

수정 TOPMODEL에 의한 유출해석과 일반화 (설마천 유역을 중심으로)

Generalization of Modified TOPMODEL for Rainfall-Runoff Analysis of Sulmachun Watershed

이 학 수* / 김 남 원** / 김 상 현***

Lee, Hak Su / Kim, Won / Kim, Nam Won / Kim, Sang Hyun

Abstract

The modified TOPMODEL of two storage systems has been integrated to the generalized assumptions of decreasing hydraulic conductivity to vertical direction. Three different recharge functions were introduced to explore the impact of the macropore flow to vertical direction, the storage at the surface zone and the relative storage deficit of the soil matrix. Combinations of these approaches provide 30 type of the model structure for the hillslope hydrology. Developed models have been applied to several hydrologic events at the Sulmachun watershed. The performance evaluation with the Monte-carlo simulation suggests that the exponential function of transmissivity reduction should be appropriate form for the physically-based hydrologic simulation on the Sulmachun watershed. It has been shown that the recharge function of macropore flow contributes to improve the predictability of the generalized version of modified TOPMODEL.

keywords : The modified TOPMODEL, Recharge Functions, Macropore Flow

요 지

지표하부에 이중 저류체계를 고려해주는 수정 TOPMODEL을 일반화된 지표하 투수량계수 감소함수와 연결시켰으며, 대공극으로의 수직배수 효과, 지표저류 효과, 토양층 내에서의 상대 저류 부족량에 대한 영향을 검토하기 위해 세가지 형태의 지하수 충전함수를 도입하였다. 이러한 접근은 사면 수문학에 대한 30가지 형태의 모형구조를 제공한다. 개발된 모형들은 설마천 유역의 여러 강우사상에 적용되었다. Monte-carlo 모의를 통한 수행결과는 지수함수적 투수량계수 감소형태가 설마천 유역의 물리적인 수문모의에 적절함을 제시하였고, 대공극 흐름을 표현해주는 재충전 함수가 일반화시킨 수정 TOPMODEL의 예측력 향상에 기여하였다.

핵심 용어 : 수정 TOPMODEL, 충전 함수들, 대공극 흐름

* 부산대학교 환경기술 산업개발센터 연구원

Research Assistant, IETI Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

** 한국건설기술연구원 수석연구원

Senior Researcher, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea

*** 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea

(Email: kimsangh@pnu.edu)

1. 서론

컴퓨터의 성능과 지형정보체계의 발달에 따라 공간적인 분포를 가지는 강우-유출 모형의 개발과 적용이 매우 용이해졌다. 그러나 유역 수문 모형에서 획득할 수 있는 유출 수문곡선은 모형이 고려해주는 수문과정과 개발에 사용되었던 자료, 개발자의 지식 등에 의존하여 한정된 능력을 가지게 되는데, 이런 한계점은 계속적인 적용과 개선으로 극복될 수 있다. TOPMODEL은 지형분석에 기초한 유역응답을 해석하고자 한 Kirkby의 생각에 기초하여 지표면 흐름과 지하수 흐름에 대하여 적은 수의 매개변수를 사용하여, 사면 수문거동에 대해 물리적 해석을 행하는 개념적 모형이다(Beven, 1997). 이 모형은 구조의 간결성을 위하여 지형지수($a/\tan\beta$)를 도입하였고, Beven (1997)에 의해 지형지수의 포화경향성 예측력에 대한 고찰이 행해진 바 있다. Beven (1997)에 의하면, 지형지수의 포화경향성 예측력이 모든 유역상황에 대해 합리적이진 않는데, 이는 모형의 사용시 유역상황에 적절한 주관적 판단을 요구하며, 필요한 경우 모형의 구조나 기본가정에 대한 수정이 필요함을 제시하고 있다.

강우시 산악지형의 빠른 수문응답은 강우시 일시적으로 형성되는 지표하 흐름에 크게 의존하는데(Scanlon 등, 2000), 이는 기존 TOPMODEL의 구조에 이중 저류체계의 도입이 필요함을 의미한다. 이에 따라 지표하 흐름층을 고려해 줄 수 있도록 모형구조가 변형된 수정 TOPMODEL을 이용하여 경기도 파주시 설마천 유역에 적용한 결과 기존 TOPMODEL에 비해 수문과정모의에 대한 개선된 결과를 보인 바 있다(이학수 등, 2001).

저류 체계 변형 이외에, TOPMODEL의 기본 가정 중 하나인 투수량 계수의 지표하 방향으로의 지수함수적 감소에 대한 고찰이 Ambrose 등(1996a, b)에 의해 프랑스의 Ringelbach 유역에 대해 수행 되었으며, 국내의 경우 위천 동곡유역에 적용한 바 있다(정선희와 김상현, 1999). Ambrose 등(1996b)에 의하면 포물선형, 지수형 투수량 계수 감소함수식을 적용한 결과 포물선형이 Ringelbach 유역해석에 적절하며, 정선희와 김상현(1999)에 의하면 위천유역의 경우 투수량 계수의 감소함수가 지수형과 포물선형 모두 비슷한 모의능력을 보이고 있다. 이는 특정 유역의 유출해석시 투수량 계수식의 적용에 대한 고려가 필요함을 의미한다. 위에서 고찰한 대로 TOPMODEL은 유역에 적합한 유출응답

을 설계하기 위해 발전되어 왔으나, 모형내 가정과 구조적인 한계로 이에 대한 개선의 필요성이 요구되고 있다(Ambrose 등, 1993a; Barling 등, 1994; Wigmosta와 Lettenmaier, 1999; 김상현과 김정현, 1999).

따라서, 본 연구에서는 유역 수문응답의 구체화된 해석을 시도하고자 TOPMODEL내 지표하 흐름을 고려해 주는 수정 TOPMODEL(이학수 등, 2001)을 이용하여 지표하 투수량 감소함수식의 세 형태를 적용하고 TOPMODEL의 구조와 가정에 대해 고찰함으로써 유역수문 응답의 구체화된 해석을 시도하였다.

2. 방법론

2.1 TOPMODEL 구조

2.1.1 TOPMODEL

TOPMODEL은 유역 내에서 물의 움직임은 정상상태이고, 유역 내 지하수면의 동수경사가 지표면 경사와 같고 수리학적 전도도 $K_i [m/hr]$ 가 지표하 방향으로 지수함수적으로 감소한다는 세가지 가정에 근거한 개념적 모형이다.

Darcy의 법칙과 수리전도도 감소가정을 사면유역의 미소면적에 적용하고 흐름의 질량보존 법칙을 고려하면 i 지점의 유입량과 유출량은 식 (1)로서 기술된다.

$$a_i R = T_0 \tan\beta_i \exp(-f z_i) \quad (1)$$

여기서 $a_i [m^2]$ 는 i 지점을 통과하는 흐름에 대한 상류기여면적, R 은 공간적으로 균일하게 분포하는 강우의 지하수 흐름에의 기여분, T_0 는 지표의 포화투수량 계수, $\tan\beta_i$ 는 지표경사, f 는 지표하방향으로의 투수량계수 감소상수, z_i 는 i 지점의 지표면에서 지표하 방향으로 측정된 토양깊이이다. i 지점의 포화부족분은 식 (2)로서 표현된다.

$$S_i = \bar{S} + m[\gamma - \zeta] \quad (2)$$

여기서 \bar{S} 는 평균 포화 부족분이고, m 은 공극률을 고려한 투수량 감소계수, ζ 는 $\ln(\frac{a}{T_0 \tan\beta})$ 이고 γ 는 $\frac{1}{A} \int_A \ln(\frac{a}{T_0 \tan\beta}) dA$ 이다. 지하수 유출량($Q_{gw} [m/hr]$)은 식 (3)으로 표현되며, $Q_0 [m/hr]$ 는 지표포화시 지하수 유출량을 의미한다.

$$Q_{gw} = Q_0 \exp[-fz] \quad (3)$$

2.1.2 지표하 흐름을 고려한 수정 TOPMODEL

강우시 일시적으로 발생하는 얇은 지표하 흐름이 제안되었다. 그것은 낮은 투과도를 가지는 토양층 위에 위치한 토양층내 혹은 지표 부근의 생물이나 식생뿌리의 영향에 의해 형성된 대공극에 의하여 생성되거나 들의 복합적인 원인에 의하여 생성된다. 수정된 TOPMODEL에서는 지표하 유출에 대하여 개념적인 모델로써 두 개의 저류 시스템으로 구성된다(Scanlon 등, 2000). 지표하 흐름층의 포화 부족분 S_{sf} [m]은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{sf} = \theta_n z_i \quad (4)$$

여기서, $\theta_n [m^3/m^3]$ 는 배수 가능한 공극률이고, $z_i [m]$ 는 지표하 흐름층까지의 깊이이다. 시간에 따른 지표하 흐름층의 포화부족분 변화는 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{\Delta S_{sf}}{\Delta t} = -Q_{uz} + Q_{sf} + Q_v \quad (5)$$

여기서, $Q_{uz} [m/hr]$ 는 불포화 층으로부터 유입량, $Q_{sf} [m/hr]$ 는 지표하 흐름층에서의 유출량이고, $Q_v [m/hr]$ 는 수직 배수량이고 지하수 층으로의 유입량에

기여한다. 식 (5)의 지하수층에 기여하는 유량을 고려한 지하수의 포화 부족분은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta S_{gw}}{\Delta t} = -Q_v + Q_{gw} \quad (6)$$

여기서 $Q_{gw} [m/hr]$ 는 지하수 유출량이다. 식 (3)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta S_{gw}}{\Delta t} = -Q_v + Q_{0v} \exp(-fz) \quad (7)$$

여기서 $Q_{0v} [m/hr]$ 는 최대지하수 유출량이다. 그림 1의 (a)는 수정 TOPMODEL의 저류체계 구조도를 나타내며, (b)는 원형 TOPMODEL의 저류체계 구조도를 나타낸다. 원형 TOPMODEL에 비해 수정 TOPMODEL에는 지표하 흐름층을 고려할 수 있도록 2중 저류체계의 구조를 지닌다.

2.2 일반화된 투수량계수 감소함수식과 수정 TOPMODEL의 도입

기존의 TOPMODEL은 투수량 계수가 지수함수적으로 감소한다고 가정하였다. 여기로부터 유도된 지하수 감쇠곡선은 1차 쌍곡선의 형태로 나타난다. 그러나, 실제유역에서의 수문감쇠곡선이 지수함수적 투수량 계수 감소함수로 기술하는데 한계가 있는 경우가 발견되고, 모형구조의 일반화를 통한 모형적용성의 확장을 도모하기 위해 기존의 투수량 계수에 덧붙여 포물선함

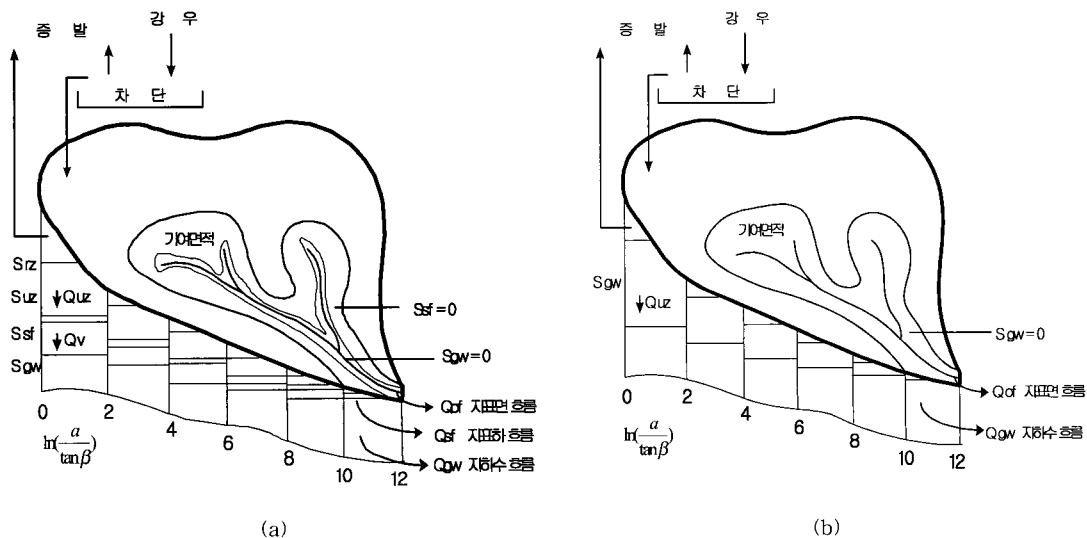


그림 1. 수정 TOPMODEL의 저류체계 구조도 (a)와 원형 TOPMODEL의 저류체계 구조도(b)

수와 선형함수가 제안되었다(Ambroise 등, 1996a).

지수함수적인 투수량 계수는 다음과 같다.

$$T_i = T_0 \exp(-S_i/m) \quad (8)$$

포물선함수적인 투수량 계수는 다음과 같다.

$$T_i = T_0(1 - S_i/m)^2 \quad (9)$$

선형함수적인 투수량 계수는 다음과 같다.

$$T_i = T_0(1 - S_i/m) \quad (10)$$

위의 가정들로부터 유도되는 투수량계수 감소함수에 대한 횡방향 유출, 포화 결핍도, 지하수 감쇠곡선식, 지표수 감쇠곡선식, 포화층의 배수량과 관련한 수식들은 표 1과 같다. 표 1에서, τ 는 지하수 감소가 시작되는 시간으로부터 경과시간이고, A 는 유역면적, Q_s 는 지하수 유출량 감소시작시 지하수 유량, SZ_m , GW_m 은 각각 지표하 흐름층과 지하수층의 공극률을 고려한 투수량 감소 계수, ξ_p 는 $\sqrt{(\frac{a}{T_0 \tan \beta})_i}$, γ_p 는

$$\frac{1}{A} \int_A \sqrt{(\frac{a}{T_0 \tan \beta})_i} dA, \quad \xi_l = (\frac{a}{T_0 \tan \beta})_i, \quad \gamma_l = \frac{1}{A} \int_A (\frac{a}{T_0 \tan \beta})_i dA$$

이다. 지표수 감쇠곡선식의 유

도는 다음과 같다. 지표수는 지표 과포화지점 ($S_i < 0$)에서 발생되며, 수문곡선 감쇠부분에서는 무강우 상태이므로 포화지역에 내리는 강우에 의한 직접유출을 기대할 수 없다. 따라서, 지표포화 초과유출만이 지표수의 유일한 구성성분이 된다. 식 (11)은 단위시간 간격 (Δt)동안의 포화초과 유출량에 의한 지표수량 ($Q_{ov, \Delta t}$)을 나타낸다. 식 (11)에서 S_i 를 유역전체에 균등분포(\bar{S})시키면 식 (12)로 표현된다. 지표수량은 미소시간간격(dt) 동안의 저류부족량의 변화와 관련된 식 (13)의 일반화된 표현이 성립되며, 동일시간간격을 취하면 식 (12)와 동일한 의미를 지닌다. 식 (13)에 연쇄법칙($d\bar{S}/dt = (d\bar{S}/dQ_{ov}) \cdot (dQ_{ov}/dt)$)을 적용하면 식 (14)와 같이 표현된다. 식 (12)를 \bar{S} 에 대해 미분하여 식 (14)에 대입한 후 감쇠구간에 대해 적분하면 적분식 식 (15)로 표현되면, 적분결과는 식 (16)으로 표현된다. 식 (16)은 감쇠구간에 대한 지표수 감쇠곡선식이 된다. 식 (16)에서 $Q_{ov,0}$ 는 감쇠초기의 포화초과 유출에 의한 지표수량이며, τ' 는 지표수 감소시작시간을 기준으로 측정된 경과시간이다.

$$Q_{ov, \Delta t} = \sum_A a_i |S_i|, \quad (S_i < 0) \quad (11)$$

$$Q_{ov, \Delta t} = A |\bar{S}| \quad (12)$$

표 1. 투수량 감소계수의 연직방향 감쇠가정에 따른 유도결과

매개변수	투수량 계수 (T_i)		
	지수함수형	포물선함수형	선형함수형
횡방향 유출량 (q_i)	$T_0 \tan \beta_i \exp(-\frac{S_i}{m})$	$T_0 \tan \beta_i (1 - \frac{S_i}{m})^2$	$T_0 \tan \beta_i (1 - \frac{S_i}{m})$
포화 부족분 (S_{sf})	$\bar{S}_{sf} + SZ_m(\gamma - \xi)$	$SZ_m - \sqrt{\frac{\xi_p}{\gamma_p}} (SZ_m - \bar{S}_{sf})$	$SZ_m - (\frac{\xi_l}{\gamma_l})(SZ_m - \bar{S}_{sf})$
포화 부족분 (S_{gw})	$\bar{S}_{gw} + GW_m(\gamma - \xi)$	$GW_m - \sqrt{\frac{\xi_p}{\gamma_p}} (GW_m - \bar{S}_{gw})$	$GW_m - (\frac{\xi_l}{\gamma_l})(GW_m - \bar{S}_{gw})$
지표수 감쇠곡선	$\ln Q_{ov} - \ln Q_{ov,0} = \tau'$	$\ln Q_{ov} - \ln Q_{ov,0} = \tau'$	$\ln Q_{ov} - \ln Q_{ov,0} = \tau'$
지하수 감쇠곡선	$\frac{1}{Q_{gw}} - \frac{1}{Q_s} = \frac{\tau}{GW_m A}$	$\frac{1}{\sqrt{Q_{gw}}} - \frac{1}{\sqrt{Q_s}} = \frac{\tau \sqrt{Q_0}}{GW_m A}$	$\ln Q_{gw} - \ln Q_s = \frac{\tau Q_0}{GW_m A}$
지표하 포화층의 배수량 (Q_{sf})	$Q_{0, sf} \exp(-\frac{\bar{S}_{sf}}{SZ_m})$	$Q_{0, sf} (1 - \frac{\bar{S}_{sf}}{SZ_m})^2$	$Q_{0, sf} (1 - \frac{\bar{S}_{sf}}{SZ_m})$
지하수 포화층의 배수량 (Q_{gw})	$Q_{0, gw} \exp(-\frac{\bar{S}_{gw}}{GW_m})$	$Q_{0, gw} (1 - \frac{\bar{S}_{gw}}{GW_m})^2$	$Q_{0, gw} (1 - \frac{\bar{S}_{gw}}{GW_m})$

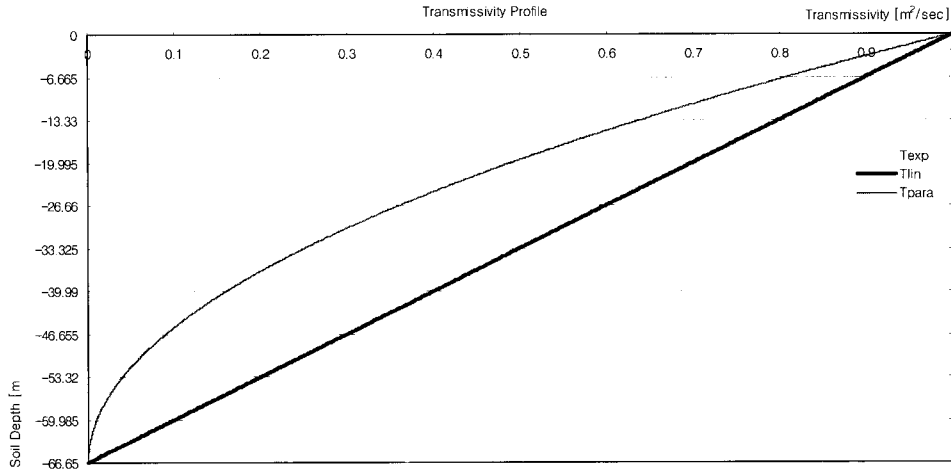


그림 2. 동일지점에서의 선형, 지수형, 포물선형 투수량계수 감소함수의 형태
 ($T_0 = 1.0 [m^2/hr]$, $f = 0.015 [1/m]$).

$$Q_{ov} = A \frac{d\bar{S}}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dQ_{ov}}{dt} = \frac{Q_{ov}}{A} \frac{dQ_{ov}}{d\bar{S}} \quad (14)$$

$$\int_{Q_{ov,0}}^{Q_{ov}} \frac{1}{Q_{ov}} dQ_{ov} = \int_0^{\tau'} dt \quad (15)$$

$$\ln Q_{ov} - \ln Q_{ov,0} = \tau' \quad (16)$$

동일지점 ($T_0 =$ 일정, $f =$ 일정, $\tan \beta =$ 일정)의 경우, 보정된 매개변수의 범위내의 값 ($T_0 = 1.0 [m^2/hr]$, $f = 0.015 [1/m]$)으로 투수량 계수 감소함수를 도시하면 그림 2와 같다. T_{exp} 는 지수함수형태의 투수량계수, T_{lin} 은 선형함수형태의 투수량계수, T_{para} 는 포물선형함수형태의 투수량계수를 의미한다. 지표하 방향에 대해 T_{para} 의 감소율이 가장 크며 감소율의 크기는 T_{para} , T_{lin} , T_{exp} 순임을 알 수 있다. 이는 지수형 투수량계수 감소모형이 동일시간간격에 대한 투수능력이 커서 물의 흐름을 보다 빨리 진행시켜줄을 의미하며, 대공극 흐름을 따른 빠른 흐름에 대한 설명을 가능하게 함을 제시하고 있다.

2.3 지하수 흐름층으로의 재충전

지표하 흐름층에서 지하수 흐름층으로의 수직배수

방법을 3가지 경우로 고려하였다. 첫째는 기존 TOP-MODEL에서 고려해주는 수직배수량 식에 고정충전계수 (C_f)를 고려해 준 식 (17)로서, 지표하 흐름층에 기여하는 수직배수량의 일부유량을 우회시켜 지하수 흐름층으로 배수하는 방법이다(Beven과 Wood, 1983). 이는 대공극을 따라 빨리 배수되는 흐름을 설명해준다.

$$Q_v = C_f Q_{uz} = C_f \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{uz,i}}{S_{sf,i} TD} \right) A_i \quad (17)$$

여기서, $Q_v [m/hr]$ 는 지하수 흐름층으로의 충전율을 의미하며, C_f 는 지하수층으로의 고정충전율을 표시하는 계수, $S_{uz,i}$ 는 지표하 흐름층 위의 비포화층 저류량, $S_{sf,i}$ 는 국소지역의 지표하 흐름층 저류부족량, TD 는 비포화층에서의 흐름지체시간, A_i 는 i 값을 가지는 지형지수의 전체유역에 대한 면적분율을 의미한다. 두 번째는 상대저류부족량 ($\delta = S/m$)에 반비례하여 비선형적으로 수직배수량을 결정하는 식 (18)를 이용한 방법이다. 이는 지표하 토양의 포화정도가 클수록 상대적으로 지하수 흐름층으로 배수될 수 있는 가능성이 큼을 반영한다.

$$Q_v = K_0 \frac{\delta_{sf,max} - \bar{\delta}_{sf}}{\exp(\delta_{sf,max}) - \exp(\bar{\delta}_{sf})} \quad (18)$$

여기서, $\delta_{sf,max}$ 는 지표하 흐름층 최대 상대저류부족

표 2. 투수량계수 감소함수 형태와 지하수 충전함수의 조합에 의한 모형의 분류

Model number	Rch	GW	SF
1	TM	Exp	Exp
2	Fixed	Exp	
3		Lin	
4		Para	
5	NLDrain	Exp	
6		Lin	
7		Para	
8	LDrain	Exp	
9		Lin	
10		Para	
11	TM	Lin	Lin
12	Fixed	Exp	
13		Lin	
14		Para	
15	NLDrain	Exp	
16		Lin	
17		Para	
18	LDrain	Exp	
19		Lin	
20		Para	
21	TM	Para	Para
22	Fixed	Exp	
23		Lin	
24		Para	
25	NLDrain	Exp	
26		Lin	
27		Para	
28	LDrain	Exp	
29		Lin	
30		Para	

량, $\bar{\delta}_y$ 는 지표하 흐름층 평균 상대저류부족량, K_0 는 포화시 지표의 수리학적 전도도로서 식 14의 C_f 처럼 지하수 흐름층으로의 충전율을 의미한다.

세 번째는 지표하 흐름층 저류량의 일부를 지하수로

배수하는 방법으로서 식 (19)으로 표현된다(Scanlon 등, 2000). 이는 지표하 흐름층의 저류량과 지표하 흐름층의 유출량의 선형적 관계를 가정한 것으로서 선형 저수지의 개념과 일치한다.

$$Q_v = \sum_{i=1}^n \min [C_i (S_{sf, \max} - S_{sf, i}), S_{gw, i}] A_i \quad (19)$$

여기서, C_i [$1/hr$]는 지표하 흐름층 저류량의 일정량을 지하수 흐름층으로 보내주는 전달계수로서, C_i 가 크면 지하수 흐름층으로의 수직배수량이 커져 전체 유출량에 대한 지하수 흐름층의 기여분을 증가시킨다.

2.4 수정 TOPMODEL과 일반화 투수량계수 가정 그리고 재충전 함수의 조합

수정 TOPMODEL의 구조는 Scanlon 등(2000)이 제안한 지표하 저류층과 지하수 저류층의 이중 저류체 계로서 각각의 저류층의 투수계수 감쇠가정을 Ambrise 등(1999a)이 제안한 세가지 감쇠함수가 적용될 수 있다. 또한 재충전 함수도 3가지 가정이 쓰일 수 있으므로 수정 TOPMODEL과 투수량계수 가정 그리고 재충전 함수의 조합을 도출하면 30가지 형태의 모형이 도출될 수 있다. 표 2는 본 연구에서 수행될 30가지 모형의 조합을 보여주고 있으며, SF는 지표하 투수계수 가정, Rch는 재충전 함수의 조합, GW는 지하수 투수계수의 가정이며, 첨자 Exp, Lin, Para는 각각 Exponential, Linear, Parabolic 형태의 감소함수를 나타내고, 첨자 Fixed와 NLDrain, LDrain은 식 (17), (18), (19)의 재충전 함수를 의미한다.

3. 대상구역

본 연구의 대상구역으로써 95년부터 한국건설기술연

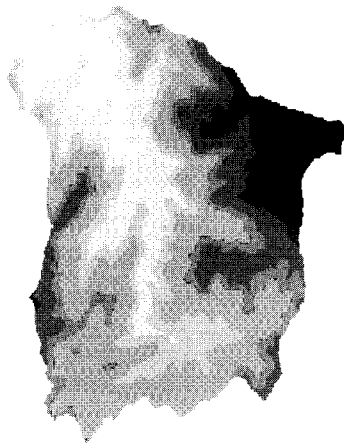


그림 3(a)

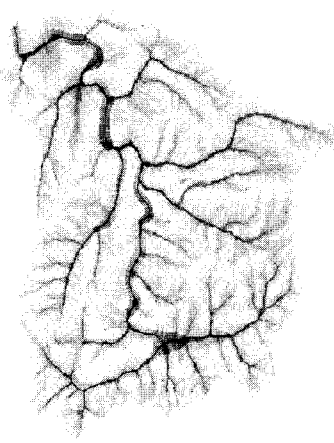


그림 3(b)

그림 3. 설마천 유역의 수치고도모형(a)과 지수형 지형지수지도(b)

구원에서 시험유역으로 운영하고 있는 임진강 하구에서 약 46km 상류의 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역을 선정했다. 위치는 동경 126°55'54" ~ 126°54'57" 북위 37°54'57" ~ 37°56'23" 이고, 유역 면적 8.5km², 유로연장 5.8km, 연평균 강수량은 1,600 mm, 고도는 최저 59 m에서 최고 675 m, 유로 경사 2%인 전형적인 급경사 산지 사행하천 지형이며 전형적인 곡류하천이다. 지질은 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 열리가 잘 발달되어 있다. 또한 삼림과 토양은 90% 이상이 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되고 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우시 토석류를 유발한다. 관측소는 우량관측소 5개(유역밀도 1.7km²/개소, 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산)와 수위관측소 2개(전적비교, 사방댐)와 기상관측소 1개(비룡포대)이며 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 본 연구에서는 측정 자료 중 1998년 6월 28일부터 8월 30일까지의 10분 간격의 강우자료와 유출 자료를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

수치고도 모형에 다방향 흐름 알고리즘(Multiple Flow Direction, MFD)을 이용하여 유역전체에 대한 대수형 지형지수 ($\ln(a/\tan\beta)$)를 계산하였으며, 여기에 지수함수를 적용하여 선형지형지수를 구하였고, 선

표 3. 사용된 매개변수의 의미와 보정범위

매개변수	의 미	보정 범위
SR_0	식생근지층 초기저류 부족량	$0 \sim SR_{max}$ [m]
SR_{max}	식생근지층 최대저류 부족량	$0 \sim 2$ [m]
TD	비포화층에서 포화층으로의 흐름지체시간	$0 \sim 120$ [hr]
SZ_m	지표하 흐름층의 공극률을 고려한 투수량 감소계수	$0 \sim 0.1$ [m]
GW_m	지하수 흐름층의 공극률을 고려한 투수량 감소계수	$0 \sim 0.1$ [m]
T_{0sz}	지표 포화시 지표지점에서의 투수량 계수	$-2 \sim 6$ [$\ln(m^2/hr)$]
T_{0gw}	지하수층 포화시 지하수 수위에서의 투수량 계수	$-2 \sim 6$ [$\ln(m^2/hr)$]
C_f	지하수층 고정 충전율	$0.05 \sim 0.5$

표 4. 30가지 모형의 보정결과

Model number	C_f	SR_0	SR_{max}	TD	SZ_m	GW_m	T_{0sz}	T_{0gw}	E
1		0.028	0.509	2.7		0.032		2.014	0.874
2	0.491	0.009	0.453	85.9	0.020	0.023	3.046	1.816	0.929
3	0.142	0.204	0.789	120.0	0.024	0.049	2.784	2.724	0.879
4	0.309	0.102	0.446	113.1	0.021	0.099	3.337	2.026	0.878
5		0.030	0.550	62.1	0.036	0.033	1.440	3.221	0.886
6		0.189	1.833	110.3	0.033	0.052	2.222	-0.166	0.873
7		0.194	1.371	107.3	0.033	0.083	2.216	4.193	0.894
8		0.003	1.223	97.9	0.029	0.070	1.809	0.661	0.900
9		0.017	1.317	110.8	0.013	0.073	4.021	5.850	0.609
10		0.222	0.817	55.9	0.040	0.100	2.071	1.906	0.785
11		0.171	0.314	83.2		0.080		5.498	0.343
12	0.496	0.001	0.381	29.3	0.079	0.007	4.215	3.170	0.548
13	0.098	0.171	0.314	83.2	0.080	0.075	5.498	5.101	0.336
14	0.495	0.007	0.292	6.9	0.086	0.059	0.260	-0.231	0.150
15		1.189	1.196	38.5	0.080	0.074	4.981	2.537	0.322
16		0.225	1.507	72.6	0.081	0.067	5.138	1.132	0.143
17		0.225	1.508	72.6	0.080	0.067	5.138	1.132	0.178
18		0.216	1.695	110.6	0.068	0.068	4.719	-1.583	0.279
19		0.225	1.508	72.6	0.083	0.067	5.137	1.132	0.143
20		0.238	0.693	36.7	0.071	0.093	5.130	2.397	0.222
21		0.696	1.220	96.3		0.003		2.034	0.564
22	0.022	1.151	1.501	1.3	0.003	0.100	2.601	-1.014	0.584
23	0.109	0.591	1.955	88.0	0.003	0.098	-1.311	1.300	0.567
24	0.097	0.798	1.410	66.8	0.003	0.095	2.032	1.452	0.576
25		0.692	0.927	30.6	0.003	0.096	1.097	-0.557	0.583
26		0.798	1.410	66.8	0.003	0.095	2.032	1.452	0.576
27		1.762	1.763	117.3	0.003	0.094	1.834	0.355	0.576
28		0.038	1.002	5.9	0.083	0.003	-0.231	5.905	0.757
29		0.022	0.183	115.5	0.098	0.078	1.254	0.775	0.146
30		0.085	1.464	99.5	0.099	0.099	4.202	-1.043	0.174

형지형지수에 이중근을 취하여 포물선형 지형지수를 계산하였다. 구축된 수치고도모형과 지수형 지형지수지도는 그림 3(a), 3(b)와 같다.

매개변수 추정은 난수발생 모의기법인 Monte-

carlo 방법을 이용하였으며, 개개의 모형에 대하여 최소 12,000번 이상씩 모의하였으며, 효율계수의 상승이 관측되지 않을 때까지 수행하였다. 사용된 매개변수의 범위는 표 3에 나타나 있으며, 30개 모형의 모

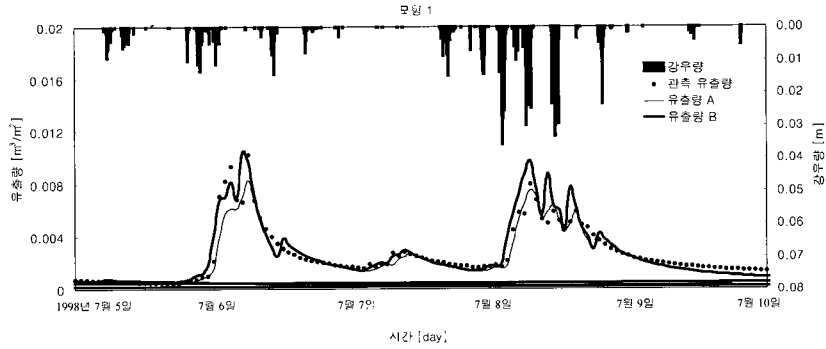


그림 4(a)

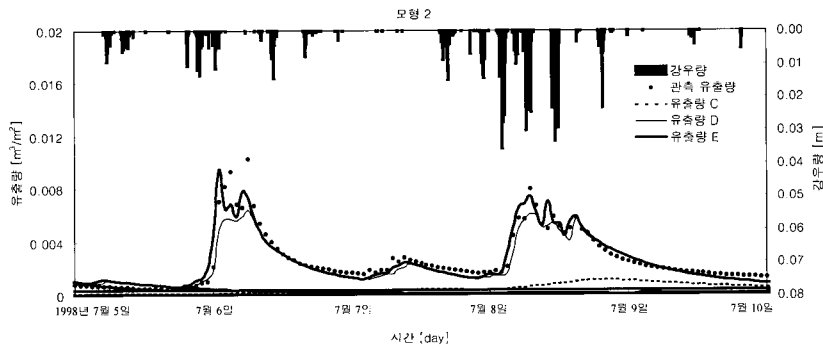


그림 4(b)

그림 4. 원형 TOPMODEL(a)과 수정 TOPMODEL(b)로 유도한 수문곡선

유출량 A: 지하수 유출량, 유출량 B: 지하수 유출량 + 지표면 유출량
 유출량 C: 지하수 유출량, 유출량 D: 지하수 유출량 + 지표하 유출량
 유출량 E: 유출량 D + 지표면 유출량

표 5. 지수형, 선형, 포물선형 지형지수의 통계치

통계치	지수형	선형	포물선형
최소값	1.20	3.32	1.82
최대값	21.95	3410077184	58395.87
평균	5.61	3510031.04	128.03
표준편차	2.37	76476076.28	1897.47
왜곡도 계수	2.18	28.47	19.54
분산 계수	0.42	21.79	14.82

의결과는 표 4와 같다. 목적함수로는 Nash와 Sutcliffe가 제안한 효율계수식인 식 (20)을 사용하였다.(Nash와 Sutcliffe, 1970). 식 (20)에서 O_i 는 i 번째 관측치, P_i 는 i 번째 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치의 평균이다.

$$E = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (20)$$

전체적으로 지수형 투수량 감소계수 함수 형태를 취하는 모형의 예측능이 우수한 것으로 나타났고 식 (17)에 의한 배수방법이 상대적으로 높은 모의효율을 나타내는 데, 이는 지표하부에 대공극을 따른 흐름의 가능성을 제시하고 있으며 설마친 유역에 걸쳐 잘 발달된 단층과 엽리를 따른 지표하 흐름의 존재 가능성도 제시된다. 설마친 유역에 대한 수문과정은 지수형 투수량계수 감소모형과 대공극을 따른 흐름으로서 기술될 수 있음을 지형지수들의 통계치 분석(표 5)과 표 4의 결과로서 알 수 있으며, 기존의 TOPMODEL에 비해 수정 TOPMODEL을 사용하였을 경우, 개선된 모형의 예측능을 관측할 수 있다. 표 4에서 선형 투수량계수 감소

함수 모형을 도입한 모형 3, 6, 9, 13, 16, 19, 23, 26, 29가 동일 조건의 다른 모형에 비해 낮은 예측능을 보이는 결과는 해당 모형의 지형지수 값의 분포가 매우 넓으며, 특히 수로부근에 큰 값들이 과도하게 집중된 영향으로 판단된다. 모형 24, 26에서도 같은 현상을 관측할 수 있으며, 원인은 앞과 동일하게 설명될 수 있다.

표 5는 지수형, 선형, 포물선형 지형지수들의 통계치를 나타낸다. 세 모형의 평균들이 전체 지형지수의 범위에 비해 최소값과 매우 밀접한데, 이는 지형지수의 확률밀도함수가 양의 왜곡도를 가짐을 제시하고 있으며, 유역 전역에 걸친 낮은 지형지수의 넓은 분포를 의미하고 있다. 특히, 선형과 포물선형 형태의 투수량 계수식을 적용한 모형들은 유역전역에 과도하게 낮은 지형지수값이 존재함을 알 수 있는데, 이는 유역전역에 걸쳐 강우시 지표상 흐름의 발생이 적어 기어면적의 분포를 관찰하기 어려움을 나타내고 있다. 선형, 포물선형, 지수형 투수량계수 감소모형 순으로 분포정도가 큼을 분산계수 값의 비교로서 알 수 있다. 양의 왜곡도와 분산계수가 크다는 것은 수로격자에 매우 큰 지형지수 값들이 집중되어 있음을 의미한다. 넓어진 지형지수의 분포에선 모형내 변화에 대한 폭넓은 모의가 가능하지만, 수로격자에 집중된 큰 지형지수 값들에 의한 영향이 배

표 6. 효율계수가 0.5 이상인 모형에서의 전체 유출량에 대한 각 유출량의 비율

Model number	지표면 흐름	지표하 흐름	지하수 흐름
1	0.073		0.927
2	0.059	0.672	0.269
3	0.083	0.912	0.006
4	0.071	0.794	0.135
5	0.099	0.704	0.197
6	0.093	0.902	0.006
7	0.079	0.819	0.102
8	0.105	0.249	0.645
9	0.198	0.780	0.022
10	0.123	0.393	0.484
12	0.108	0.009	0.882
21	0		1
22	0	0.137	0.862
23	0.003	0.977	0.020
24	0	0.899	0.101
25	0	0.864	0.136
26	0	0.981	0.019
27	0	0.899	0.101
28	0.052	0.045	0.903

우 크므로, 사면 유출 모의시 수로격자의 배제 유무에 대한 결정이 필요하다고 판단한다. 유역전체에 대한 지형지수의 분포는 지수형이 다른 것에 비해 고른 분포를 보이는데, 이는 지수형 지형지수가 사면에서 수로로의 흐름을 점진적으로 기술할 수 있음을 설명한다.

그림 4는 표 4에서 우수한 예측능을 보인 원형 TOPMODEL(모형1)과 수정 TOPMODEL(모형 2)로 표현될 수 있는 수문곡선을 표현하고 있다. 전체 수문곡선에서 각 유출성분의 기여분 파악의 용이성과 관측유량과의 비교를 위해 그림 4(a)에서 지표면 유출량은 지하수 유출량과 지표면 유출량을 합하여 나타내었으며, 그림 4(b)에서 지표면 유출량은 지하수 유출량, 지표하 유출량, 지표면 유출량을 합하여 나타내었고, 지표하 유출량은 지하수 유출량과 지표하 유출량을 합하여 나타내었다. 수정 TOPMODEL은 강우초기 유역의 빠른 수문응답을 지표면 흐름과 지표하 흐름으로 기술하고 있지만, 원형 TOPMODEL은 지표면 흐름과 지하수 흐름으로 기술하는데, 이는 지하수층의 낮은 수리학적 전도도를 고려해 볼 때, 물리적인 의미를 지니지 못한다. 또한 강우초기에 일시적으로 형성되는 지표하 흐름은 유출 형성 외에 유역내의 고형물 이송특성, 에너지 흐름, 식생분포, 토양수분분포와도 밀접한 관련성을 가지므로, 수정 TOPMODEL 구조내 지표하 흐름층에 대한 고려는 물리적인 의미를 지니는 개념적 모형으로서의 발전된 형태이다.

표 6은 효율계수가 0.5 이상인 모형에 대해 구한 전체 유출량에 대한 지표면 흐름, 지표하 흐름, 지하수 흐름의 유출비를 나타낸다. 표 5에서 선형과 포물선형의 투수량 감소계수 함수모형의 지형지수 분포가 수로격자에 밀집된 것을 알 수 있는데, 이것은 사면지역의 포화 가능성이 적어 전체 유출량에 대한 지표면 유출량의 비가 작게 되는 결과를 야기시키며, 표 6의 모형 21, 22, 24-27의 결과에서도 확인할 수 있다. 지표하 흐름층의 투수량계수 감소모형이 포물선형일 때 이러한 현상이 잘 관측되지만, 이것은 다른 유역에 대한 많은 적용으로 검토받아야 될 사항이라 판단한다.

5. 결 론

본 연구는 설마천 유역에 대해 기존 TOPMODEL과 지표하 흐름을 고려해 주는 수정 TOPMODEL의 구조 내에서의 유출 해석과, 지하수 흐름층으로의 수직 배수방법, TOPMODEL의 기본 가정인 지표하 투수량 계수의 지수함수적 감소에 대한 해석과 고찰을 시도하

였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 지표하 흐름을 TOPMODEL의 구조 내에서 고려해 준 수정 TOPMODEL이 기존 TOPMODEL보다 강우초기 유출 수문과정에 대한 물리적 과정을 잘 반영하고 있다.
2. 지하수 흐름층으로의 배수방법에 대한 모의를 통하여 도출된 결과는 대공극을 따른 토양내 흐름의 존재가 유출과정에 중요한 요소임을 나타내고 있다.
3. 지표하 투수량 감소계수 함수는 지수형 함수가 선형, 포물선형 함수에 비해 유역 유출모의에 보다 높은 모의효율을 보여줌으로 가장 적절하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김상현, 김경현(1999) "공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용", 한국수자원 학회 논문집, 제32권 5호, pp. 515-524.
2. 이학수, 한지영, 김경현, 김상현(2001) "지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석연구", 한국수자원 학회 논문집, 제34권 4호, pp. 403-411.
3. 정선희, 김상현(1999) "TOPMODEL 투수량계수 감소함수 일반화과정의 적용에 관한 연구", 한국수자원 학회 논문집, 제32권 6호, pp. 637-647.
4. 한국건설기술연구원, (1998) "시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구", 연구보고서, 건기연 98-077, pp. 5-24
5. Ambroise B., K. J. Beven, and J. Freer. (1996a). "Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No 7, pp. 2135-2145.
6. Ambroise B., K. J. Beven, and J. Freer. (1996b). "Application of a generalized TOPMODEL to the small Ringelbach catchment, Vosges, France." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No 7, pp. 2147-2159.
7. 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.
8. Beven, K. J. (1997). "TOPMODEL: A CRITIQUE." *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp. 1069-1085.
 9. Beven, K.J. and Wood, E.F. (1983). "Catchment Geomorphology and the Dynamics of Runoff Contributing Areas." *J. Hydrol.*, Vol. 65, pp. 139-158.
 10. 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.
 11. Scanlon, T.M., Raffensperger, 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.
 12. 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.

(논문번호:02-10/접수:2002.2.20/심사완료:2002.05.21)