

# TOPMODEL 매개변수의 물리적 특성분석

Analysis of Physical Characteristics Simulation for TOPMODEL Parameters

김 진 훈\* · 장 기 호\*\* · 배 덕 효\*\*\*

## 1. 서 론

강우에 의한 유출현상을 규명하기 위해 과거에는 집중형 모형에 대한 연구가 많이 수행되었지만 최근에는 지형특성을 표현하는 많은 기법들의 개발로 분배형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그들 가운데 유출에 영향을 미치는 지형특성을 지형지수(topographic index)의 분포로 표현하는 TOPMODEL(Beven과 Kirkby, 1979)은 국외뿐 아니라 국내(조홍제 등, 1997; 김상현, 1997; 배덕효 등, 2000)에서도 적용되어 모형의 우수성이 검토된 바 있다. 한편, 최근에 외국의 연구사례에 따르면 DEM의 해상도에 따른 지형지수의 산정결과가 TOPMODEL의 유량계산에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다(Wolock과 Price, 1994; Zhang과 Montgomery, 1994). 또한 이러한 연구결과들 이후 DEM 해상도가 모형에 미치는 영향을 매개변수의 조정에 대해서 보정할 수 있다는 연구결과가 Franchini(1996)와 Saulnier(1997)에서 연구에서 밝혀졌다. 이와 같은 연구배경을 바탕으로 본 논문에서는 DEM 자료의 격자간격에 따른 TOPMODEL 매개변수의 변동성을 살펴보고, 이를 매개변수의 물리적 특성을 토양수분의 모의 양상을 통해서 고찰하고자 한다.

## 2. TOPMODEL

TOPMODEL은 전세계적으로 매우 다양한 형태의 모형이 존재하지만, 그 기본 요소는 지형지수(topographic index)의 산정, 토양수분의 변화 및 지표유출 등으로 구성되어 있다. 이 모형은 소유역내 강우 유입에 따라 지표유출이 형성되는 포화면적률 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 유역 전체에 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.

\* 기상연구소 예보연구실 연구원

\*\* 기상연구소 예보연구실 선임연구원

\*\*\* 창원대학교 토목공학과 부교수

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

식 (1)에서  $T_0 (m^2/h)$ 는 토양이 포화되었을 때 축면 전도계수,  $\tan \beta$ 는 지표면 경사,  $t (m/h)$ 는 특정 시간 동안 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. 만약 지표로부터 지하수면까지의 깊이를 나타내는  $z_i$ 가 0이 되는 지역은 토양이 완전히 포화되어 유입되는 강수는 전부 지표유출을 하게 되는데(이를 기여면적 contributing area라 함) 기저유출량을 합하여 전체 유출량을 산정하게 된다.

한편 식 (2)에서 알 수 있는 것처럼 유역의 토양 수리특성을 나타내는 전도계수가 같을 때 지형지수가 같은 임의의 점들의 흐름 특성은 같으므로 TOPMODEL이 분배형 모형이면서도 개념적 모형으로 계산할 수 있는 이점을 가지고 있다. 즉 유역내 각 지점에서 지형지수를 산정하고 이에 대한 분포곡선을 산정하여 그림 1과 같이 각 지형지수의 증분(discrete increment of topographic index)에 대해서 토양수분의 변화 및 지표 유출량을 산정할 수 있다.

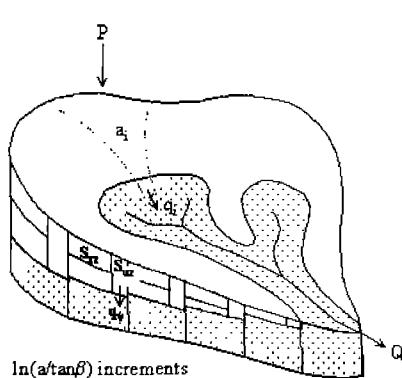


그림 1. 토양수분 산출 개념도

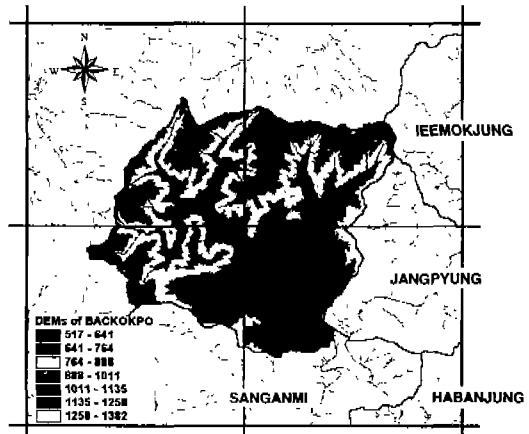


그림 2. 백옥포 적용대상유역

### 3. 사례연구

TOPMODEL 매개변수의 물리적 특성을 검토하기 위해  $528 \text{ km}^2$ 의 국제수문개발계획(IHP) 시험지역인 평창강 상류유역 중의 백옥포 유역을 선정하였다. 백옥포 유역은 그림 2에서와 같이 유역면적이  $143.93 \text{ km}^2$ , 본류연장이  $22.95 \text{ km}$ , 총유로연장이  $140.03 \text{ km}$ , 유역평균경사가  $0.37 \text{ radian}$ 으로서 평창강 유역의 대표적 상류유역에 해당한다. 한편, 본 연구대상 유역에는 우량관측소인 홍정과 유역 출구지점인 백옥포에 수위관측소가 존재한다.

본 연구에서는 우선 DEM 자료의 격자간격이 지형지수와 유량산정에 미치는 영향을 검토하기 위해 백옥

포 유역에 대하여 NGIS 수치지형자료로부터 20, 40, 60, 80 m의 정방형격자의 DEM 자료를 생성하였다. 그림 3은 DEM 격자간격에 따른 지형지수 빈도해석 결과를 나타내며, 그림 4는 92년 5월 홍수사상에 대하여 TOPMODEL의 유량 산정 결과를 나타낸 것이다. 지형지수 계산은 유역의 흐름특성을 효과적으로 고려할 수 있는 MFD(Multiple Flow Direction) 방법을 사용하였으며, 모형에 사용된 매개변수는 격자간격 20 m에 대하여 수동보정법으로 추정하였으며 추정된 매개변수는 표 1과 같다.

표 1. TOPMODEL의 추정된 매개변수

기 호	설 명	단위	추 정 치
m	지수형 전도계수 감소상수	m	0.02
T <sub>0</sub>	포화상태의 측면 전도계수	ln(m <sup>2</sup> /h)	1.22
SRmax	식생영역 최대 저류고	m	0.05
SR <sub>0</sub>	식생영역 초기 저류고	m	0.002
t <sub>d</sub>	불포화영역 시간지체 상수	hour	50.
Chv, R <sub>v</sub>	주하천 및 유역 하도내 유속	m/hour	1800

그림 3의 y축은 지형지수의 누가빈도분포를 의미하는 것으로서 격자간격에 따른 분포곡선에 따르면 격자간격이 증가할수록 분포곡선이 오른쪽으로 이동하면서 큰 값의 지형지수들을 더욱 많이 표현하고, 이와 상대적으로 지형지수가 작은 값들은 비교적 소멸되는 경향을 살펴볼 수 있다. 이것은 격자간격이 감소할수록 지형지수가 낮은 값에서 다소 높은 빈도가 나타나는 것과 같은 의미로서, 지형지수가 낮다는 것은 유역의 높은 고도의 지형을 의미하므로 격자간격이 감소할수록 고지대의 표현이 상대적으로 명확해진다고 해석할 수 있다. 이러한 성향은 강우의 시간적 변동성에 따라 지하수면의 변화를 더욱 정밀하게 표현할 수 있음을 의미하므로 그림 4에서와 같이 토양수분이 불포화상태에서 포화상태로 변하는 유출곡선의 상승부에서는 격자간격이 증가할수록 유출에 빠르게 기여하지만 지하수량을 대표하는 수문곡선의 종점 부분에서는 유출의 기여가 미흡한 것으로 나타났다.

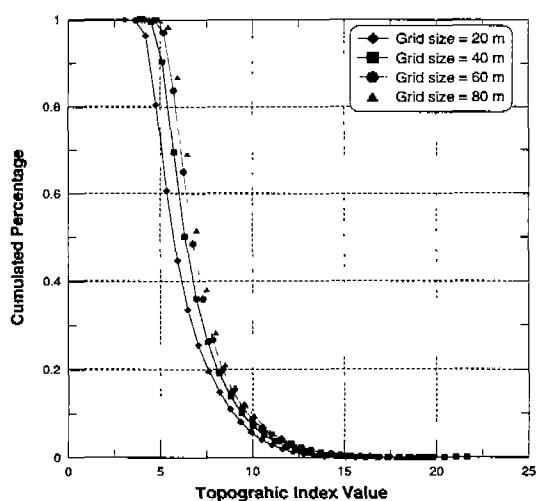


그림 3. DEM 격자간격에 따른 지형지수  
빈도분포곡선

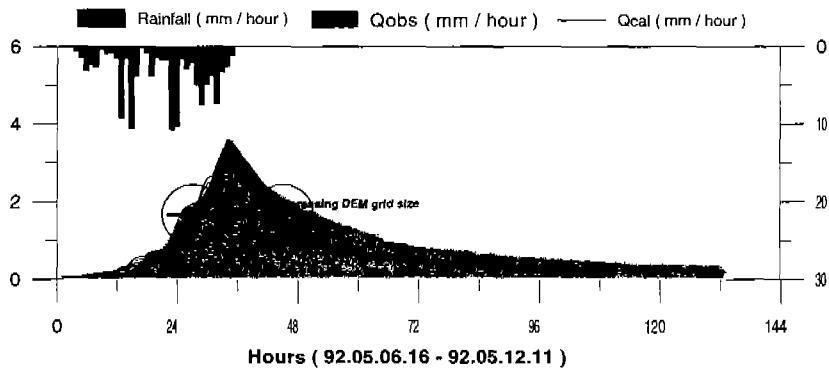


그림 4. 격자간격에 따른 유량산정 결과

한편, 격자간격의 변화에 대한 모형의 매개변수의 영향을 검토하기 위해 TOPMODEL의 주요매개변수 중 가장 민감하게 반응한다고 판단되는 지수형 감소상수( $m$ )와 포화상태의 측면 전도계수( $T_0$ )를 선택하여 격자간격에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 분석 방법으로는 우선 표 1에서와 같이 추정된 백옥포 유역의 매개변수들 중에서  $m$ 값을 제외한 매개변수는 고정한 상태로  $m$ 의 추정치인 0.02를 기준으로  $\pm 50\%$ 의 변동성에 따른 식 (4)에 주어진 모형의 효율( $\eta$ )를 계산하였다.

$$\eta = 1 - \frac{\sum (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2}{\sum (Q_{\text{obs}} - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

여기서  $Q_{\text{obs}}$  및  $Q_{\text{cal}}$ 은 각각 유량관측치와 계산치를 나타내고,  $\bar{Q}$ 는 관측유량의 평균을 의미한다. 그림 5는 위의 방법에 의한  $m$ 의 민감도 분석 결과를 나타낸 것으로 표 2와 같이 격자간격이 20, 40, 60, 80 m로 증가할수록 모형의 최고효율에 대응하는  $m$ 의 값들은 0.0200, 0.0206, 0.0202, 0.0222로 나타났다. 이렇게 추정된 격자간격별  $m$ 값들을 이용하여 그림 6과 같이  $T_0$ 에 대한 모형효율의 민감도 분석을 수행하였다.

표 2. 격자간격에 따른 최고효율( $E$ ) 및  $m$ ,  $T_0$  추정치

매개변수	격자간격	20 m	40 m	60 m	80 m
	최고효율( $E$ )	0.7826	0.7370	0.7799	0.6453
$m$	추정치	0.0200	0.0206	0.0202	0.0222
	최고효율( $E$ )	0.8025	0.7944	0.7977	0.7691
$T_0$	추정치	1.2200	1.7080	2.1960	1.7080

앞선 방법과 동일하게  $T_0$ 를 제외한 나머지 매개변수를 고정한 상태에서  $T_0$ 의 추정치인 1.22를 기준으로  $\pm 2000\%$  변동성에 대한 효율을 계산하였다.  $\pm 2000\%$ 의 변동성은 모형의 민감도를 효과적으로 관찰하기 위해 다소 큰 변동성이지만  $T_0$ 의 물리적 의미를 벗어나지 않는 범위 내에서 결정하였다. 민감도 분석결과 표 2와 같이 격자간격이 증가할수록  $T_0$  값은 1.22, 1.7080, 2.1960, 1.7080에 대하여 각각 0.8025, 0.7944, 0.7977, 0.7691의 최고효율로 계산되었다. 이상의 계산결과들을 종합하면 격자간격별  $m$ 과  $T_0$ 의 최적추정치를 이용한

모형의 효율은 매우 유사한 경향을 나타내었고, 이러한 결과는 DEM 해상도가 모형에 미치는 영향은 매개변수의 조정에 의해서 보정할 수 있다는 연구결과와 유사하게 검토되었다.

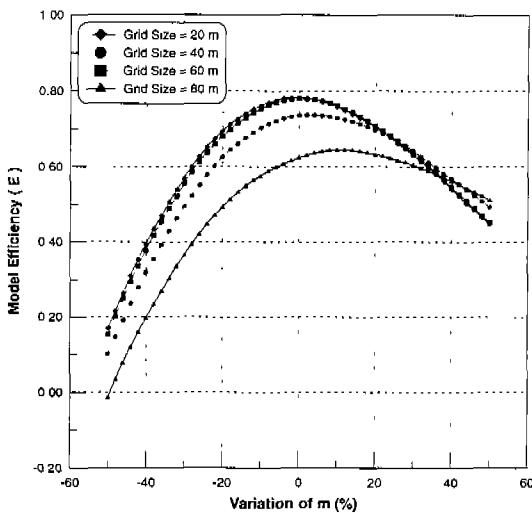


그림 5. 격자간격에 따른  $m$ -효율 민감도

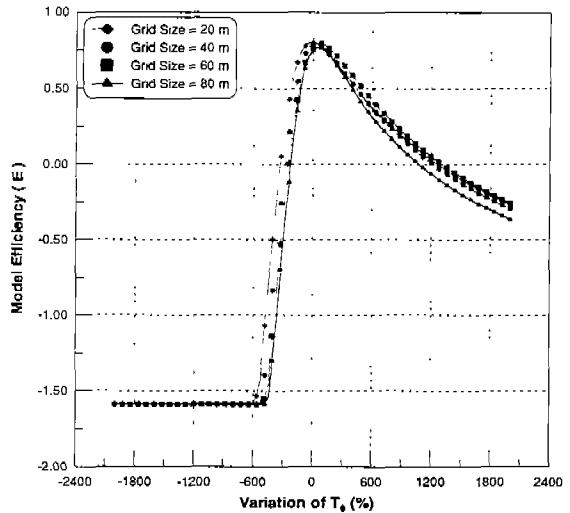


그림 6. 격자간격에 따른  $T_0$ -효율 민감도

본 연구의 또 다른 사례연구로 모형에서 민감하게 반응하는 매개변수  $m$ 과  $T_0$ 의 물리적 특성을 토양수분의 모의 양상을 통해서 살펴보았다. 이것은 연속된 강우사상에 대하여 토양내 평균 지하수위 저류 부족량 형식인  $\bar{S}$ 가 증가하면 토양수분이 그 만큼 부족하다는 의미이고 강우에 의해서 토양수분이 증가하면  $\bar{S}$ 는 감소하면서 지하유출을 증가시키며 임의의 저류부족고를 단축시키면서 발생하는 과정 토양수분은 지표유출에 기인하게 되는 모형개념을 바탕으로 지표 및 지하유출에 기여되는 각각의 토양수분량을 추출하여 비교함으로써 매개변수  $m$ 과  $T_0$ 의 물리적 거동을 검토하였다. 이러한 검토결과 매개변수  $m$ 이 비교적 크고  $T_0$ 가 작은 값일 경우 지표유출이 비교적 증가하는 결과로 나타났고,  $m$ 이 작고  $T_0$ 가 큰 값을 가지면 비교적 높은 지하수면과 함께 지하유출이 증가하는 결과로 나타났다. 이상의 결과를 분석하면 매개변수  $m$ 의 물리적 의미가 토양내 지하수면의 유효깊이를 나타내는 것으로 유효깊이가 증가하면 지하수량이 지표유출보다 상대적으로 크게 나타나며, 특히 큰 값의  $T_0$ 와 결합되면 이러한 현상이 보다 뚜렷하게 나타나는 것으로 해석된다. 이상에 대한 보다 상세한 분석들은 지면관계상 발표회 때 제시하고자 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 TOPMODEL 매개변수의 물리적 특성을 검토하였다. 이를 위해서 IHP 대표유역 중 평창강 상류의 백옥포 유역을 대상으로 NGIS 수치지형자료로부터 20, 40, 60, 80 m의 DEM 자료를 구축하여 모형의 대표인자인 지형지수를 산정하였다. 격자간격에 따른 지형지수가 모형에 미치는 영향을 검토한 결과 격자간격별  $m$ 과  $T_0$ 의 최적추정치를 이용한 모형의 효율은 매우 유사한 경향을 나타내었고, 이러한 결과는 DEM 해상도가 모형에 미치는 영향은 매개변수의 조정에 의해서 보정될 수 있다는 연구결과와 유사하게 검토되었다. 한편, 지표 및 지하유출의 모의 특성은 매개변수  $m$ 의 물리적 의미가 토양내 지하수면의 유효깊이를 나타내는 것으로 유효깊이가 증가하면 지하수량이 지표유출보다 상대적으로 크게 나타나며, 특히 큰 값의  $T_0$ 와 결합되면 이러한 현상이 보다 뚜렷하게 나타나는 것으로 해석되었다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다(2000-J-ND-01-B-11).

## 참고문헌

- 김상현 (1997) “인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용”, 한국수자원학회지, 제30권 제5호, pp. 539~548
- 배덕호, 김진훈, 권원태 (2000). “TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구.”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- 조홍제, 조인률, 김정식 (1997) “TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구”, 한국수자원학회지, 제30권 제5호, pp. 515~526
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) "A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology", *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, No. 1, pp. 43~69.
- 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.
- Saulnier, G. M., C. Obled, and K. J. Beven (1997). "Analytical Compensation Between DTM Grid Resolution and Effective Values of Saturated Hydraulic Conductivity within the TOPMODEL Framework", *Hydrol. Processes*, in press.
- Wolock, D. M., and C. V. Price (1994). "Effects of Digital Elevation Model Map Scale and Data Resolution on a Topography-based Watershed Model", *Water Resour. Res.*, 30(11), pp.3041-3052.
- Zhang, W. and Montgomery, D.R. (1994). "Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation and Hydrologic Simulations", *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 1019~1028