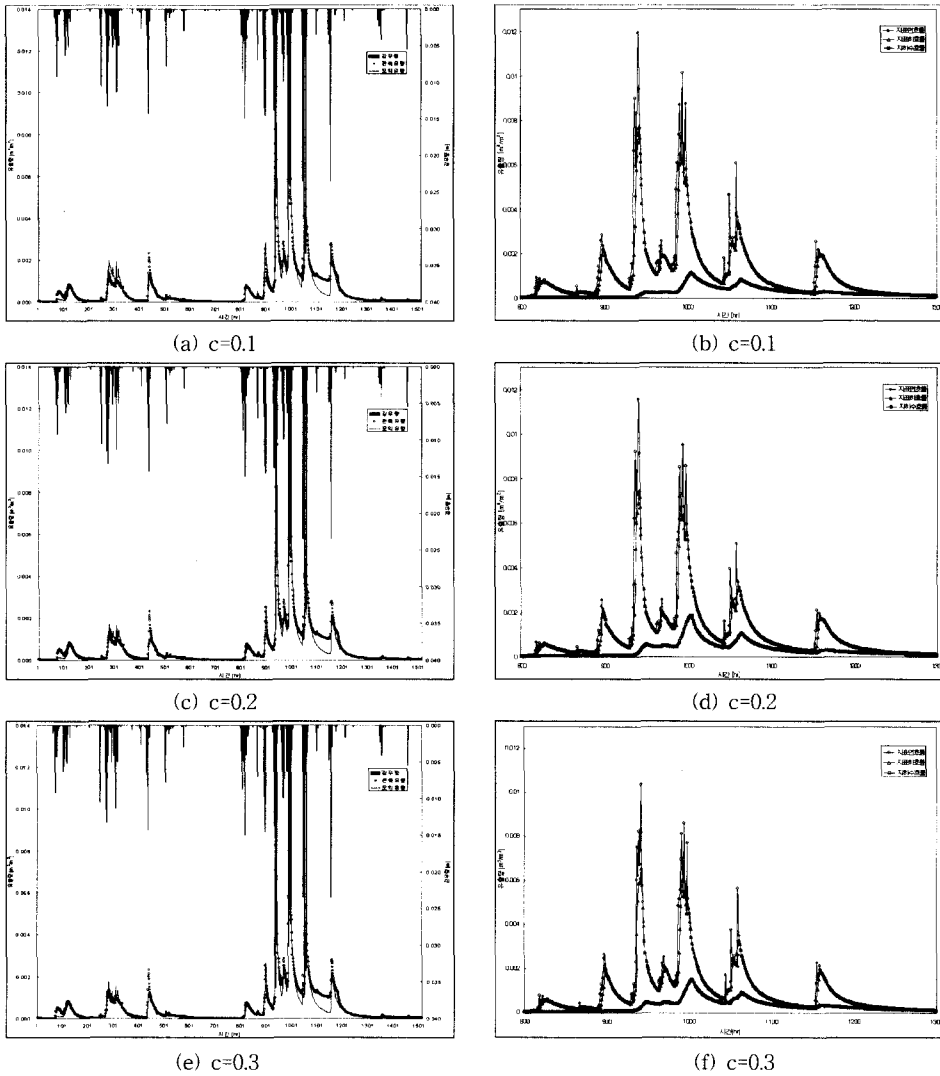


그림 5. 수정 TOPMODEL 모의 수문곡선

표 3. 모의 유출량에 대한 각 유출성분의 양과 비율. 양[m](비율)

	지하수 흐름	지표하 흐름	지표면 흐름	모의유량	관측유량
$c = 0.1$	0.16887517 (0.20665973)	0.55478604 (0.67891528)	0.09350413 (0.11442499)	0.81716534	0.82851488 (1.01388891)
$c = 0.2$	0.20878026 (0.26526381)	0.49897580 (0.63396904)	0.07931045 (0.10076715)	0.78706651	0.82851488 (1.05266183)
$c = 0.3$	0.21333152 (0.28207307)	0.46457481 (0.61427415)	0.07839247 (0.10365278)	0.75629880	0.82851488 (1.09548617)
기존 TOPMODEL	0.95668290 (0.90863216)		0.09624884 (0.09141461)	1.05288250	0.82847618 (0.78686480)

표 4. 관측 유출량과 모의 유출량의 평균, 표준편차, 평균제곱오차와 상관계수

		평균 [m]	표준편차 [m]	평균제곱오차 [m ²]	상관계수
c = 0.1	관측 유량	0.00054796	0.00100451	1.43295×10 ⁻⁷	0.93812961
	모의 유량	0.00054045	0.00109182		
c = 0.2	관측 유량	0.00054796	0.00100451	1.27975×10 ⁻⁷	0.94018070
	모의 유량	0.00052055	0.00104541		
c = 0.3	관측 유량	0.00054796	0.00100451	1.10346×10 ⁻⁷	0.94509644
	모의 유량	0.00050020	0.00096882		
기존 TOPMODEL	관측 유량	0.00054830	0.00100476	1.80349×10 ⁻⁷	0.93078025
	모의 유량	0.00069681	0.00108842		

TOPMODEL의 유출모의결과를 평균, 표준편차, 평균 제곱오차, 상관계수로 구분하여 나타내었다. 큰 차이는 보이지 않지만, 전체적으로 수정 TOPMODEL의 모의능력이 기존 TOPMODEL보다 뛰어난을 평균제곱 오차와 상관계수로서 판단할 수 있다.

지표하 흐름성분이 유출에 기여하는 정도는 포화지역의 흐름경로가 연결되어 하천유량에 기여하는 정도와 밀접한 관계가 있고, 이때의 연결성은 표토의 지형적 구배와 상관없는 3차원적인 연결성으로 정의될 수 있다. 실제로 piezometer 자료를 활용한 Scanlon 등의 연구(2000)에 의하면 지표하 흐름과 밀접한 관련이 있는 포화지역이 0.5 m 정도의 깊이에서 자주 발견되었다. 또한 이 깊이보다 깊은 곳의 piezometer 반응의 부재는 지표하 흐름의 발생이 지하수면의 형성과 무관하게 일어남을 의미한다. 지하수 고정충전율 C의 공간적 변화성은 Wood 등이 제안한(1990) 단위대표면적(Representative Elementary Area)으로서 보완될 수 있으나, 지하수층의 정확한 충전량의 공간적 결정은 다소간 모호하다.

5. 결 론

본 연구를 통해서 도출될 수 있는 결론은 다음과 같다.

1. 지표하 흐름의 신속한 유출경로를 구현한 수정 TOPMODEL은 유출곡선 감쇠부분을 기술하는데 기존 TOPMODEL보다 개선된 능력을 보여주었다.
2. 매개변수 산정과정에서 보여준 수정 TOPMODEL의 보정결과는 기존 TOPMODEL의 경우보다 유역의 물리적 상태를 잘 기술하고 있다.
3. 수정 TOPMODEL의 구체화적인 유출경로별 추적능력은 유역내의 유출반응에 대한 다양한 관측을 통해 검증받아야 할 것이며, 유역 수문반응의 양과 질을

동시에 재현하는 필수적인 과정으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발 연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제 번호 : 00-10-14-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김상현, 김경현 (1999). "공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제5호, pp. 515~524.

윤용남 (1998). 공업수문학. 청문각, pp. 245~247.

정선희, 김상현 (1999). "TOPMODEL 투수량계수 감소함수 일반화과정의 적용에 관한 연구." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제6호, pp. 637~647.

한국건설기술연구원 (1998). 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구 연구보고서, 건기연 98-077, pp. 5~24.

Ambrose B., Beven, K.J., and Freer, J. (1996). "Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp. 2135~2145.

Barling, R.D., Moore, I.D., and Grayson, R.B. (1994). "A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1029~1044.

- Beven, K.J. (1982). "On subsurface stormflow an analysis of response times." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 27, pp. 505~521.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1977). "Considerations in the development and validation of a simple physically-based, variable contributing area model of basin hydrology." paper presented at the 3rd International Symposium on Theoretical and Applied Hydrology., *Colo. State Univ.*, Fort Collins.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43~69.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. pp. 132~135.
- Hammermeister, D.P., Kling, G.F., and Vomocil, J.A. (1982a). "Perched water tables on hillsides in western Oregon, I, Some factors affecting their development and longevity." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 46, No. 4, pp. 811~818.
- Hammermeister, D.P., Kling, G.F., and Vomocil, J.A. (1982b). "Perched water tables on hillsides in western Oregon, II, Preferential movement of water and anions." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 46, No. 4, pp. 819~826.
- Hewlett, J.D., and Hibbert, A.R. (1965). "Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas." *paper presented at International Symposium on forest Hydrology*. Pa. State Univ., University Park.
- Lowery, B., Kling, G.F., and Vomocil, J.A. (1982). "Overland flow from sloping land: Effects of perched water tables and sloping drains." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 46, No. 1, pp. 93~99.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles." *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282~290.
- Quinn, P.F., Beven K.J., Chevallier P., and Planchon O. (1991). "The prediction of hillslope flow path for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydro. Proc.*, Vol. 5, pp. 59~79.
- Scanlon, T.M., Ruffensperger, J.P., and Hornberger, G.M. (2000). "Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment : Observations and modeling using a modified TOPMODEL." *Water Resour. Res.*, Vol. 36, No. 9, pp. 2575 ~2586.
- Weyman, D.R. (1973). "Measurements of the downlope flow of water in a soil." *J. Hydrol.*, Vol. 20, pp. 267~288.
- Wigmosta, M.S., and Lettenmaier, D.P. (1999). "A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 1, pp. 255~264.
- Wood, E.F., Sivapalan, M., and Beven, K.J. (1990). "Similarity and Scale in catchment storm response." *Rev. Geophys.*, Vol. 28, No. 1, pp. 1~18.
- Whipkey, R.Z. (1965). "Subsurface storm flow from forested slopes." *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 74~85.

(논문번호:01-034/접수:2001.04.16/심사완료:2001.06.29)