

# TOPMODEL의 토양수분 변동성 모의에 관한 연구

## A Study on TOPMODEL Simulation for Soil Moisture Variation

김진훈<sup>1)</sup> / 배덕효<sup>2)</sup> / 장기호<sup>3)</sup>

### 1. 서론

유출현상은 강우로 인하여 발생하는 수문과정의 주요 현상으로 이를 모의하기 위한 유출모형은 단순한 경험공식에서부터 강우가 지표면에 떨어져 침투가 발생하고 증발산 작용과 함께 토양내 수분의 이동과정을 통해 지표 및 지하유출이 발생하는 일련의 현상을 설명할 수 있는 개념적 모형까지 다양하게 존재한다. 이들 과정 가운데 대기, 지표 및 지표하로 이어지는 수문순환과정에서 되먹임 역할을 수행하는 토양수분은 연속형(continuous) 유출모형으로 모의가 가능하다(Bae와 Georgakakos, 1994; Georgakakos와 Bae, 1994). 이와같은 유역내 토양수분의 변동성 해석은 실시간 유량예측(Kitanidis와 Bras, 1980; Georgakakos와 Smith, 1990), 기상 및 기후연구(Avissar, 1990; Georgakakos 등, 1995), 농업적 이용측면(Kunkel, 1990)에서 매우 유용한 수단이다. 이에 본 연구에서는 분배형 연속모형인 TOPMODEL의 유역평균 개념의 토양수분 평가에 대한 활용성을 검토하기 위해서 실측된 지하수위 자료를 이용하여 TOPMODEL의 토양수분 모의의 타당성을 규명하고자 한다.

### 2. 모형이론

TOPMODEL의 기본 요소는 지형지수(topographic index)의 산정, 토양수분의 변화 및 지표유출 등으로 구성되어 있다. 이 모형은 소유역내 강우유입에 따라 지표유출이 형성되는 포화면적을 유역의 지형특성 및 토양특성으로부터 결정할 수 있는 모형으로써 다음과 같은 i) 포화층의 흐름은 정상상태(steady state), ii) 유역내 특정지점의 포화층 동수경사는 그 지점의 지표면 경사와 동일, iii) 토양깊이에 따른 전도계수(transmissivity)의 변화는 지수감소 곡선을 갖는다는 가정사항으로부터 식 (1)과 같이 유역내 특정지점의 지하수면 깊이  $z_i(m)$ 를 산정할 수 있고, 이를 유역전체에 적분하여 산정한 유역평균 지하수면 깊이  $\bar{z}$ 와의 관계를 나타내는 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln\left(\frac{ra}{T_0 \tan \beta}\right) \quad (1)$$

$$f(\bar{z} - z_i) = \left[ \ln \frac{a}{\tan \beta} - \frac{1}{A} \sum_i \ln \frac{a}{\tan \beta} \right] - \left[ \ln T_0 - \frac{1}{A} \sum_i \ln T_0 \right] \quad (2)$$

여기서,  $f(m^{-1})$ 는 측면 전도계수(lateral transmissivity)의 감쇠율을 나타내는 모형 매개변수로서 특정지점의 저류부족량(local storage deficit)  $S_i(m)$ 와의 관계를 나타내면 식 (3)과 같다.

1) 기상연구소 예보연구실 연구원

Researcher, Forecast Res. Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

2) 세종대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

3) 기상연구소 예보연구실 선임연구원

Senior Researcher, Forecast Res. Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

$$T = T_0 e^{-S_i/m} = T_0 e^{-fz_i} \quad (3)$$

식 (1)에서  $T_0$  ( $m^2/h$ )는 토양이 포화되었을때 측면 전도계수,  $\tan \beta$ 는 지표면 경사,  $r$  ( $m/h$ )는 특정 시간동안 유역전체에 균일하게 지하수면으로 유입되는 양,  $a$  ( $m^2$ )는 점  $i$ 를 통해 유출되는 단위 등고선 길이당 사면의 면적을 나타낸다. 식 (2)의 우변 첫 번째 항  $\ln(a/\tan \beta)$ 는 지형지수 (topographic index)라 하고, 두 번째 항은 유역평균 지형지수 ( $\lambda$ ), 네 번째 항은 유역평균 전도계수 ( $\ln T_e$ )를 나타낸다. 따라서 유역내 각 지점에서의 전도계수 및 지형지수를 알면 유역평균 지하수면 및 특정지점의 지하수위를 산정할 수 있다.

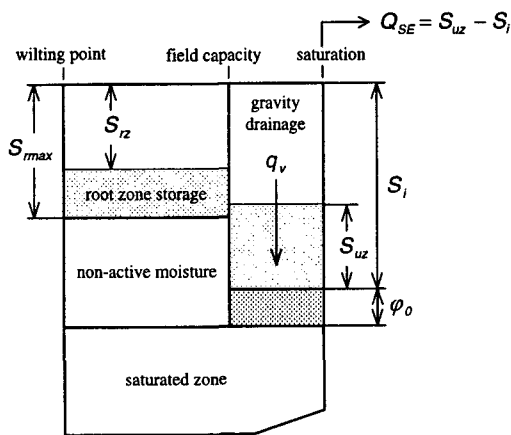


그림 1. TOPMODEL의 토양수분 변화 모식도

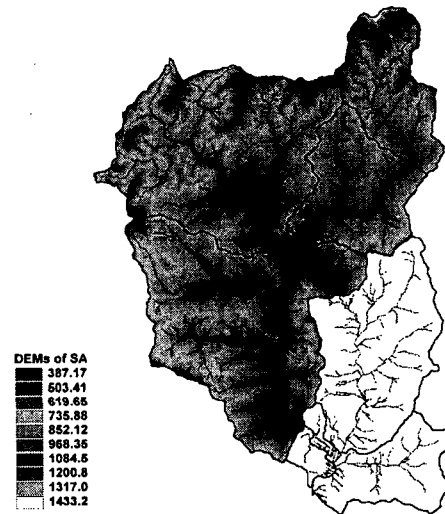


그림 2. 상안미 상류유역 DEM 분포도

한편, 지표면에서 포화영역까지 수분이 이동하는 개념은 그림 1과 같이 토양층을 불포화 영역과 포화영역으로 구분하고 불포화영역에는 위조점(wilting point), 최대보수량 등 토양수분의 상태에 따라 식생영역(root zone storage)과 중력배수영역(gravity drainage)으로 나눈다. 지표로부터 유입된 강우는 먼저 토양식생영역으로 유입되어 식생영역의 저류부족량 ( $S_{rz}$ )은 감소하게 된다. 증발산은 단지 식생영역에서만 이루어지며, 증발량은 식생영역의 수분상태와 잠재 증발량의 함수로 표현된다. 만약  $S_{rz}$ 가 0 이하인 경우 토양식생영역은 유입된 강우로 인해 완전 포화됨을 의미하므로 남은 양은 불포화층의 저류량 ( $S_{uz}$ )으로 저장되며 토양식생영역은 포화상태를 유지한다. 이때  $S_{uz}$ 가  $S_i$ 보다 크게 되면 불포화층은 완전포화 상태를 의미하므로 남은 양은 식 (4)와 같이 지표유출  $Q_{se}$ 을 계산한다. 또한 불포화층에서 포화층으로의 중력배수는 다음 식 (5)로 표현된다.

$$Q_{se} = S_{uz} - S_i \quad (4)$$

$$q_v = \frac{S_{uz}}{S_i t_d} \quad (5)$$

여기서  $t_d$ 는 시간 지체상수 매개변수로서 중력배수를 조절하는 역할을 한다(Beven 등, 1994; 배덕효 등, 2000).

한편, 포화영역에서의 흐름은 지하 유출량  $Q_b$ 로 계산된다. 이것은 불포화층의 토양수분 변화처럼 각 지형지수의 증분마다 계산되는 것이 아니고 일종의 분배 개념으로 길이  $L$ 의  $m$ 개의 구간을 따라 흐르는 지하유량의 합으로 계산되며 모형의 기본 가정사항으로부터 다음 식 (6)과 같이 표현된다 (Beven 등, 1994; Franchini 등, 1996).

$$Q_b = \int_L Q_{b_i} dL = \int_L T_0 \tan \beta \exp\left\{\frac{S_i}{m}\right\} dL \quad (6)$$

### 3. 사례연구

본 연구는 TOPMODEL의 토양수분 변동성에 대한 모의를 위해서 대상 적용구역으로 국제수문개 발계획(IHP)의 평창강 유역을 선택하였다. 토양수분의 변동성을 관측된 지하수위 자료와 비교하기 위 해 자료 존재여부를 검토한 결과 그림 2와 같이 상안미 지점의 관측 지하수위 자료가 일치성이 부합 되어 본 연구에서는 유역면적이 386.12 km<sup>2</sup>에 해당하는 상안미 상류유역을 대상으로 모형 적용을 수 행하였다.

TOPMODEL의 토양수분 변동성 및 모형 매개변수와의 관계를 검토하고자 98년 8월의 홍수사상을 대상으로 토양내 평균토양수분 저류량과 지표 및 지하유출로 대표되는 토양수분양들을 추출하여 그림 3과 같이 비교·분석하였다. 여기에 사용된 지형지수는 그림 2에서와 같은 수치지형도로부터 작성된 40 m 해상도의 DEM 자료로부터 MFD 방법을 사용하여 계산하였으며, 모형의 매개변수는 표 1과 같 이 수동보정법으로 추정된 매개변수를 이용하였다.

표 1. TOPMODEL의 추정된 매개변수

기 호	설 명	단 위	추 정 치
m	지수형 전도계수 감소상수	m	0.014
$T_0$	포화상태의 측면 전도계수	ln(m <sup>2</sup> /h)	0.15
Srmax	식생영역 최대 저류고	m	0.05
Sr0	식생영역 초기 저류고	m	0.001
$t_d$	불포화영역 시간지체 상수	hour	50.
$\nu$	유역 하도내 유속	m/hour	6000.

그림 3에서 Rainfall(mm/hour) 및  $\bar{S}$ (mm)는 각각 유역내 평균강우량 및 평균 저류부족량이고, Q-surf는 그림 1의 모식도에서와 같이 불포화층에서 생성되는 지표유출을 의미하고, Q-base는 포화층 에서의 대표적 흐름인 지하유출이며 Q-total은 이들의 합을 나타낸다. 또한 하단의 Qobs 및 Qcal은 관측 및 계산유량을 의미하는 것으로 Qcal은 Q-surf와 Q-base가 모형의 선형홍수추적을 거쳐 계산된 결과이다. 그림 3은 토양수분의 변화에 따라서 지표 및 지하유출이 어떠한 변동성을 나타내는지를 개 념적 측면에서 고찰할 수 있는데, 우선  $\bar{S}$ 의 증가 및 감소에 따라서 지하유출은 일정량 이상이 되면 서 감소하는 현상이 발생하고 지표유출은 소멸 및 생성을 반복한다. 이것은 저류부족량 형식인  $\bar{S}$ 가 증가함으로써 토양수분이 그 만큼 부족하다는 의미이고 강우에 의해서 토양의 수분이 증가하면  $\bar{S}$ 는 감소하면서 지하유출을 증가시키며 임의의 저류부족고를 만족시키면서 발생하는 과잉 토양수분은 지 표유출에 기인하게 되는 모형개념을 정확하게 반영하고 있다.

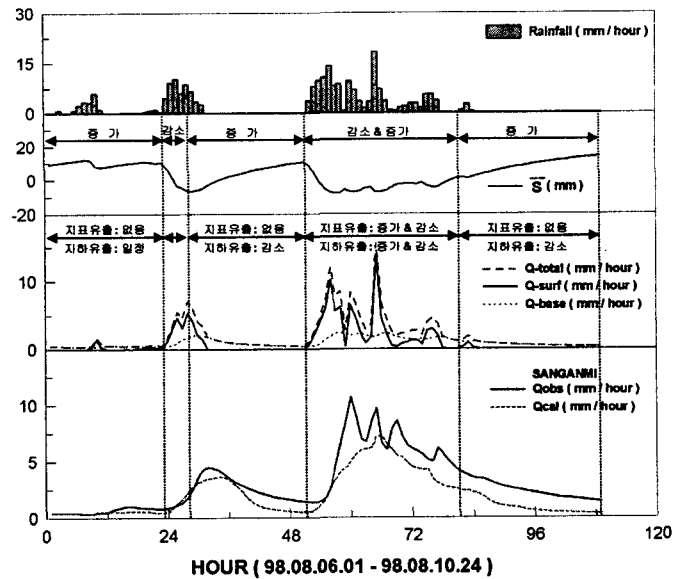


그림 3. 모형의  $\bar{S}$ 에 따른 토양수분 변동성

그림 4~7은 상안미 상류유역의 94~97년 여름철 호우사상에 대한 토양수분의 지하유출량과 지하수위 관측치를 비교한 것이다. 그림의  $S\_flow(mm/hour)$  및  $B\_flow(mm/hour)$ 는 각각 시간당 지표 및 지하유출을 의미하고  $B\_level(m/day)$ 은 상안미 지점의 일단위 지하수위 관측치를 의미하며, 그 값을 우측 축에 나타내었다. 또한 그림에 표현된 나머지 값들은 그림 3과 동일한 의미를 지닌다. 그림 3 및 표 1에 대한 검증사례를 분석한 결과 선택된 4개 호우사상들의 지표 및 지하유출의 변동성은 지표유출이 보다 민감하게 변동하며, 최종출구점의 계산유량과 관측유량 사이의 통계적 분석결과 각 사상에 대한 상관계수가 0.99, 0.95, 0.95, 0.93으로 계산되어 모형의 검증결과는 합당한 것으로 판단된다.

한편, TOPMODEL의 토양수분 모의능력을 평가하기 위해서는 모형에 의해 산출된 토양수분의 변화와 토양수분 실측치를 비교하는 것이 최적이지만, 통상 토양수분의 시간적 변동성에 따른 실측치가 존재하지 않으므로 상안미 지점의 일단위 지하수위 실측치와 상대적으로 비교하여 평가하였다. 그림 4~7에서  $B\_flow$  및  $B\_level$ 은 비록 시간 차원의 단위가 일치하지 않지만 동일 시간대에 표현한 결과 어느 정도 일치성이 있는 것을 알 수 있다. 그림 4~7에 표현된 4개의 호우사상에서 모형의 지하유출과 지하수위 관측값을 비교하면 강우에 따른 모형의 지하유출에 대비하여 지하수위 관측치는 수량적 비교는 불가능하지만 지하유출의 증감에 대한 상대적 비교는 잘 일치하는 것으로 나타났고, 첨두량의 비교에서 지하수위 관측치가 동일 시간대가 아닌 다음날의 관측치에서 지연되어 나타나며 첨두량 이후의 지하수위 관측치가 모형의 지하유출에 비해 다소 높은 값으로 서서히 감소하는 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 계산된 지표유출( $S\_flow$ )의 첨두량에 비해 유역 출구점에서 유량관측치( $Q_{obs}$ )의 첨두유량이 2~4시간 정도 지체되어 나타나는 경향과 함께 일관성을 가지는 것으로 판단된다. 또한, 강우가 끝난 후의 수문곡선 하강부는 대부분이 지하유출에 기인하고 있음을 잘 나타내고 있다. 이상과 같이 지하수위 관측치를 이용한 모형의 분석에서는 비록 직접적인 수량적 비교는 불가능하였지만 모형에서 계산된 토양수분 변동성을 이용하여 간접적으로 비교한 결과 TOPMODEL은 유역출구에서의 유출량 산정뿐 아니라 실제 유역에서 발생하는 토양수분의 변화모의에 적합한 모형으로 판단된다.

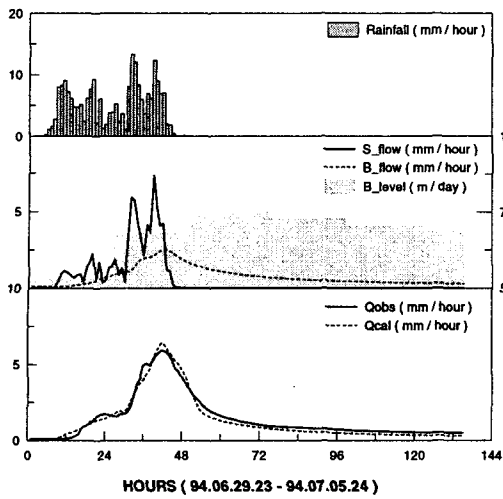


그림 4. 94년 6월 호우사상 모의

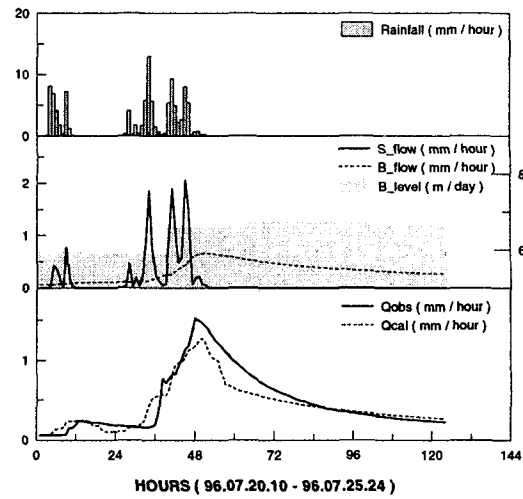


그림 5. 96년 7월 호우사상 모의

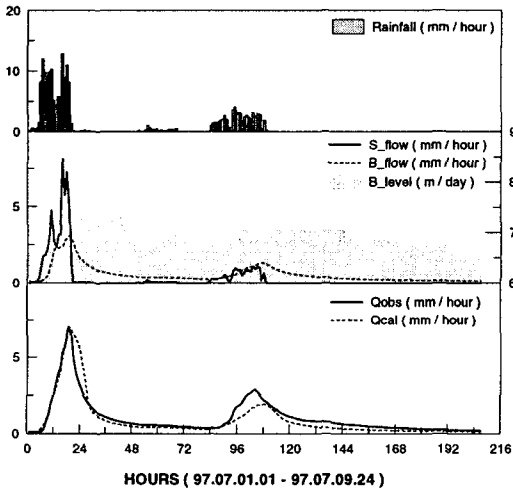


그림 6. 97년 7월 호우사상 모의

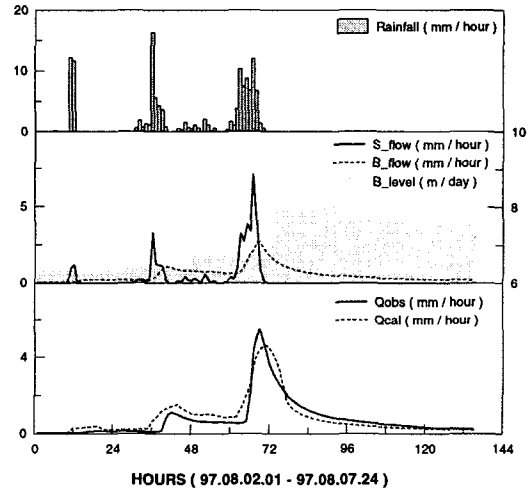


그림 7. 97년 8월 호우사상 모의

#### 4. 결 론

본 논문에서는 TOPMODEL의 토양수분 변동성 모의능력을 고찰하고자 평창강 유역의 상안미 상류유역을 대상으로 토양내 평균 토양수분 저류부족량에 따른 지표 및 지하유출의 변동성을 분석하였고, 상안미 지점의 일단위 지하수위 관측자료를 이용하여 모형의 토양수분 모의에 대한 간접적 평가를 수행하였다. 그 결과 지하유출의 증감에 대한 상대적 비교는 잘 일치하는 것으로 나타났고, 첨두량의 비교에서 지하수위 관측치가 동일 시간대가 아닌 다음날의 관측치에서 지연되는 현상은 지표유출(S\_flow)의 첨두량에 비해 유역 출구점에서 유량관측치(Qobs)의 첨두유량이 2~4시간 정도 지체되어 나타나는 경향과 함께 일관성을 가지는 것으로 검토되었다. 따라서 본 연구의 모형은 유역내 평균개념의 토양수분 모의에 적합한 것으로 판단되며 수자원평가, 기상 및 기후연구, 농업 및 임업연구에 활용도가 높으리라 판단된다.

향후 토양수분 변동성에 대한 보다 정확한 분석을 위해서는 모형 계산결과와 동일 시간단위의 지

하수위 자료를 구축함으로써 보다 구체적인 정성적 평가가 필요하며, TDR과 같은 계기의 관측실험과 원격탐사를 병행하여 정량적 평가도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 약기상 감시, 예측 및 재해대응 기술개발로 수행된 것입니다.

#### 참고문헌

- 배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). "TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구.", 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- Avissar, R. (1990). "The impact of soil moisture and vegetation on evapotranspiration and regional atmospheric processes." Preprints of 8th Conference on Hydroclimatology, 22-26 October 1990, Kananaskis Park, Alta., Canada, *American Meteorological Society*, Boston, MA, pp. 7-11.
- Bae, D.H. and Georgakakos, K.P. (1994). "Climatic variability of soil water in the American Midwest: 1, Hydrologic modeling." *J. of Hydrology*, Vol. 162, pp. 355-377.
- Beven, K., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Fisher, J. and Lamb, R. (1994). *TOPMODEL and GRIDATB, A Users Guide to the Distribution Versions(94.03)*, CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, UK.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C., Todini, E. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *J. of Hydrology*, Vol. 175, pp. 293-338.
- Georgakakos, K.P. and Bae, D.H. (1994). "Climatic variability of soil water in the American Midwest: 2, Spatio-temporal Analysis." *J. of Hydrology*, Vol. 162, pp. 379-390.
- Georgakakos, K.P. and Smith, G.F. (1990). "On improved operational hydrologic forecasting: results from a WMO real-time forecasting experiment." *J. of Hydrology*, Vol. 114, pp. 17-45.
- Georgakakos, K.P., Bae, D.-H., Cayan, D.R. (1995). "Hydroclimatology of continental watersheds, temporal analyses." *Water Res. Res.*, Vol. 31(3), pp. 655-675.
- Kitanidis, S.E. and Bras, R.L. (1980). "Real time forecasting with a conceptual hydrologic model, 2. Application and results." *Water Res. Res.*, Vol. 16(6), pp. 1034-1044.
- Kunkel, K.E. (1990). "Operational soil moisture estimation for the Midwestern United States." *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 29, pp. 1158-1166.