

시간 스케일 변화의 TOPMODEL 유출계산에 대한 영향

The effects of Time Scale Variation on the Runoff Calculation of TOPMODEL

○김 경 현, 이 학 수*, 김 봉 기**, 김 상 현***

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 수학적식으로 개별 격자에서 구현되고 있다는 점이다. 이러한 특성을 가진 모형은 유출을 하나 혹은 그 이상의 합수로 표현하는데, 일반적으로 경사도에 대한 비례함수이거나 토양수분함량에 대한 함수 등이 대표적이다. 유역의 공간적 특성 혹은 격자크기와 같은 공간 스케일은 이 합수들의 상수를 결정함으로써 모형에 영향을 주게된다. 또한 계산시간 간격과 같은 시간 스케일의 문제는 합수의 변수와 관련되어 모형의 계산결과에 영향을 준다. 반대로 합수의 간략화된 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 아래로 많은 유역에서 적용성을 검토 받았으며(Beven 등, 1979; Iorgulescu 등, 1994; Holko 등, 1997) 지형, 토양 수분, 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 계산결과에 부정확성을 가져올 수 있었다. 이와 같은 배경에서 본 연구는 대상유역의 고정된 공간 스케일에 대해 다양한 시간 스케일에 걸쳐 TOPMODEL을 적용하여 시간 스케일의 변화가 개념적 수문모형의 하나인 TOPMODEL의 유출계산에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 모형의 구조 내에서 이해하기 위해 수행되었다.

2. TOPMODEL 개요

본 연구에 적용된 TOPMODEL은 다음과 같은 세가지 기본 가정에 근거하여 복잡한 수문과정을 간단하게 개념화한 합수에 기반하고 있다. 첫째 유역 내에서 물의 움직임은 정상상태로 가정된다. 이 가정은 지형지수 즉, $\ln(a/\tan \beta)$ 로 토양의 포화정도를 나타낼 수 있음을 의미한다. 둘째, 유역 내 지하수면의 동수경사가 지표면 경사와 같다는 가정이다. 즉, 지표표고 경사 $\tan \beta$ 로 표현가능하다. 세 번째 가정은 수리학적 전도도가 지표면으로부터 지수함수적으로 감소한다는 가정이다. TOPMODEL의 구조에 관해서는 이미 여러 문헌에 소개 된 바 있어(Franchini 외, 1996; Kirkby 1997) 본 연구에서는 매개변수가 기능하는 부분을 중심으로 기술한다.

$$q_x = \frac{K_0}{f} \tan B_x \exp(-fz_x) = T_0 \tan B_x \exp(-fz_x) \quad (1)$$

z_x 는 지표에서 지하수위까지의 깊이이며 K_0 는 수리학적 전도도이다.

부산대학교 환경기술·산업개발연구센터 연구원

* 부산대학교 청정공학 협동과정 석사과정

** 부산대학교 환경공학과 석사과정

*** 부산대학교 환경공학과 조교수

$$S_x = \bar{S} + m[\Lambda - \ln(\frac{a}{T_0 \tan B})_x] \quad (2)$$

여기서 S_x 는 $z_x n_{drain}$ 로 x 지점에서의 포화부족량이며 \bar{S} 는 유역전체의 평균 포화부족량이다. a 는 x 지점의 상류면적이며 T_0 는 x 지점의 투수량계수, $\tan B$ 는 x 지점의 경사이다. Λ 는 토양-지형지수의 유역 평균값이다. m 은 scaling 매개변수로

$$m = n_{drain}/f \quad (3)$$

로 정의된다. n_{drain} 은 토양공극률이며 f 는 감소상수로 수문감소곡선의 형태를 결정한다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역

대상유역으로 경기도 파주시 적성면 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. 이 중에서 설마천 유역의 종류부에 위치한 영국군 전격비를 출구점으로 하는 지역을 대상유역으로 한다. 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 염리의 발달로 소량의 지하수를 함유할 수 있을 것으로 판단된다(한국건설기술연구원, 1997).

3.2 수치고도모형

설마천 시험유역이 위치한 곳은 군사시설이 위치한 이유 등으로 1/50000 보다 자세한 지형도를 얻기 힘들다. 본 연구에서는 보다 정밀한 수치고도모형(Digital Elevation Model; DEM)을 얻기 위해 GRASS의 등고선 내삽 기능을 이용, 내삽된 등고선으로부터 DEM을 구축했다(USCERL, 1991). 먼저 GRASS의 r.contour 명령을 이용해서 10m 간격의 등고선을 추출하고 이를 지형도에서 얻은 20m 등고선과 교체, 결합시켜 내삽된 10m 간격의 등고선을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 DEM은 20m 간격의 DEM보다 평지지역이 적어 수문모형에의 적용에 보다 용이했다.

이 수치고도지도로부터 지형지수계산은 다방향 흐름(Multiple Flow Direction) 알고리즘을 적용해 계산하였다(Quinn, 1991). 그림 1은 설마천 대상유역의 수치고도지도이며 그림 2는 이를 이용해 계산한 지형지수지도이다.

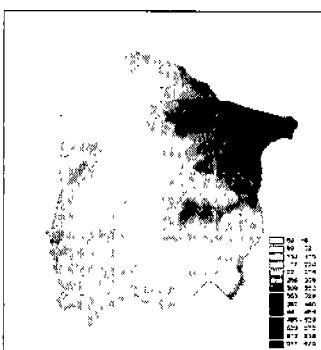


그림 1. 수치고도지도

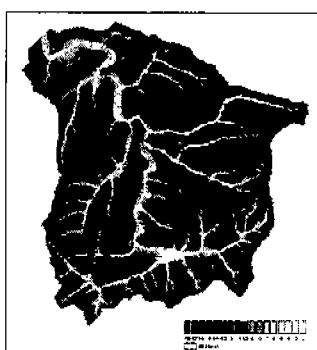


그림 2. 지형지수지도

3.3 입력수문자료

한국 건설 기술 연구원에서 제공하는 1998년 자료 중 6월 28일부터 8월 30일 까지의 10분 간격의 강우자료와 유출 자료를 이용해 시간간격 30분, 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간의 입력자료를 마련했다. 이때 강우자료는 누가값으로 계산하고 유출자료는 평균값으로 계산했다. 준비된 7개의 입력자료는 전체 강우량의 합은 동일하며 유출량은 평균에 의해 소실된 차가 존재한다. 강우자료의 시작부분은 선행강우조건의 고려를 위해 강우가 오지 않은 시간으로 설정했다.

4. 결과 및 토의

유전자 알고리즘을 이용한 매개변수의 보정 결과 중 최대모의 효율(Nash와 Sutcliffe, 1970)을 표 1에 나타

입력자료	효율	입력자료	지표유출(m)	지표하유출(m)	총유출(m)	지표유출/총유출
30분	88.989	30분	0.10	1.00	1.10	0.0939
1시간	89.117	1시간	0.10	1.04	1.14	0.0913
3시간	87.609	3시간	0.17	0.95	1.12	0.1502
6시간	88.115	6시간	0.24	0.88	1.12	0.2164
12시간	86.515	12시간	0.32	0.81	1.13	0.2821
24시간	82.468	24시간	0.39	0.72	1.11	0.3543

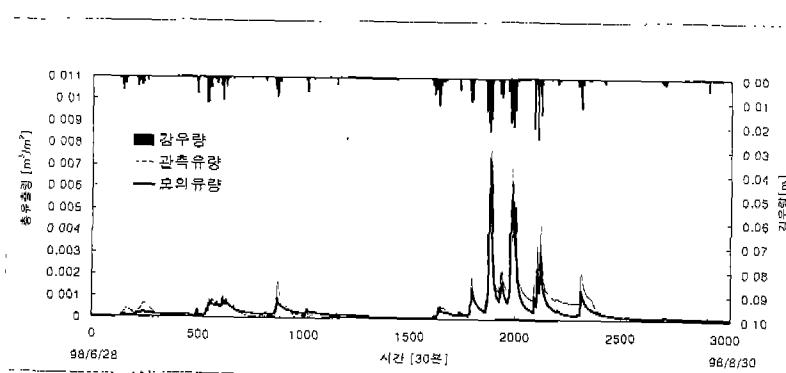
표 1. 최대 모의 효율

표 2. 유출요소의 양과 비율

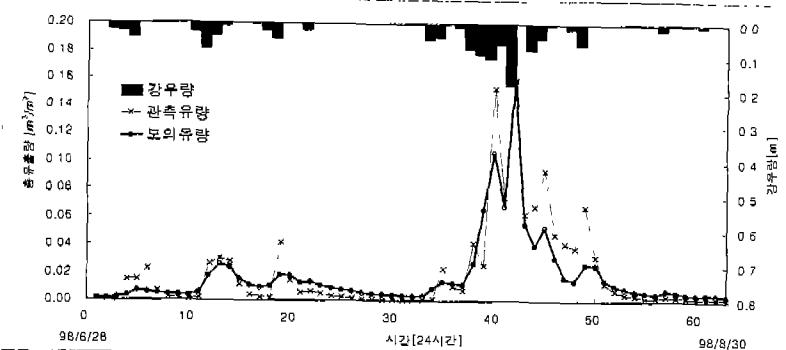
내었다. 식(8)에 의해 계산된 최대 효율계수값은 6시간 스케일까지 비교적 일정하다 12시간과 24시간 스케일에서는 점차 작아졌다.

각각의 시간 스케일에 대해 계산되어진 수문곡선 중 30분과 24시간의 수문곡선을 그림 2에 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 2). 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 추이를 최대한 따라가게 되며 따라서 계산 시간단위가 증가하면 각 계산시간 동안 계산되어지는 강우량과 이로부터 계산되는 유출량의 크기가 커진다. 단위계산시간 동안 유입되는 강우와 계산되어진 지표하 유출량이 많아지기 위해서는 지하수위가 증가해야 하는데 이는 T_0 가 이러한 효과를 상쇄할 만큼 증가하지 않는 한에서 가능하다.



(a) 30분 시간스케일



(b) 24시간 시간 스케일

그림 3. 수문곡선 비교

그런데 지하수위의 계속적인 상승은 지표유출의 증가를 가져오게 되는데(표 2) 이는 지하수위가 증가함에 따라 국부적인 지하수위가 지표보다 높은 포화지역의 넓이가 지수적으로 증가하기 때문이다(그림 4 (a),(b)).

이는 총유출량은 일정함에도 불구하고(표 2) 지하수위 상승에 의한 지표하유출량의 증가와 지표유출량이 동시에 증가하는 모순적인 상황을 상정하므로 지표하유출량이 줄어든 표 2의 결과로 귀결된 점을 해석하기 위해서는 수문곡선의 형태와 계산된 매개변수의 변화를 동시에 고려할 필요성이 있다. 그럼 3에서 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 2

에서 30분 시간 스케일에서는 지표하유출에 의해 수문곡선의 형태가 결정되나 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 함수형태에 기인한다.

이러한 결론은 매개변수 변동성 분석에 의해 뒷받침 되었다. 매개변수 m , T_0 , TD 에 대한 민감도 분석의 결과를 그림 5에 나타내었다. $SRMAX$ 와 SR_0 는 시간 스케일에 따른 변화가 거의 없었기 때문에 도시하지 않았다.

그림 5에서 m 의 폭선은 시간 스케일에 대한 변화가 거의 없었다. 반면 T_0 는 시간 스케일이 작은 경우에 값이 크고 변동성이 작으며 시간 스케일이 커지면서 값이 작아지고 변동성이 증가한다. T_0 가 작으면 지표하흐름의 양이 작고 이는 지표하흐름의 증가로 연결된다. 따라서 그림 5에서 나타난 T_0 의 변화는 시간 스케일이 증가함에 따라 지표하유출을 줄이고 지표유출을 늘이므로 앞서 제시된 수문곡선의 형태변화에 따른 결과와 일치한다. 변동성이 증가하는 것은 지하수위 증가에 따른 포화면적의 변화가 지수적이기 때문에 지표유출의 비중이 높은 시간 스케일의 경우에 T_0 의 변동성이 높은 것으로 판단된다. TD 는 시간 스케일이 증가함에 따라 변동성이 감소되었다. 이는 T_0 에 의해 지표하유출의 양이 작아지고 따라서 TD 의 변화에 의한 포화지역으로의 흐름유입의 변화가 전체 수문곡선에 미치는 영향이 점차 작아지기 때문이다.

이상의 결과에서 Nash와 Sutcliffe가 제안한 효율계수식에 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.

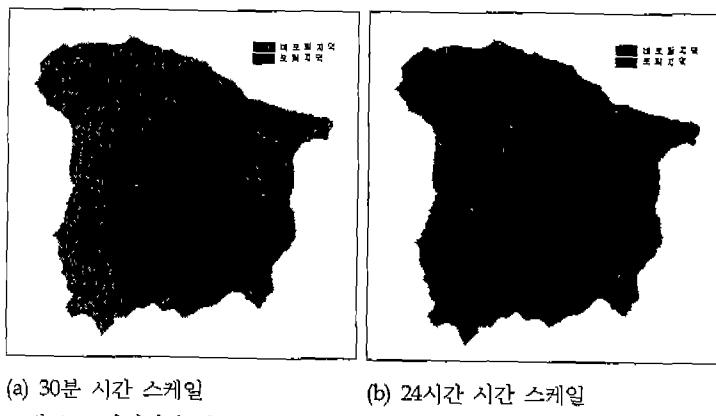


그림 4. 포화면적의 비교

5. 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.

시간 스케일이 다른 수문입력자료에 TOPMODEL을 적용하였으며 매개변수 보정을 위해 유전자 알고리즘을 적용하였다. 또한 매개변수의 변화를 고찰하기 위해 매개변수 변동성 분석을 실시하였다. 분석 결과 공극률을 고려한 감소계수 m 은 시간 스케일의 증가에 따른 변화가 적었으며 횡방향 투수량 계수 T_0 는 전반적으로 값이 줄어들었고 변동성이 높아졌다.

비포화층에서의 체류시간 TD 는 변동성 작아지는 결과를 보였다. 효율계수를 목적으로 하는 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 변동판측, 공간포화 양상 관측등의 보다 정밀한 수문현상 관측과 TOPMODEL 모의와의 비교분석을 통해 결정되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

한국건설기술연구원, (1997) 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구

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.

Dietterick B.C. and 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.

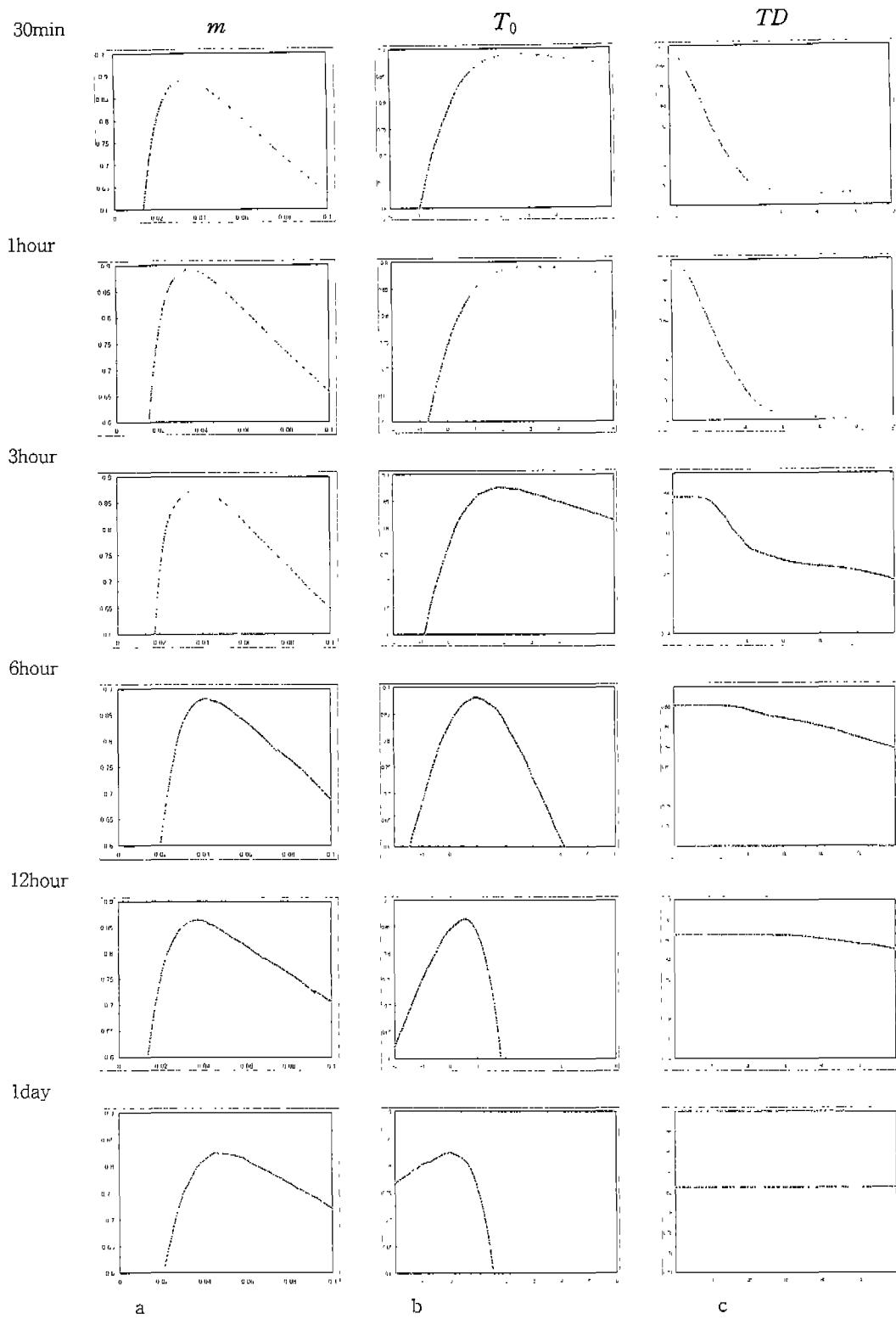


그림 5. 시간 스케일 변화에 따른 매개변수의 변화

(세로축: 효율계수, 가로축: 매개변수값 단위: $m[m]$, $T_0[\ln(m^2/\text{hr})]$, $TD[\text{hr}]$)

- Franchini M. and Wendling J. and Obled C. and Todini E. (1996) "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *J. Hydrol.*, Vol. 175, pp. 293~338.
- 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.
- Kirkby M.J. (1997) "TOPMODEL: A personal view." *J. Hydrol.*, Vol. 11, pp. 1087~1097.
- 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. and Beven K.J. and 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.
- USACERL (1991) GRASS4.0 User's Reference Manual.
- Western A.W. and Grayson R.B. and Bloschl G. and Willgoose G.R. (1999) "Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 3, pp. 797~810.
- Wood E.F. and Sivapalan M. and 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. and 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.