韓國水資源學會論文集
第35卷 第2號 · 2002年 4月
pp. 125~136

TOPMODEL 유출계산에서 시간 스케일에 대한 영향 분석

The Effects of Time Scale Variation on The Runoff Calculation of TOPMODEL

김 경 현* / 이 학 수** / 김 원*** / 정 성 원*** / 김 상 현****

Kim, Kyung Hyun / Lee, Hak Su / Kim, Won / Jung, Sung Won / Kim, Sang Hyun

Abstract

The effects of the temporal scale of input hydrological data on runoff simulation have been studied using hydrological data with various time scales. TOPMODEL has been employed to explores these effects. The Genetic algorithm was used to calibrate model parameters. The results of sensitivity analysis in various time scales provide the insight of parameter space for TOPMODEL operation of different time scale. The variation of temporal scale of input hydrological data appeared to have significant impacts on the model efficiency, average water table depth, the ratio of the surface runoff to the total runoff and the calibrated parameters. Generally, the longer the time scale, the more surface runoff and the less average water table depth were calculated. It is found that the impact of time scale to runoff simulation results from the structure of TOPMODEL and the hydrographic morphology.

keywords : TOPMODEL, Parameter Calibration, Temporal Scale

요 지

입력수문자료의 시간 스케일이 모형의 계산결과에 미치는 영향을 검토하였다. 동일한 강우사상에 대한 각기 다른 시간 스케일의 입력수문자료를 확보하고 이를 TOPMODEL에 적용하였다. 매개변수 보정을 위해 유전자 알고리즘을 사용하였다. 민감도 분석 결과는 상이한 시간 스케일이 TOPMODEL의 운영에 있어서 매개변수 공간에 대한 시각을 제공하였다. 입력수문자료의 시간 스케일의 변화는 모의효율과 평균 지하수위, 총유출량에 대한 지표유출과 지표하유출의 비, 그리고 매개변수 보정에 영향을 미쳤다. 시간 스케일이 커질수록 지표수유출이 많아지고 평균 지하수위가 높아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 TOPMODEL의 구조와 수문곡선의 형태 변화에서 비롯된 것으로 나타났다.

핵심용어 : TOPMODEL, 매개변수 보정, 시간 스케일

* 부산대학교 환경기술 · 산업개발연구센타 연구원
Research Assistant, IETI Pusan National Univ., Pusan 609 735, Korea (E mail : kkim@uiuc.edu)
** 부산대학교 청정공학협동과정 석사과정
Graduate Student, Dept. of Environmental Engrg., Pusan National University, Pusan 609 735, Korea
*** 한국건설기술연구원 선임연구원
Research Assistant, KICT, Koyang, Kyonggi 411 712, Korea
**** 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg., Pusan National University, Pusan 609 735, Korea
(Email : kimsangh@pnu.edu)

1. 서 론

GIS의 발전과 함께 격자기반의 개념적 수문 모형의 개발과 적용이 매우 활발하게 진행되고 있다. 이들 모형의 특성은 대상유역의 수문학적 거동이 각각의 물수지를 구성하는 요소의 단순화된 수학적 식으로 개별격자에서 구현되고 있다는 점이다. 이러한 특성을 가진 모형은 유출을 하나 혹은 그 이상의 함수로 표현하는데, 일반적으로 경사도에 대한 비례함수이거나 토양수분함량에 대한 함수 등이 대표적이다. 유역의 공간적 특성 혹은 격자크기와 같은 공간 스케일은 이 함수들의 상수를 결정함으로써 모형에 영향을 주게 된다. 또한 계산시간 간격과 같은 시간 스케일의 문제는 함수의 변수와 관련되어 모형의 계산결과에 영향을 준다. 반대로 함수의 간략 화된 표현형태는 적용하는 대상의 시간적·공간적 특성을 제한한다. 수문학적 현상의 공간적·시간적 스케일에 대한 고찰은 모형의 실제 적용시 요구되는 기준을 제공해 주는데, 예를 들면 격자의 크기, 적용가능한 유역의 크기, 계산시간간격, 고려되어야 할 수문요소 등이다. 본 연구의 수행을 위해 선택된 TOPMODEL은 지형적 영향을 포함하는 개념적 수문 모형이다. 1979년 Kirkby와 Beven에 의해 개발된 이래로 많은 유역에서 적용성을 검토 받았으며 (Beven 등, 1979; Iorgulescu 등, 1994; Holko 등, 1997) 지형, 토양수분, 기후 등의 수문학적인 영향을 분석하는 도구로 폭넓게 사용되었다(Wolock, 1995; Zhang 과 Montgomery, 1994; Western 등, 1999; Dietterick 등, 1999). 특히 스케일 문제에 있어서 대표 단위 면적(Representative Elementary Area, 이하 REA) 개념(Wood 등, 1988)을 포함한 수문학적 유사성 문제, 적정격자크기의 결정에 관한 문제 등 주로 공간 스케일 문제를 이해하는데 많은 기여를 했다 (Wood 등, 1995; Wood 등, 1990; Zhang 등, 1994). 모형의 구조가 간단하며 사용자에 의해 손쉽게 변형이 가능하다는 이점은 광범위한 연구에 활용이 가능하도록 했다. TOPMODEL의 공간 스케일에 관한 문제는 앞선 연구를 통해 많은 부분이 제시되어졌으나 실용적인 측면에서의 시간 스케일에 대해서는 충분하지 않았다. 그 결과 개념적 수문모형이 대상으로 하는 수문현상을 구현하기 위한 시간 스케일의 결정은 주어진 수문자료의 스케일에 의해 결정되거나 경험적인 직관에 의존하는 경우가 많아 계산 결과에 부정확성을 가져올 수 있었다. 이와 같은 배경에서 본 연구는 대상유역의 고정된 공간 스케일에 대해 다양한 시간 스케일에 결쳐 TOPMODEL을 적용하여 시간 스케일의 변화가 개념적 수문모형의 하나인 TOPMODEL의 유출계산에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 모형의 구조 내에서 이해하기 위해 수행되었다.

2. TOPMODEL 개요

TOPMODEL은 다음과 같은 세가지 기본 가정에 근거하여 복잡한 수문과정을 간명하게 개념화한 함수에 기반하고 있다. 첫째 유역 내에서 물의 움직임은 정상상태로 가정된다. 이 가정은 지형지수 즉, $\ln(a/\tan\beta)$로 토양의 포화정도를 나타낼 수 있음을 의미한다. 여기서 a는 상류로부터의 흐름 기여면적이며 $\tan\beta$는 지표표고 경사이다. 둘째, 유역 내 지하수면의 동수경사가 지표면 경사와 같다는 가정이다. 이에 따르면 지하수면의 동수경사가 지표표고 경사 $\tan\beta$로 표현가능하다. 세번째 가정은 수리학적 전도도 K_s가 지표면으로부터 지수함수적으로 감소한다는 가정이다. 이 가정은 대상 유역의 토양구조에 따라 달리 적용될 수 있음이 제안된 바 있다(Ambroise 등, 1996a; Ambroise 등, 1996b). 세 번째 가정은 다음과 같이 표현된다.

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \tag{1}$$

여기서 K_0는 지표면에서의 수리학적 전도도, f는 감소계수, z는 아래방향으로의 깊이이다. 또한 두 번째 가정에 의해 Darcy의 법칙을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = T_i(z_i)\tan\beta_i \tag{2}$$

여기서 z_i는 i 지점에서의 지표에서 포화지점까지의 깊이, T_i는 포화 투수량계수, β_i는 사면의 경사도, q_i는 횡방향 유출이다. 식 (1)을 지하수위인 z_i에서 전체 토양 깊이까지 적분함으로써 T_i를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i(z_i) = \frac{K_o}{f}\exp(-fz_i) \tag{3}$$

식 (3)의 결과를 식 (2)에 넣은 후 첫 번째 가정을 적용하면 다음과 같이 전개된다.

$$a_i R = T_0 \tan\beta_i \exp(-fz_i) \tag{4}$$

여기서 a_i는 i지점을 통과하는 흐름에 대한 상류기여면적이며, R은 공간적으로 일정한 유입율이다. T_0는 지표면에서의 투수량계수이다. 식 (4)를 z_i에 대해 정리하고 유역에 대해 평균한 뒤 식 (4)을 결합시켜 정리하면 아래와 같은 TOPMODEL의 지배 방정식을 얻을 수 있다(Franchini M. 등, 1996).

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f}[\lambda^* - \ln(\frac{a_i}{\tan\beta_i})] \quad (5)$$

여기서 $\bar{z}$는 지하수위까지의 평균깊이이다. 한편 $\ln(a_i/\tan\beta_i)$는 지형지수이며 λ^*는 지형지수의 유역 평균값이다. 이 식으로부터 한 격자에서 발생하는 지표유출을 계산한다. 한편 식 (4)의 우변을 수로길이의 2배로 적분하면 수로로 유입되는 지표하흐름을 의미하는 아래 식을 구할 수 있다. 수로길이의 2배를 하는 것은 q_i가 수로주변을 따라서 적분되기 때문이다.

$$Q_{subsurface} = Q_0 \exp[-f\bar{z}] \quad (6)$$

여기서 Q_0는 유역의 완전포화시 기저유출값이며 아래와 같이 표현된다.

$$Q_0 = AT_0 \exp(-\lambda^*) \quad (7)$$

TOPMODEL의 총유출량은 다음의 계산된 각 항의 합이다.

$$Q_{total} = Q_{direct} + Q_{return} + Q_{subsurface} \quad (8)$$

위 식에서 Q_{direct}는 포화지역에 내린 강우로써 곧바로 유출에 기여하는 양을 말하며, Q_{return}은 포화지역의 지표아래에서 지표로 발생하는 흐름으로 이 두 가지가 지표유출을 형성한다. 따라서, 총유출은 크게 지표유출과 지표하유출로 나누어진다.

그런데 식 (2)나 식 (6)에서 결국 유출량은 경사도와 지하수위와의 함수로 표현되고 있음을 알 수 있다.

3. 연구 방법

3.1 입력수문자료 작성

동일한 유역의 동일한 지점에서 시간 스케일이 서로 다른 수문자료를 직접 측정하여 획득하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 대안적인 방법으로 한국건설기술연구원에서 계측한 설마천 수문자료중 1998년 자료 중 6월 28일부터 8월 30일까지의 10분 간격의 강우자료와 유출자료를 이용해 시간간격 30분, 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간의 입력자료를 마련했다. 이 때 실제로 각각 관측한 것과 같은 효과를 가지기 위해 강우자료는 누가값으로 계산하고 유출자료는 평균값으로 계산했다(표 1). 얻어진 7개의 입력 자료에서 전체 강우량의 합은 동일하며 유출량은 평균에 의해 소실된 차가 존재하지만 그 크기는 미미하다. 강우자료의 시작부분은 선행강우조건의 고려를 위해 강우가 오지 않은 시간으로 했다.

3.2 매개변수 보정

본 연구에서는 매개변수 보정을 위해 유전자 알고리즘을 사용했다. 유전자 알고리즘은 자연의 유전학(natural genetics)과 자연선택(natural selection)의 원리에 바탕한 최적해 탐색기법이다(Goldberg, 1989). 이전의 최적해 탐색이 국부탐색이었는데 비하여 유전자 알고리즘은 여러해를 동시에 탐색하는 전역탐색(global search)을 수행해 전역적인 최적해를 찾을 확률이 기존의 방법에 비해 크다는 특징이 있다. 유전자 알고리즘은 다음 세 가지 기능에 의해 진화와 도태의 과정을

표 1. 강우입력자료와 유출입력자료의 변환

강우자료			유출자료		
10분	*10분에서 1시간으로의 자료전환*	1시간	10분	*10분에서 1시간으로의 자료전환*	1시간
0.00000000			0.00038075		
0.00000000			0.00036056		
0.00000000	*10분자료누적*		0.00033932	*10분자료평균 * 시간스케일*	
0.00000000			0.00031920		
0.00001667			0.00030671		
0.00001667		0.000333	0.00029487		0.000334

반복하는데, 첫째는 재생(reproduction)으로서 잘 적응한 해들은 살아남고, 잘 적응하지 못한 해들은 도태되도록 유도하는 조작법이다. 본 연구에서는 개체군 중에서 일정한 개수의 개체를 임의로 선택하여 그 중에 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음 세대에 남기는 토너먼트 선택법(tournament selection)을 이용하였다. 둘째는 교배(crossover)인데 두 부모해의 유전 정보를 임의의 위치에서 부분적으로 교환함으로써 새로운 자손해를 생성한다. 본 연구에서는 한 부분에서만 유전정보의 교환이 이루어지는 단일지점교배(single-point crossover)를 이용하였다. 셋째는 돌연변이(mutation)로서 부모해로부터 자손해로 전달되는 특정한 유전정보에 대하여 무작위적인 변형을 시도함으로써 전체 해 집단에서 배제된 새로운 개체를 발생시키거나 진화 과정에서 상실한 특정 유전정보의 재현을 시도하는 조작방법이다. 본 연구에서는 점프 돌연변이(jump mutation)를 적용하였다. 또한 본 연구에서는 개체수(population number)와 세대수(generation number)를 모두 100으로 두었다. 그림 1에 유전자 알고리즘의 흐름도를 나타내었다.

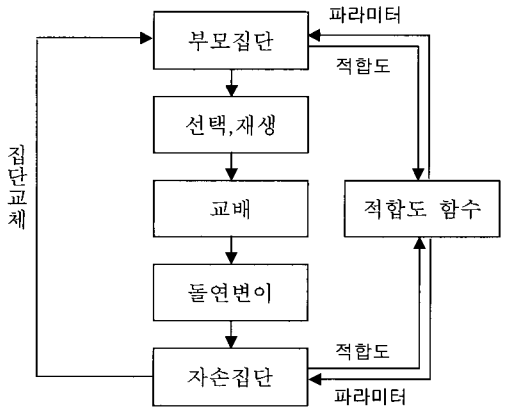


그림 1. 유전자 알고리즘의 흐름도

TOPMODEL의 매개변수는 프로그램에 따라 다소 차이는 있으나 m, T_0, TD, $SRMAX$, SR_0등 5개가 주요 매개변수이다. 여기에서 m은 공극률을 고려한 감소계수[m]이며 T_0는 횡방향 투수량 계수 [$\ln(\frac{m^2}{hr})$]($\ln T_0$형태로 입력된다), TD는 비포화층에서의 체류시간[hr], $SRMAX$는 식생뿌리층의 최대 저류량[m], SR_0는 식생뿌리층에서의 초기 저류부족량[m]이다. 이 중 SR_0는 모형 내부에서 항상 $SRMAX$보다 클 수 없으므로 보정과정에서도 이를 유지시켰다. 목적 함수로는 식 (9)에 나타낸 Nash와 Sutcliffe가 제안한 효율계수식을 이용했다(Nash와 Sutcliffe, 1970).

$$E=[1.0-\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O_i})^2}]\times 100 \qquad (9)$$

여기서 O_i는 i 번째 관측치, P_i는 i 번째 모의치, 그리고 $\overline{O}$는 관측치의 평균이다.

3.3 매개변수 변동성 분석

선택된 최적 매개변수 중 m을 제외한 나머지를 고정시킨 후 Monte Carlo방법을 적용하여 매개변수의 변동성을 분석하였다. T_0, TD, $SRMAX$, SR_0에 대해서도 동일한 방법을 적용했다. Monte Carlo방법은 주어진 매개변수값의 범위내에서 난수를 발생시켜 모의하는 기법으로서 난수발생횟수와 매개변수 범위를 적절히 조절함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있다. 이때 발생하는 난수는 균등분포를 가지며 카이제곱 적합도 검증을 거쳤다. m은 0~0.1의 범위에서 T_0는 -2~6 범위에서 매개변수 변동성 분석을 실시하고 60% 이상의 효율계수값을 가지는 것을 도시했다. TD는 0~120hr의 범위에서 모의를 실시했다. $SRMAX$는 0~2[m] 의 범위를 선정하여 모의하였다. SR_0는 항상 $SRMAX$ 보다 작은 값을 가져야 함으로 0[m]~$SRMAX$[m]의 범위 내에서 모의하였다. 해구간의 범위가 이와 같을 때 탐색 구간간격크기는 해구간 간격의 210 분의 1이다.

4. 모형의 적용

4.1 대상유역

대상유역으로 경기도 파주시 적성면 설마리에 위치한 설마천 시험유역을 선정했다. 이곳은 95년부터 한국건설기술연구원이 시험유역으로 선정, 운영하고 있는 유역으로서 임진강의 제1지류이다. 임진강하구에서 46km 상류에 위치하며 전체 유역면적 18.5km^2, 유로연장 11.3km인 수지상 형태를 가지고 있는 하천이다. 이중에서 설마천 유역의 중류부에 위치한 영국군 전적비를 출구점으로 하는 지역을 대상유역으로 선정했다. 대상유역의 면적은 8.5km^{2}이며 유로연장은 5.8km인

전형적인 산지 하천으로 유역면적은 사면유출의 모의에 적절한 것으로 판단된다. 이 지역은 경기편마암 복합체로 구성되어 있으며 절리가 비교적 많이 발달하고 경사가 급하다. 일반적으로 편마암은 화강암으로부터 기원한 것으로 불투수층으로 분류될 수 있으나, 이 지역의 경우 절리와 엽리의 발달로 지하수를 함유할 수 있을 것으로 판단된다(한국건설기술연구원, 1998).

4.2 수치고도모형

설마천 시험유역이 위치한 곳은 군사시설이 위치한 이유로 1:50,000 보다 자세한 지형도를 얻기 힘들다. 본 연구에서는 보다 정밀한 수치고도모형(digital elevation model; DEM)을 얻기 위해 GRASS(Clamons 등, 1997)의 등고선 내삽 기능을 이용, 내삽된 등고선으로부터 DEM을 구축했다. 먼저 GRASS의 r.contour 명령을 이용해서 10m 간격의 등고선을 추출하고 이를 지형도에서 얻은 20m 등고선과 같은 고도는 교체하고 나머지는 보존하여 내삽된 10m 간격의 등고선을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 DEM은 원 지형도로부터 얻어진 DEM보다 평지지역이 적어 수문모형에의 적용에 보다 용이했다.

이 수치고도지도로부터 지형지수계산은 다방향 흐름(multiple flow direction) 알고리즘을 적용해 계산하였다(Quinn, 1991). 그림 2는 설마천 대상유역의 해상도 10m인 수치고도지도이며 그림 3은 이를 이용해 계산한 지형지수지도이다.

5. 결과 및 토의

유전자 알고리즘을 이용한 매개변수의 보정 결과 중 최대모의 효율(Nash와 Sutcliffe, 1970)을 표 2에 나타내었다. 식 (9)에 의해 계산된 최대 효율계수 값은 6시간 스케일까지 비교적 일정하다 12시간과 24시간 스케일에서는 점차 작아졌다. 매개변수 m은 시간 스케일의 변화에 따라 약간의 불규칙한 변화를 보인 반면 T_0는 작아지는 경향을, 그리고 TD는 증가하다 다시 작아지는 경향을 보였다. 이는 최대 효율계수의 기준을 TOPMODEL 가정 하에서 보정한 결과이고 다른 시간 스케일에서 TOPMODEL을 적용하는 기준이 될 수는 있다. 그러나, 매개변수가 의미하는 각각의 시간 스케일에서 물리적인 수문기작을 설명하기 위해서는 TOPMODEL 기본가정에서 무시된 정상상태, 지표하면 균질성, 암반층 두께의 공간적 변화성 등의 보다 발전된 형태의 수문고찰이 필요하다.

모형이 시간 스케일에 독립적이면 동일한 매개변수 적용에 대해 각 시간 스케일에서의 모형 예측능이 동일해야 한다. 이를 검증하기 위해 표 2의 30분에서의 매개변수 값들로 각 시간 스케일에서의 모형 예측능을 구하여 표 3에 표기하였다. 표 3은 시간 스케일의 변화가

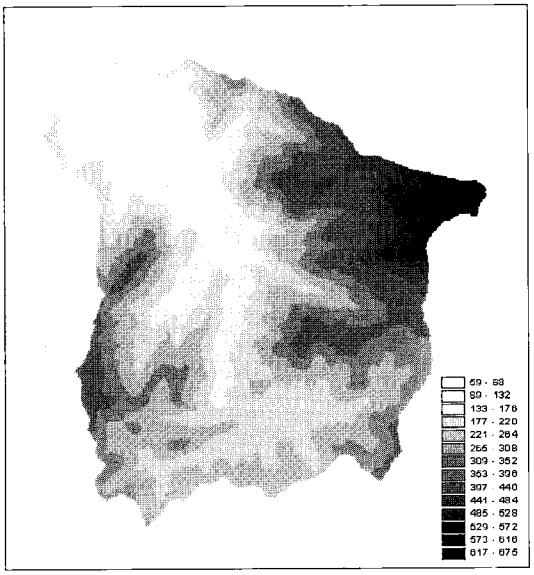


그림 2. 설마천 대상유역의 수치고도지도 (단위 : m)

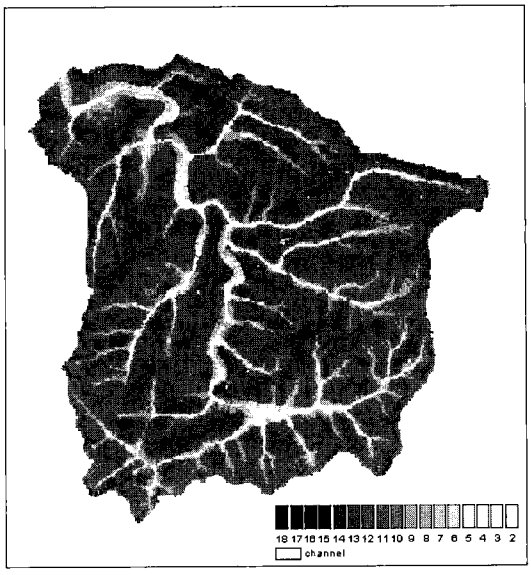


그림 3. 지형지수지도 (단위 : $\ln(a / \tan\beta)$)

표 2. 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 보정 결과

입력자료	매개변수					효율[%]
	m [m]	T_0 [ln(m^2/hr)]	TD [hr]	$SRMAX$ [m]	SR_0 [m]	
30분	0.03380	2.87640	2.34380	0.000251	0.000074	88.989
1시간	0.03470	2.98570	0.49020	0.000001	0.000001	89.117
3시간	0.03680	1.84540	10.73360	0.000255	0.000101	87.609
6시간	0.04194	1.00192	18.39179	0.000133	0.000049	88.115
12시간	0.03870	0.58020	16.68460	0.000009	0.000001	86.515
24시간	0.04504	0.00001	6.14848	0.000041	0.000039	82.468

표 3. 각 시간 스케일에 대한 동일 매개변수의 모의결과

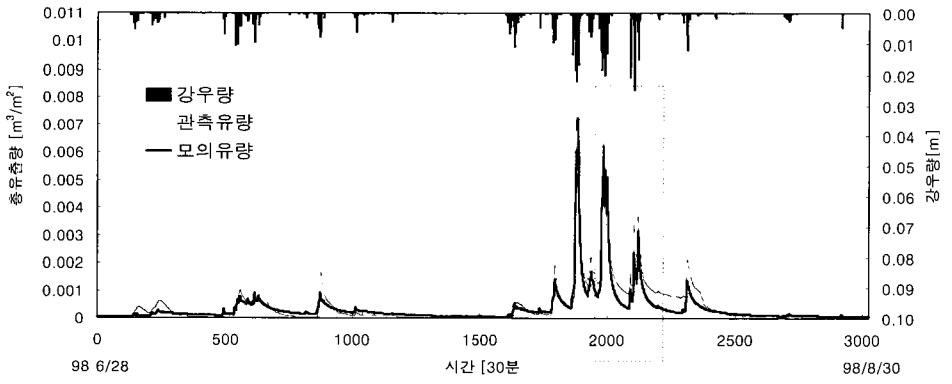
입력자료	효율 [%]	지표유출 [m]	지표하유출 [m]	총유출 [m]	지표유출/총유출
30분	88.989	0.10	1.00	1.10	0.0939
1시간	88.584	0.10	0.98	1.08	0.0966
3시간	85.566	0.11	0.95	1.06	0.1046
6시간	80.588	0.55	0.50	1.05	0.5242
12시간	82.704	0.65	0.37	1.02	0.6390
24시간	78.274	0.75	0.26	1.01	0.7448

모형 예측능과 관련이 있음을 표현하고 있으며, 이는 1시간 스케일로 기술된 TOPMODEL의 구조에 대한 검토의 필요성을 제시하고 있다.

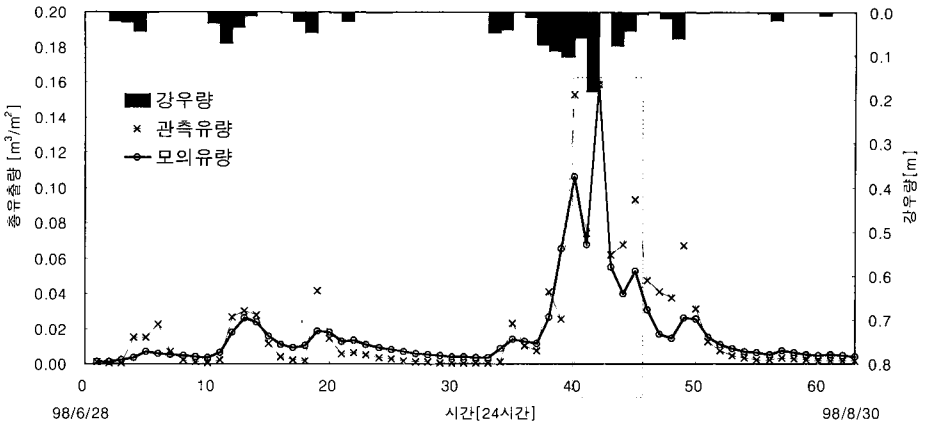
각각의 시간 스케일에 대해 계산되어진 수문 곡선 중 30분과 24시간의 수문곡선을 그림 4에 도시했다. 30분 스케일의 경우 감소곡선의 형태가 뚜렷이 나타난 반면 24시간 스케일의 경우는 그렇지 못하다.

총유출량을 구성하는 두 가지 유출 요소 중 지표유출량이 총유출량에서 차지하는 비가 시간 스케일이 증가함에 따라 점차 증가하는 결과를 얻었다(표 4). 총유출량은 시간 스케일의 크기 증가와 관계없이 거의 일정했으며 지표유출량은 증가하는 경향을 보였다. 반면 지표하유출량은 총유출량에서 지표유출량을 제외한 값이므로 점차 작아지는 경향을 보였다.

효율계수값을 최대로 하는 매개변수의 보정이 이루어졌기 때문에 계산되는 수문곡선은 관측수문곡선의 추



(a) 30분 시간스케일에 대한 수문곡선



(b) 24시간 시간 스케일에 대한 수문곡선

그림 4. 30분과 24시간 시간 스케일의 수문곡선 비교

표 4. 유출요소의 양과 비율

입력자료	지표유출 [m]	지표하유출 [m]	총유출 [m]	지표유출/총유출
30분	0.10	1.00	1.10	0.0939
1시간	0.10	1.04	1.14	0.0913
3시간	0.17	0.95	1.12	0.1502
6시간	0.24	0.88	1.12	0.2164
12시간	0.32	0.81	1.13	0.2821
24시간	0.39	0.72	1.11	0.3543

이를 최대한 따라가게 되며 따라서 계산 시간단위가 증가하면 각 계산시간동안 계산되어지는 강우량과 이로부터 계산되는 유출량의 크기가 커진다(표 1). 식 (6)에 의하면 단위계산시간 동안 유입되는 강우와 계산되어진 지표하 유출량이 많아지기 위해서는 지하수위가 증가해야 하는데 이는 T_0가 이러한 효과를 상쇄할 만큼 증가하지 않는 한에서 가능하다. 그림 5는 각 시간 스케일에서의 유역평균 지하 저류부족량을 나타내며, 이는 지하수면의 거동으로 해석될 수 있다. 그림 5에서 계산시간 스케일이 증가할수록 지하수위가 상승한 모형의 보정 결과를 알 수 있다.

그런데 지하수위의 계속적인 상승은 지표유출의 증가를 가져오게 되는데(표 3) 이는 지하수위가 증가함에 따라 국부적인 지하수위가 지표보다 높은 포화지역의 넓이가 지수적으로 증가하기 때문이다(그림 6(a)와 6(b)).

이는 총유출량은 일정함에도 불구하고(표 3) 지하수위 상승에 의한 지표하유출량의 증가와 지표유출량이 동시에 증가하는 모순적인 상황을 상정하므로 지표하유출량이 줄어든 표 3의 결과로 귀결된 점을 해석하기 위해서는 수문곡선의 형태와 계산된 매개변수의 변화를 동시에 고려할 필요성이 있다. 이를 위해 먼저 30분 시간 스케일과 24시간 시간 스케일의 수문곡선 중 일부를 그림 7에 나타냈다.

그림 7에서 관측수문곡선의 형태는 30분 시간 스케일의 경우 감소곡선의 완만한 부분이 잘 나타나는 반면 24시간 스케일에서는 감소곡선의 특성이 거의 보이지 않는다. 따라서 30분 시간 스케일의 경우 지표하유출의 비율이 높을 때 모형의 효율계수값이 높아지며, 반대로 24시간 스케일의 경우 지표유출의 비율이 높을 때 모형의 효율계수값이 높아진다. 그림 7에서 30분 시간 스케일에서는 지표하유출에 의해 수문곡선의 형태가 결정되

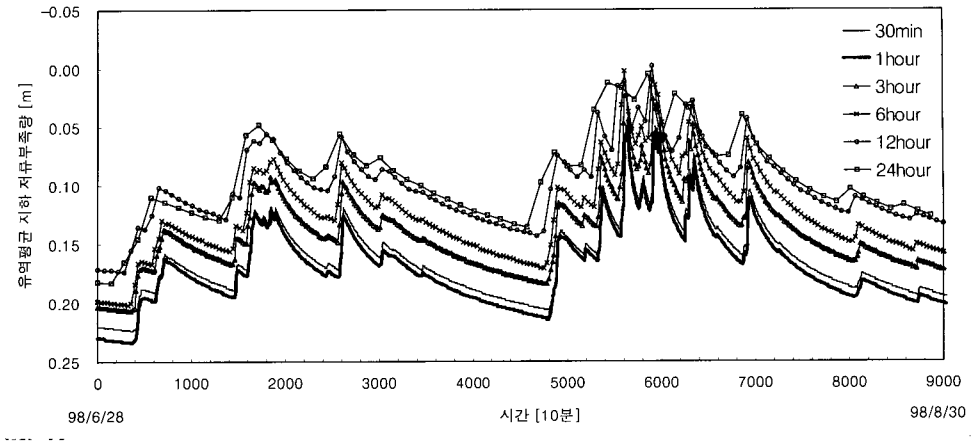
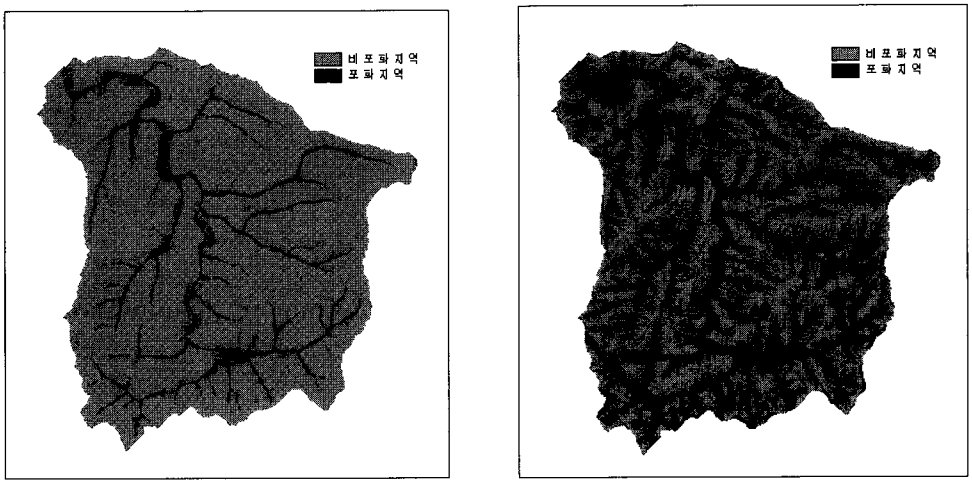


그림 5. 시간 스케일 변화에 따른 지하수위의 변화



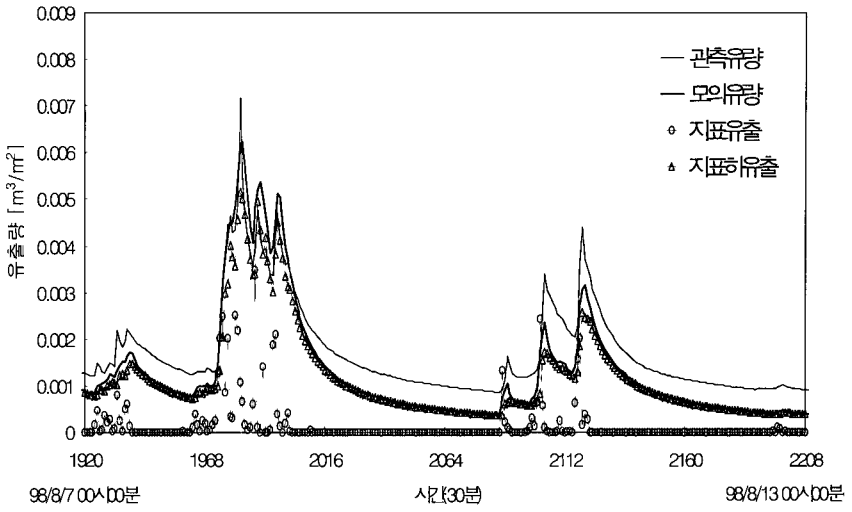
(a) 30분 시간 스케일 (b) 24시간 시간 스케일

그림 6. 모의 38일째(1998/8/4) 동일 시각에서의 포화지역의 공간적 분포

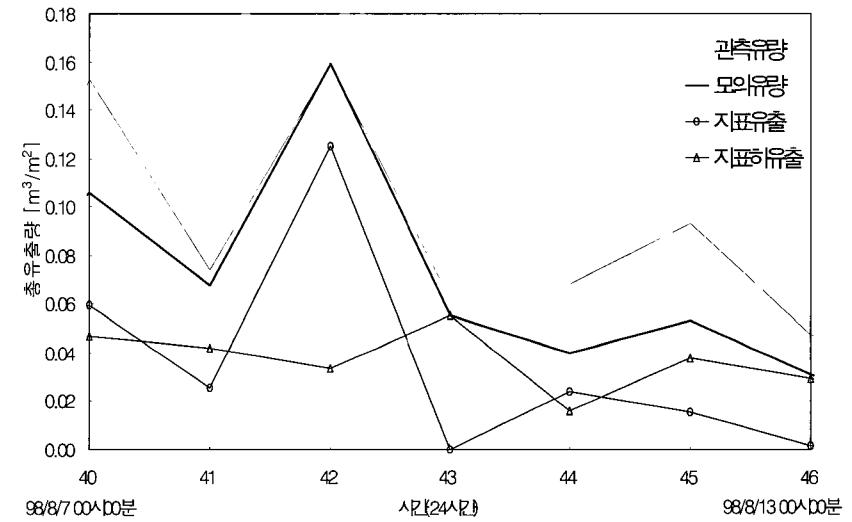
나 24시간 스케일에서는 지표유출이 수문곡선의 형태에 크게 기여함을 알 수 있다. 따라서 시간 스케일의 증가에 따른 총유출에 대한 지표유출의 비가 증가하는 이유는 수문곡선의 형태의 변화와 앞서 제시한 지표하흐름을 결정하는 TOPMODEL의 함수형태(식 (6))에 기인한다.

이러한 결론은 매개변수 변동성 분석에 의해 뒷받침되었다. 매개변수 m, T_0, TD에 대한 변동성 분석의 결과를 그림 8에 나타내었다. $SRMAX$와 SR_0는 시간 스케일에 따른 변화가 거의 없었기 때문에 도시하지 않았다.

그림 8에서 m의 곡선은 시간 스케일에 대한 변화가 거의 없었다. 반면 T_0는 시간 스케일이 작은 경우에 값이 크고 변동성이 작으며 시간 스케일이 커지면서 값이 작아지고 변동성이 증가한다. T_0가 작으면 지표하흐름의 양이 작고 이는 지표흐름의 증가로 귀결된다. 따라서 그림 8에서 나타난 T_0의 변화는 시간 스케일이 증가함에 따라 지표하유출을 줄이고 지표유출을 늘이므로 앞서 제시된 수문곡선의 형태변화에 따른 결과와 일치한다. 변동성이 증가하는 것은 지하수위 증가에 따른



(a) 30분 시간 스케일

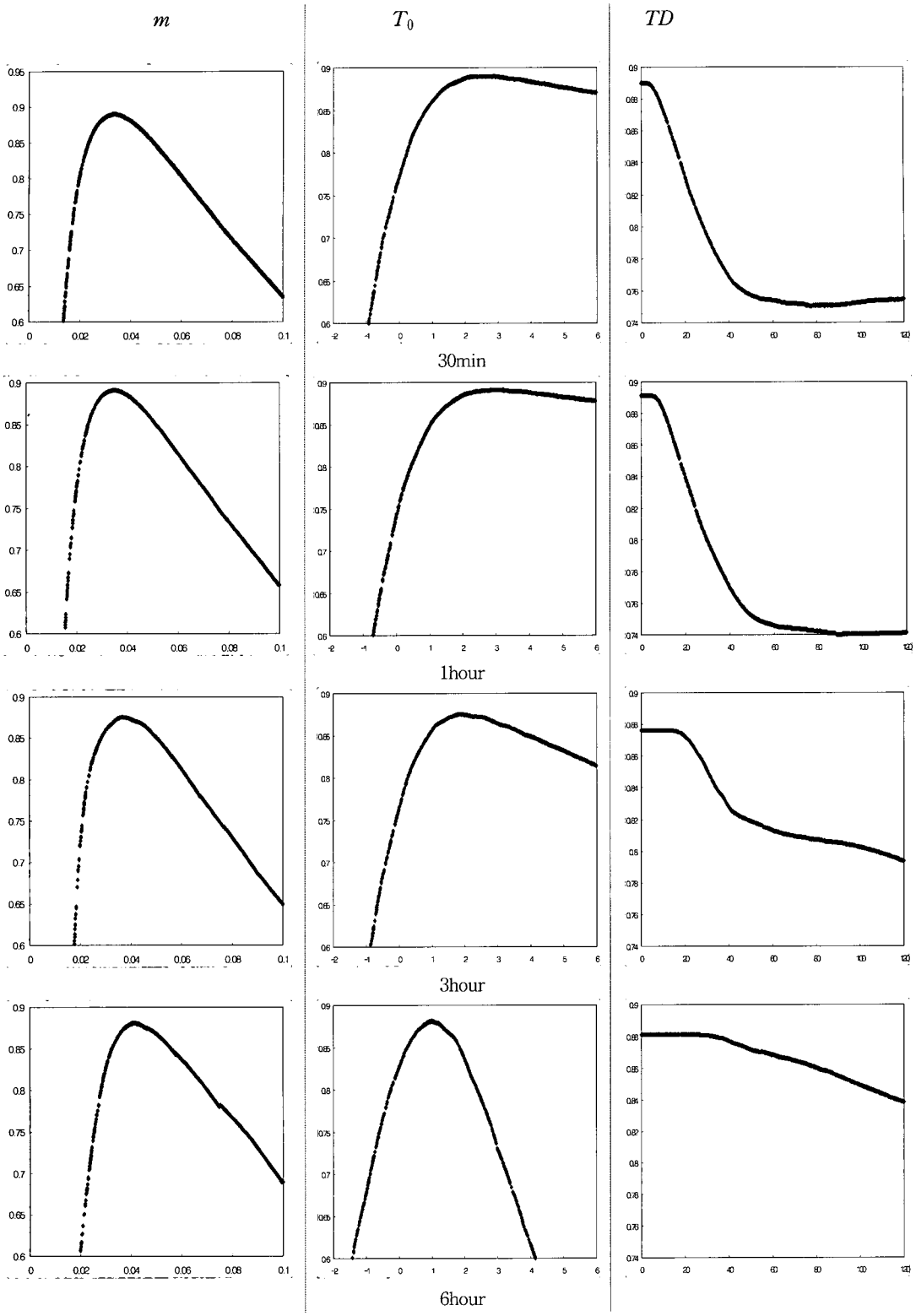


(b) 24시간 시간 스케일

그림 7. 30분과 24시간 시간 스케일에서의 각 유출항에 대한 비교

포화면적의 변화가 지수적이기 때문에 지표유출의 비중이 높은 시간 스케일의 경우에 T_0의 변동성이 높은 것으로 판단된다. TD는 시간 스케일이 증가함에 따라 변동성이 감소되었다. 이는 T_0에 의해 지표하유출의 양이 작아지고 따라서 TD의 변화에 의한 포화지역으로의 흐름유입의 변화가 전체 수문곡선에 미치는 영향이 점차 작아지기 때문이다.

이상의 결과에서 Nash와 Sutcliffe가 제안한 효율


m
T_0
TD
30min
1hour
3hour
6hour

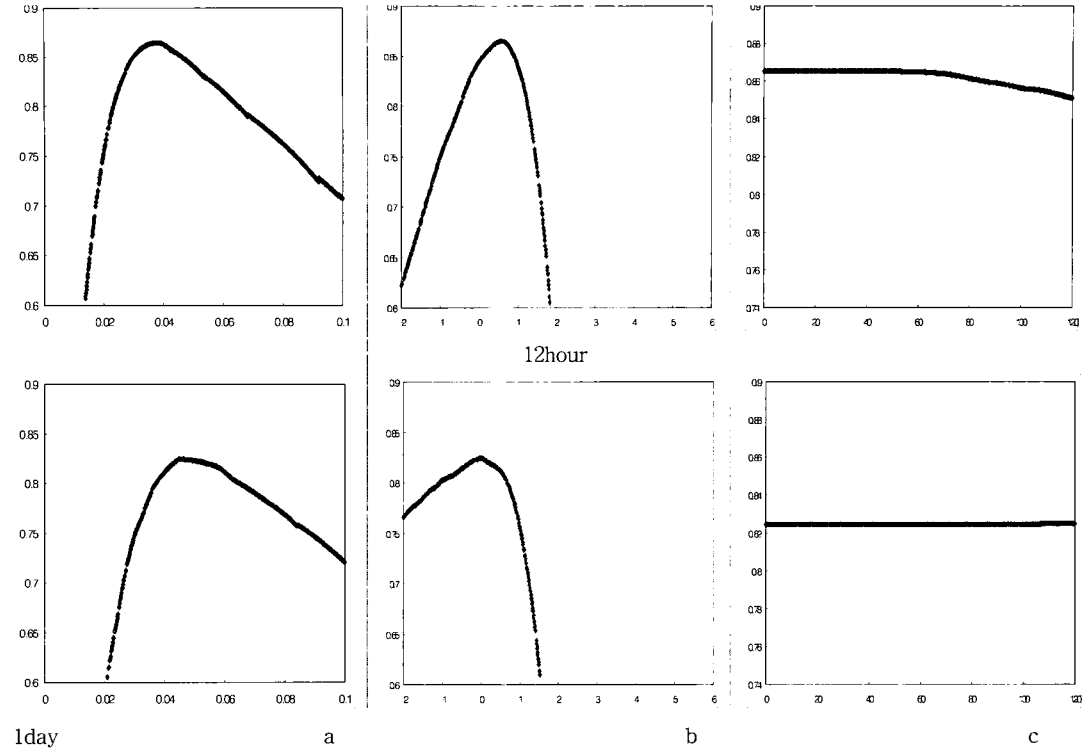


그림 8. 시간 스케일 변화에 따른 매개변수의 변화
(세로축: 효율계수, 가로축: 매개변수값, 단위: m[m] , T_0[ln(m^2/hr)] , TD[hr])

계수식(식 (9))에 의한 효율계수를 최대로하는 매개변수 보정은 상이한 시간 스케일에 의해 운영될 때 TOPMODEL의 계산결과 즉, 효율계수, 보정된 매개변수, 지표하유출량, 지표유출량, 지하수위를 다르게 하며 이것이 TOPMODEL의 구조와 관측 수문곡선 특성의 변화로부터 해석될 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 대상유역의 고정된 공간 스케일에 대해 다양한 시간 스케일에 걸쳐 TOPMODEL을 적용하여 시간 스케일의 변화가 TOPMODEL의 유출계산에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 모형의 구조 내에서 이해하기 위해 수행되었다. 분석 결과 공극률을 고려한 감소계수 m은 시간 스케일의 증가에 따른 변화가 적었으며 횡방향 투수량 계수 T_0는 전반적으로 값이 줄어들었고 변동성이 높아졌다. 비포화층에서의 체류시간 TD는 변동성 작아지는 결과를 보였다. 효율계수를 목적으로하는 매개변수의 보정은 상이한 시간 스케일에서 적용될 때 TOPMODEL의 지표유출량, 지표하유출량, 지하수위 거동, 포화지역의 공간적인 분포에 큰 영향을 미쳤다. 이러한 차이는 관측 수문곡선의 특성변화에 대응하는 매개변수의 변화와 TOPMODEL의 구조에서 분석될 수 있었다. 따라서 적정 시간 스케일은 시험유역의 지하수위 변동관측, 공간포화 양상 관측 등의 보다 정밀한 수문현상 관측과 TOPMODEL 모의와의 비교분석을 통해 결정되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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

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. and Kirkby, M.J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol., Sci. Bull.*, Vol. 24(1), pp. 43-69.

Clamons, S.F. and Byars, B.W. (1997). *GRASS4.2 User's Reference Manual.*

Dietterick, B.C., Lynch, J.A. and Corbett, E.S. (1999). "A calibration procedure using TOPMODEL to determine suitability for evaluating potential climate change effects on water yield." J. the Amer. *Water Resour. Assoc.*, Vol. 35. No. 2 pp. 457-468.

Franchini, M., Wendling, J., Obled C. and Todini E. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *J. Hydrol.*, Vol. 175, pp. 293-338.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass pp. 412

Holko, L. and Lepistö, A. (1997). "Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL." *J. Hydrol.*, Vol. 196, pp. 361-377.

Iorgulescu, I. and Jordan J.-p. (1994). "Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment." *J. Hydrol.*, Vol. 159, pp. 255-273.

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.

Western, A.W., Grayson, R.B., Bloschl, G. and Willgoose, G.R. (1999). "Observed spatial or ganization of soil moisture and its relation to terrain indices." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 3, pp. 797-810.

Wood, E.F., Sivapalan, M., Beven, K.J. and Band, L. (1988). "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling." *J. Hydrol.*, Vol. 102, pp. 29-47.

Wood, E.F., Sivapalan, M. and Beven K.J. (1990). "Similarity and scale in catchment storm response." *Reviews of Geophysics*, pp. 1-18.

Wood, R. and Sivapalan, M. (1995). "Investigating the representative elementary area concept: An approach based on field data." *Scale Issue in Hydrological Modeling*, pp. 49-70.

Wolock, D.M. (1995). "Effects of subbasin size on topographic characteristics and simulated flow paths in Sleepers River watershed, Vermont." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 8, pp. 1989-1997.

Zhang, W. and Montgomery, D.R. (1994). "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1019-1028.

(논문번호:01-057/접수:2001.07.26/심사완료:2002.02.20)