

## TOPMODEL 매개변수 최적화와 수치고도모형의 적정 격자크기 결정

○박대룡\*, 조원철\*\*, 허준행\*\*\*, 배덕효\*\*\*\*

### 1. 서 론

강우-유출 관계는 일반적으로 물리적 과정에 근거를 둔 단순화한 개념적 모형에 의하여 모의되며, 이에 관한 종래의 접근방법은 유역을 동질성의 요소로 간주한 집중형 매개변수모형 (lumped parameter model)에 관한 것이 대부분이었다. 집중형 매개변수모형은 강우·유출자료의 신뢰성에 크게 의존하며, 강우로부터 유출로의 시간적, 공간적 변환이 명확히 고려되지 않는 결점을 지니고 있다. 그러나 근래에는 지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS)의 발전과 더불어 유출현상을 역학적으로 해석하는 모형으로서 유출과정 및 이에 관한 매개변수의 공간적 변화성을 고려한 분포형 매개변수모형 (distributed parameter model)의 개발이 강조되고 있으며, 지형학적 매개변수와 유출과정의 공간적 변화성에 중점을 두어 유출해석을 함으로써 지형학적 인자와 유출모형 매개변수 사이의 물리적 특성을 설명해주고 있다.

유출모형을 이용하여 유출사상을 분석하기 위해서는 대상유역의 지형학적 특성, 강우 및 침투 등의 수문·수리학적 조건들을 반영하여 매개변수를 정확히 산정하여야 한다. 그러나 자연현상의 비선형적인 특성으로 인해 실제 사상을 정확히 모의하기에는 많은 어려움이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 분포형 매개변수모형 중 하나가 수치고도모형 (Digital Elevation Model, DEM)을 이용하는 TOPMODEL (TOPOgraphy based hydrological MODEL)이다. TOPMODEL은 지표유출과 기저유출의 분리가 용이하고 장기간의 유출모의도 가능하여 대상유역의 기저유출량 산정과 유량해석에 효율적인 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 유역의 지형학적 인자를 고려하기 위하여 개념적 분포형 매개변수 유출모형인 TOPMODEL을 사용하였다. 적용 대상유역은 국제수문개발계획 (IHP)의 대표시험유역인 위천의 동곡 유역과 평창강의 이목정 유역으로 산지의 소유역을 선정하였다. 두 유역을 대상으로 격자 크기의 변화에 따른 강우-유출 모의 결과를 관측값과 비교·분석하고, 각 격자 크기에 대하여 매개변수의 변화를 분석하였다. 또한, TOPMODEL에서 안정화를 꾀할 수 있고, 관측된 수문사상에 근접한 결과를 나타내는 격자크기의 범위를 제시하였다.

\* 연세대학교 토목공학과 대학원 석사졸업

\*\* 연세대학교 사회환경·건축공학부 토목전공 정교수

\*\*\* 연세대학교 사회환경·건축공학부 토목전공 부교수

\*\*\*\* 창원대학교 토목공학과 부교수

## 2. TOPMODEL 개요

TOPMODEL의 근간을 이루는 기본식은 연속방정식과 Darcy의 법칙에서 출발하여 다음과 같은 중요한 몇 가지의 가정을 통해 모델식이 전개된다. 첫째, 유역내 물의 흐름은 정상상태로 가정한다. 이 가정은 지형지수 즉,  $\ln(a/\tan\beta)$ 로 토양의 포화정도를 나타낼 수 있음을 의미한다. 둘째, 유역내 포화층의 동수경사(hydraulic gradient)는 지표면 경사인  $\tan\beta$ 로 표현할 수 있다. 셋째, 포화투수계수는 지표면으로부터 지하수면까지의 거리에 지수 함수적으로 감소한다는 가정이다.

포화층내의 동수경사는 유역의 지형경사로 표현할 수 있으며, 포화층내의 거동은 Darcy의 법칙을 따른다. 따라서  $i$ 지점에서 단위폭당 유출량  $q_i$ 는 다음과 같다.

$$q_i = a_i R = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 지하수위로 유입되는 임의 시간에서 공간적으로 일정한 충진량이고,  $a_i$ 는 지점  $i$ 를 통해 배수되는 단위등고선 길이당 경사면의 면적이며,  $\tan \beta_i$ 는 위치  $i$ 지점에서의 지표면의 경사이고  $T_0$ 는 완전포화된 흙의 투수량 계수이고,  $f$ 는 모델의 매개변수이며  $z_i$ 는 임의점에서 지하수위 깊이이다.

식 (1)을  $z_i$ 에 대해서 정리한 후, 전유역에 대한 평균치( $\bar{z}$ )를 구하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{z} = z_i - \frac{1}{f} (\lambda - \ln \frac{a_i}{T_0 \tan \beta_i}) \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 공간적으로 일정하다고 가정하였으며,  $\ln(a_i/T_0 \tan \beta_i)$ 는 Beven의 토양지형지표이고,  $\lambda$ 는 유역내 지형지수의 평균값이다. 위 식을  $z_i$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$z_i = \bar{z} - \frac{1}{f} [\ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} - (\lambda + \ln T_0)] \quad (3)$$

즉, 식 (2.9)에서 알 수 있는 바와 같이 지하수위의 깊이  $z_i$ 는 인자  $f$ 와 지형상수  $\ln(a/\tan\beta)$ 에 의해 결정할 수 있다.  $z_i$ 는 모형에서 유출을 계산하는 지표로서 유역에서  $z_i < 0$ 이면 토양수분이 포화됨을 의미한다. 유역에서  $z_i < 0$ 인 면적을 기여면적(contributing area)이라 하고 이곳에 내리는 모든 강우는 지표유출로 계산된다.  $\bar{z}$ 의 값이 주어지면, 식 (3)은 토양지형지표상수인  $\ln(a/T_0 \tan \beta)$ 의 공간적 분포를 알고 있거나 또는 지형상수인  $\ln(a/\tan \beta)$ 가 공간적으로 일정하다고 가정하여 전 유역에 대한 지표수위 및 지하수위의 거동을 예측하는데 이용할 수 있다 (Franchini 등, 1996). 한편, 토양지형인자 및 지형상수는 유역내 모든 흐름의 거동을 대표하는 인자로서, 동일한 값의 토양지형인자 및 지형상수를 갖는 모든 지점은 흐름의 거동이 같다는 것을 의미하므로 토양지형인자 및 지형상수의 값은 유역상호간의 수문학적 상사성을 판단할 수 있는 지표가 될 수 있다. 한편 불포화층에서 포화층으로의 배수는 다음 식으로 표현된다.

$$q_v = \frac{S_{us}}{S_i t_d} \quad (4)$$

여기서  $S_{us}$ 는 비포화지역의 토양수분,  $t_d$ 는 단위 포화부족량에 대한 지체시간,  $S_i$ 는 종력배수에 의한 지역

적인 포화부족량이다. 포화지역에서는 토양수분이 기저유출로서 나타나며, 기저유량  $Q_b$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_b = \sum_{i=1}^n l_i (T_0 \tan \beta) e^{-\frac{z}{L}} \quad (5)$$

여기서  $l_i$ 는  $i$ 지점의 하도 길이이다. 이상과 같이 총유출량은 지표유출과 기저유출의 합으로 산정된다.

### 3. 대상유역

본 연구의 대상 지역은 위천의 동곡 유역과 평창강의 이목정 유역으로 동곡 유역은 낙동강의 지류인 위천의 상류 소유역으로서, 경상북도 군위군에 위치하고 있다. 이 지역에는 석산 우량관측소와 동곡교 수위관측소가 각각 1개씩 있다. 그림 1은 석산 우량관측소와 동곡교 수위관측소의 위치를 나타내고 있으며, 동곡 유역의 수치고도분포를 보여주고 있다. 이목정 유역은 남한강의 지류인 평창강의 소유역으로서, 강원도 평창군 용평면의 대부분을 차지하고 있다. 그림 2는 계방 우량관측소와 이목정 수위관측소의 위치를 나타내고 있으며, 이목정 유역의 수치고도분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 이용한 동곡 유역 지도의 축척은 1/5,000이며, 이목정 유역의 축척은 1/25,000이다.

TOPMODEL의 입력자료는 크게 고도자료와 수문자료 두 가지로 나눌 수 있다. 고도자료는 격자모형의 형태로 저장된 DEM을 이용하였으며 이때 DEM의 격자크기를 각각 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m, 160 m, 200 m, 300 m, 500 m, 1000 m로 하였다. 수문 자료는 국제수문개발계획 (IHP) 연구보고서의 시단위 강우자료와 유출량 자료를 이용하였다.

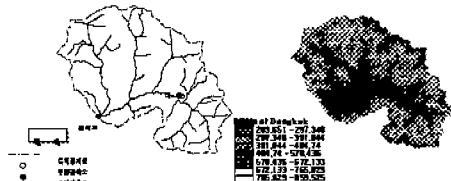


그림 1. 동곡 유역 형태와 DEM

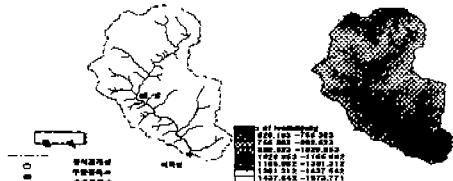


그림 2. 이목정 유역 형태와 DEM

### 4. TOPMODEL의 매개변수

표 1. TOPMODEL의 매개변수

TOPMODEL은 토양내 지하수의 거동을 유역의 토양지형 인자를 이용하여 모의함으로써 유역내 유출 특성을 해석하는 모형이다. 지형지표인자는 소유역이나 사면에서의 응답특성을 결정하는 주요변수이며, 지형지표인자를 비롯하여 본 모형을 이용한 유역내의 매개변수로 고려할 수 있다. 표 1에서 나타나 있는 보정이 가능한 매개변수들에 대해서 본 연구대상지역

매개변수	내 용	단위
$m$	지수함수형 저류매개변수	m
$\ln(T_0)$	지표면 토양의 투수량계수	$\ln(m^2/h)$
$Td$	불포화대 지체시간	h
$SR_{max}$	식생지역 최대저류량	$m/h$
$SR_0$	식생지역 부족량	m

인 동곡 유역과 이목정 유역에서의 실제 강우량과 유출량 자료를 통해서 실제 유출량 자료와 모의 유출량 자료의 오차제곱합이 가장 작게되는 매개변수를 산정한다.

## 5. 결과 및 토의

### 5.1 각 격자크기에 대한 최적 매개변수 산정

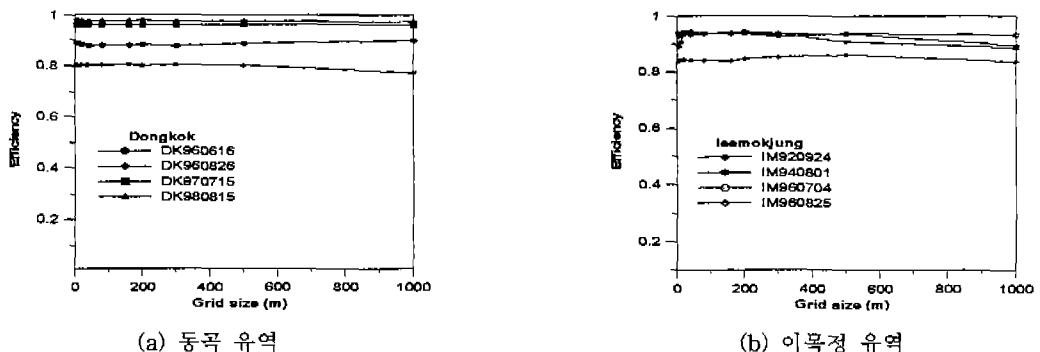


그림 3. 격자크기에 대한 매개변수 최적화 결과

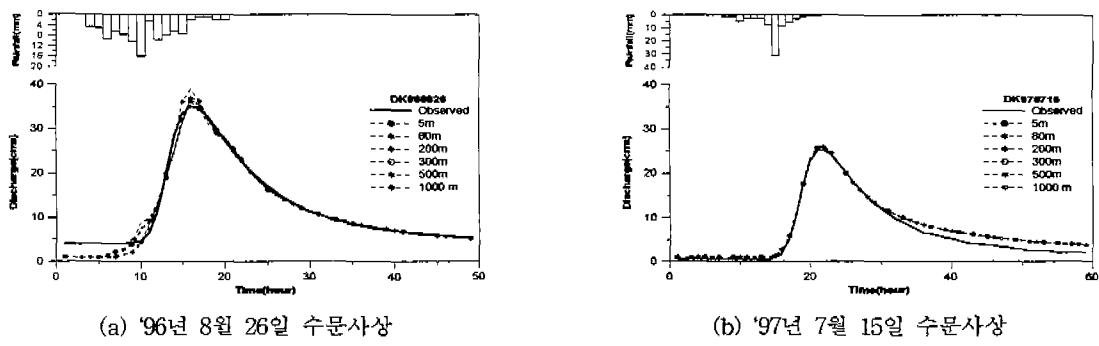


그림 4. 수문사상에 대한 격자별 매개변수 최적화 결과 (동곡 유역)

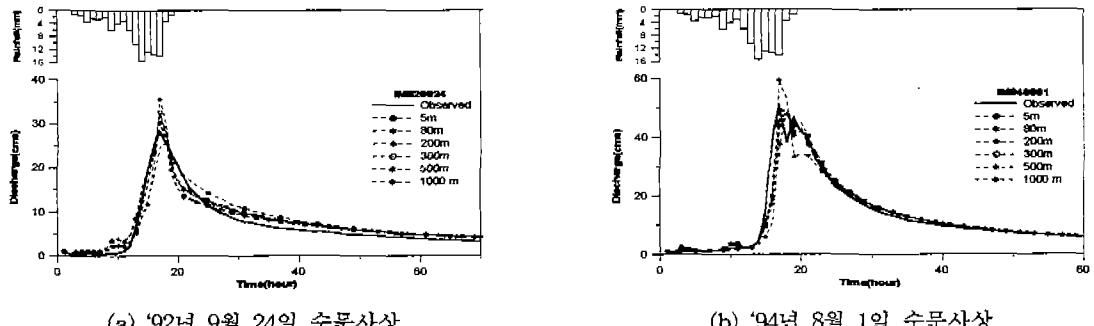


그림 5. 수문사상에 대한 격자별 매개변수 최적화 결과 (이목정 유역)

그림 3은 동곡 유역과 이목정 유역에서 각 격자별로 매개변수를 최적화했을 때의 결과를 도시한 것이다. 그림 3(a)의 동곡 유역에서 효율이 0.88~0.90, 0.97~0.98, 0.96, 0.77~0.80 사이로 나타났다. 따라서 효율이 격자크기에 따른 차이는 근소하지만 수문사상에 따라서 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3(b)에 나타난 이목정 유역은 효율이 0.89~0.94, 0.88~0.94, 0.93, 0.83~0.86 사이로 나타났다. 또한 동곡 유역과 마찬가지로 효율이 수문사상에 따라서 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 따라서 TOPMODEL에서 매개변수를 격자별로 최적화시켰을 때에는 격자크기가 모형에 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 그림 4와 5는 각 유역의 수문사상에 대해서 격자별로 매개변수를 최적화했을 때의 수문곡선을 도시한 것이다. 매개변수를 최적화했을 때 각 격자간의 차이가 별로 없이 나타나는 것을 알 수 있다.

## 5.2 적정 격자크기 결정

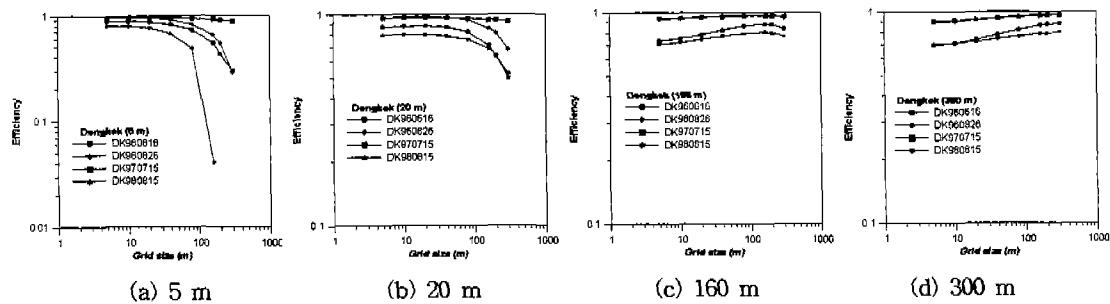


그림 6. 5 m, 20 m, 160 m, 300 m 배개변수일 때 격자 크기에 대한 효율의 변화 (동곡 유역)

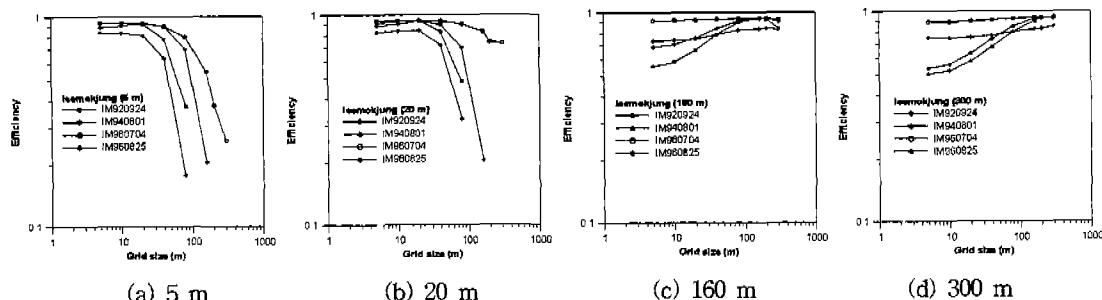


그림 7 5 m, 20 m, 160 m, 300m 배개변수일 때 격자 크기에 대한 효율의 변화 (이목정 유역)

그림 6은 동곡 유역에서 각 격자별 매개변수에 대해 격자크기의 효율을 전대수지에 도시한 것이다. 각 수문사상별로 변화율의 경도가 다르게 나타난다. DK980815의 경우는 효율의 변화가 크지만 DK970715의 경우는 효율의 변화가 상대적으로 크지 않다. 각 매개변수마다 그에 해당하는 격자크기가 가장 잘 맞는 것을 알 수 있다. 각 매개변수에 대해서 동곡 유역의 효율의 변화 폭이 격자크기가 커질수록 더 커지는 것을 알 수 있었다. 특히 격자크기가 20 m 까지는 효율의 변화 폭이 적은 것을 알 수 있다. 따라서 동곡 유역은 격자크

기가 20 m 까지는 모형이 안정적이라고 판단된다. 그럼 7은 이목정 유역에서 각 격자별 매개변수에 대해 격자크기의 효율을 전대수지에 도시한 것이다. 동곡 유역과 마찬가지로 이목정 유역도 각 수문사상별로 변화율의 정도가 다르게 나타났으며 각 매개변수마다 그에 해당하는 격자크기가 가장 잘 맞는 것을 알 수 있다. 각 매개변수에 대해서 이목정 유역의 효율의 변화 폭이 격자크기가 커질수록 더 커지는 것을 알 수 있었다. 동곡 유역처럼 격자크기가 20 m 까지는 효율의 변화 폭이 적은 것을 알 수 있다. 따라서 이목정 유역도 격자크기가 20 m 까지는 모형이 안정적이라고 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 분포형 모형인 TOPMODEL에서 수치고도모형의 격자크기에 대한 매개변수를 최적화하여 그 결과를 분석하였다. 또한 각 매개변수에 대하여 격자크기가 변할 때의 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 격자별 매개변수를 최적화하여 효율을 산정한 결과 격자크기에 관계없이 거의 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 격자 크기에 따라 매개변수를 최적화하면 격자크기는 유출량 산정에 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다. 격자별 최적 매개변수들에 대하여 격자크기의 영향을 분석한 결과 격자크기가 커질수록 효율의 변화량이 크게 나타났다. 그러나 격자크기가 20 m까지는 매개변수가 변하여도 효율의 변화량이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 따라서 두 유역 모두 TOPMODEL에 안정적인 격자크기는 20 m인 것으로 판단된다.

## 7. 참고문헌

- 건설교통부 (1990-1999). 국제수문개발계획(IHP) 대표시협유역 연구조사 보고서
- 박대룡 (2001). “TOPMODEL 매개변수 최적화와 수치고도모형의 적정 격자크기 결정.” 석사학위논문, 연세대학교.
- 조홍제, 조인률, 김정식 (1997). “TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구.” 한국수자원학회논문집, 제30권, 제5호, pp. 515-526.
- Beven, K. J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J. (1995). "Computer models of watershed hydrology II.", *Water Resources Publications*, edited by Vijay P. Singh, pp. 627-668.
- Franchini, M., Wending, J., Obled, C., and Todini, E. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 293-338.
- Wolock, D. M. and Price, C. V. (1994). "Effects of digital elevation map scale and data resolution on a topography-based watershed model." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3041-3052.
- Zhang, W. and Montgommery, D. R. (1994). "Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 1019-1028.