시간 scale 변화에 따른 TOPMODEL 매개변수들에 관한 연구

A Study of TOPMODEL Parameters on the Variation of the Temporal Scale

○김 경 현**, 정 선 희**, 김 건 목***, 김 상 현*

1. 서 론

TOPMODEL은 유출에서의 지형적 영향을 포함하는 개념적 모형으로서 개발된 이래로 많은 유역에서 적용성을 검토 받았으며(Iorgulescu 외, 1994; Holco 외, 1997) 지형, 토양수분, 기후 등의 수문학적인 영향을 분석하는 도구로 폭넓게 사용되었다(Wolock, 1995; Zhang 과 Montgomery, 1994; Western 외, 1999; Dietterick 외, 1999). 특히 scale문제에 있어서 REA(Representative Elementary Area) 개념(Wood 외, 1988)을 포함한 수문학적 유사성 문제, 적정격자크기의 결정에 관한 문제 등 주로 공간적인 scale 문제를 이해하는데 많은 기여를 했다(Wood 외, 1990; Wood 외, 1998; Zhang 외, 1994). REA를 이용한 수문학적 유사성에 대한 연구는 REA 이상의 면적을 가진 유역에 대해 보다 단순화된 모형적용이 가능하게 해 주었으며 scale의 변동에 따라 고려되어야 할 유역특성에 대한 시각을 제공하였다. 격자 크기에 관한 연구는 GIS의 발전에 힘입어 더욱 활발해졌는데 Quinn 과 Moore 그리고 Zhang 등은 일반적으로 격자크기가 작을수록 더욱 정확한 결과를 준다는 것을 밝혔다(Quinn 외, 1991; Zhang 외, 1994). 또한 수문모형과 그것의 매개변수는 격자크기에 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다(Saulnier 외, 1997). 한편 시간 scale에 관한 문제에서는 RET(Representative Elementary Time) 개념을 도입함으로써 REA와 유사한 접근을 시간 scale에 대해 시도했다(Seyfried 외, 1995). 그러나 시간 scale 문제에서 계산시간의 scale에 따른 sample 크기가 미치는 모형과 매개변수에 대한 영향에 대해서는 아직 많은 연구가 진행되지 못했다.

본 연구에서는 비교적 정확한 강우와 관측유량에 대한 자료를 바탕으로 여러 개의 다른 시간 scale을 가진 강우-유출 자료를 만들어 내고 이를 모형에 적용하였다. 시간 scale변화에 따른 모형의 효율과 매개변수의 변화를 계산하고 모형의 구조와 연관시켜 이해하는 것을 목표로 한다. 또한 이를 통해 특정한 시간 scale의 입력자료를 모형에 적용했을 때 얻을 수 있는 결과를 해석하는데 있어 유용한 기준을 획득하고자 한다. 본 연구에서는 두 가지 최적화 기법을 사용하여 계산된 최적 매개변수의 신뢰성을 확보하였다.

2. TOPMODEL 개요

본 연구에 적용된 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. 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 소개된 바 있어(Franchini 외, 1995; Kirkby, 1997) 본 연구에서는 매개변수가 기능하는 부분을 중심으로 기술한다.

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

z_x는 지표에서 수하수위까지의 깊이이며 K_0는 수리학적 전도도이다.

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

* 부산대학교 환경공학과 조교수
** 부산대학교 환경공학과 석사과정
*** 부산대학교 청정공학협동과정 석사졸업

여기서 S_x는 $z_x n_{drain}$로 x지점에서의 포화부족량이며 $\overline{S}$는 유역전체의 평균 포화부족량이다. a는 x지점의 상류면적이며 T_0는 x지점의 투수량계수, $\tan B$는 x지점의 경사이다. Λ는 토양-지형지수의 유역 평균값이다. m은 scaling 매개변수로

$$m = n_{drain}/f \tag{3}$$

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

3. 모형의 적용

3.1 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. 이 중에서 설마천 유역의 중류부에 위치한 영국군 전적비를 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 구성되어있으며 절리가 비교적 많이 발달하고 경사가 급하다. 일반적으로 편마암은 화강암으로부터 기원한 것으로 불투수층으로 분류될 수 있으나 이 지역의 경우 절리와 엽리의 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 얻기위해 GRASS의 등고선 내삽 기능을 이용, 내삽된 등고선으로부터 DEM을 구축했다(USCERL, 1991). 먼저 GRASS 의 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.

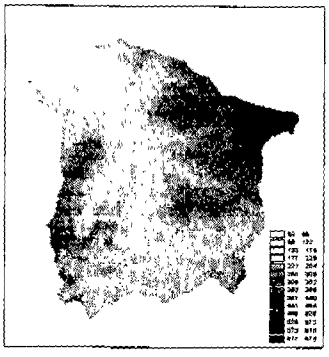


그림 1. 수치고도지도

그림 2. 지형지수지도

3.3 입력수문자료

한국 건설 기술 연구원에서 제공하는 1998년 자료 중 6월 28일부터 8월 30일까지의 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 선정했다.

4. 결과 및 토의

TOPMODEL의 매개변수는 프로그램에 따라 다소 차이는 있으나 m, T_0, TD, $SRMAX$, SR_0 등5개가 주요 매개변수이다. 여기에서 m은 공극률을 고려한 감소계수이며 $SRMAX$는 식생뿌리층의 최대저류량, TD는 비포화층에서의 체류시간, SR_0는 식생뿌리층에서의 초기 저류부족량이다. 이 중 SR_0는 모형 내부에서 항상 $SRMAX$보다 클 수 없으므로 최적화과정에서도 이를 유지시켰다. 최적화의 방법으로 Monte Carlo 방법 William, 1992)과 Genetic Algorithm을 사용하여 비교하였다. 목적 함수로는 Nash와 Sutcliffe가 제안한 식을

동일하게 사용했다(Nash, 1970).

첫 번째 모의는 Monte Carlo방법으로 얻은 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 유전자 알고리즘으로 얻은 결과와 비교하였다. 이때 Monte Carlo방법에는 500번의 난수발생이 실행되었고 유전자 알고리즘은 개체군크기 50, 세대수 100, 염색체크기 2^{10}로 실행되었다. 결과는 표 1과 표 2에 나타냈었다. 표 1에서 입력자료 1시간의 경우를 제외하고는 유전자 알고리즘으로 얻은 효율이 Monte Carlo방법보다 더 높은 효율을 보였으나 그 차이는 적음을 알 수 있다. 따라서 Monte Carlo 방법에 의한 최적화 결과를 신뢰할 수 있었다.

두 번째 모의는 Monte Carlo 방법을 이용해서 각각의 입력수문자료에 대해 4000회의 난수발생을 적용시켰으며 비교적 높은 최고 효율을 보이는 매개변수 쌍을 분리했다(그림 3). 그림 3에서 m과 T_0는 시간 scale이 증가함에 따라 대체로 커지는 경향을 보이며 이에 반해 TD는 약간 작아지는 경향을 보이다 1day에서 증가했다. m은 수문감소곡선의 형태를 결정하는 매개변수로 값이 클수록 완만한 수문감소곡선을 그 반대의 경우는 급한 수문감소곡선을 나타낸다. 시간 scale이 커짐에 따라 관측유량이 평균화되어 수문곡선의 형태가 점차 완만하게 되며 m은 점차 큰 값을 가지는 경향을 보인다. 한편 시간 scale이 커짐에 따라 계산된 총유출량에서 지표흐름의 비율이 점점 증가하는데 (표 3) 이 같은 현상은 TOPMODEL의 구조에 기인한다. 식(2)의 S_x의 크기를 결정하는 것 중에서 시간 scale에 따라 변하는 것은 다음 식에 의해 결정되는 $\overline{S}$의 초기값 뿐이다.

입력자료	매개변수					Efficiency
	m	T0	TD	SRMAX	SR0	
10분	0.0346	0.8515	9.924	0.000153	0.0001121	88.892
30분	0.0346	2.1045	5.863	0.000205	0.0001967	**89.083**
1시간	0.0330	2.9649	6.919	0.000177	0.0001637	88.850
3시간	0.0381	3.3349	2.788	0.000153	0.0001121	87.567
6시간	0.0411	2.9121	2.648	0.000155	0.000153	87.951
12시간	0.0384	3.0721	4.961	0.000184	0.000112	86.029
24시간	0.0430	3.6904	9.311	0.000496	0.000427	83.145

표 1. Monte Carlo방법을 이용한 매개변수 최적화. 난수발생횟수 500 회

입력자료	매개변수					Efficiency
	m	T0	TD	SRMAX	SR0	
10분	0.0335	0.9707	8.5874	0.000109	0.000109	88.942
30분	0.0338	2.0563	6.2948	0.000300	0.000152	**89.015**
1시간	0.0344	3.3216	4.7827	0.000150	0.000109	88.984
3시간	0.0373	3.2435	3.1730	0.000106	0.000101	87.676
6시간	0.0384	1.9860	0.3927	0.000400	0.000172	88.162
12시간	0.0355	3.3528	0.4902	0.000300	0.000119	86.327
24시간	0.0467	3.6028	8.3923	0.000167	0.000126	83.586

표 2. Genetic Algorithm 이용한 매개변수 최적화. 개체군 크기는 50, 세대수는 100, 염색체크기는 2^{10}

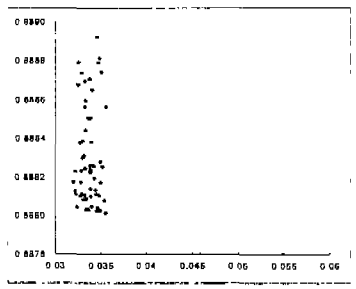
입력자료	지표유출/총유출
10분	0.11
30분	0.08
1시간	0.08
3시간	0.13
6시간	0.20
12시간	0.28
24시간	0.32

표 3. 지표유출의 비율

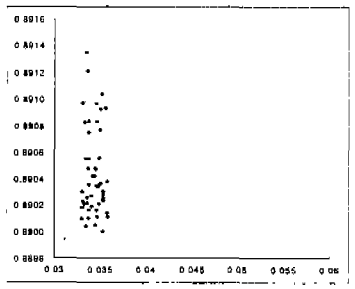
$$\overline{S_1} = -\frac{1}{f}\ln\left(\frac{Q_{obs}^1}{Q_0}\right) \tag{4}$$

$$Q_0 = AT_0\exp(-\Lambda) \tag{5}$$

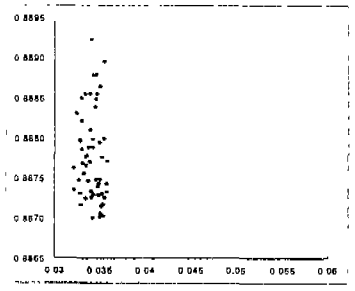
식 (4)에서 Q_{obs}^1는 관측유량의 첫 번째 값으로 시간 scale이 커 질수록 값이 증가한다. Q_0는 지표하흐름의 포텐셜값이다. 식(4)와 (5)에서 Q_0는 T_0값이 증가할수록 Λ값이 감소할수록 증가한다. 한편 $\overline{S_1}$값은 Q_{obs}^1값이 증가할수록 Q_0값이 감소할수록 절대값이 증가한다. 따라서 S_x는 Q_{obs}^1가 클수록 Λ가 클수록 T_0가 작을수록 따라서 Q_0가 작을수록 커진다. 이 중 Λ는 공간 scale에 의해 영향을 받는데 즉 격자크기가 커질수록



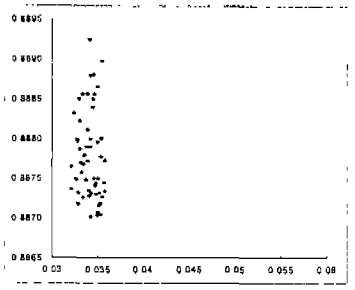
10min



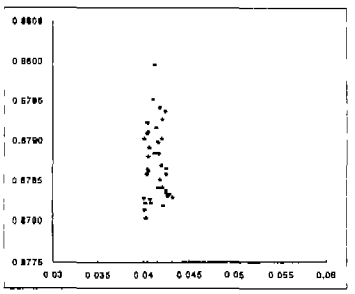
30min



1hour

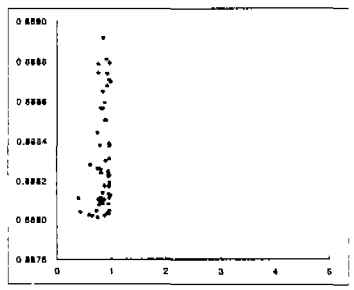


3hour

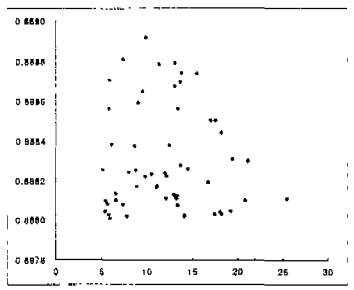


6hour

m



T_0



TD

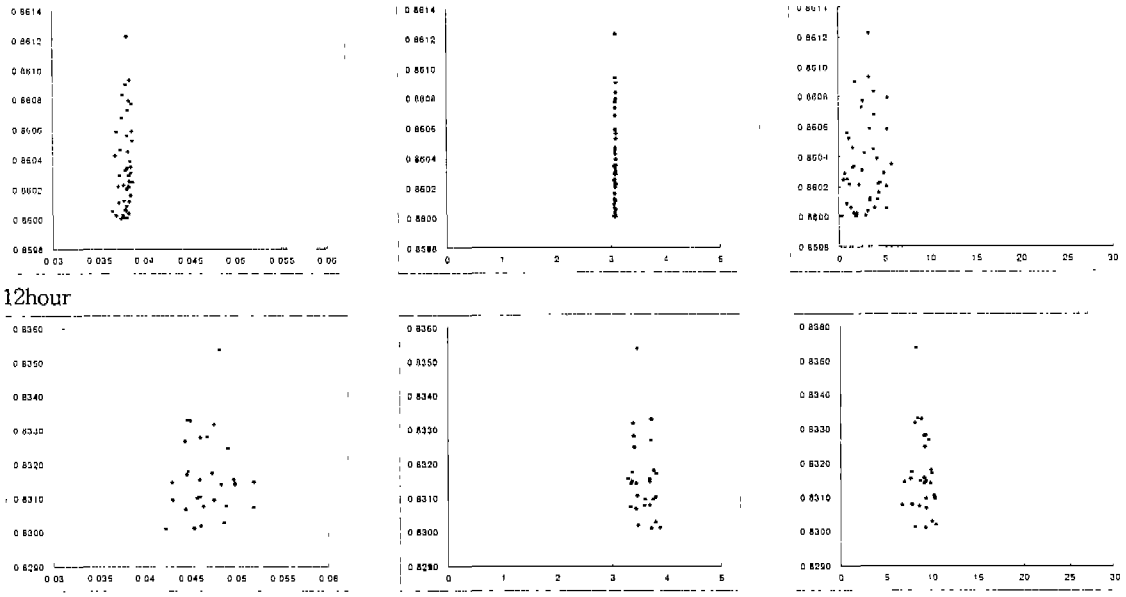


그림 3. 시간 scale 변화에 따른 매개변수의 변화

Λ값도 커진다(그림 4)(Franchini 외, 1996). 따라서 S_x도 커지게 된다. 그런데 S_x의 크기는 $\overline{S}$와 나머지 지형특성을 반영하는 인자들에 의해 결정되는데 이 중에서 강우를 흡수할 수 있는 저류공간은 주로 지형특성을 반영하는 인자들에 의해 결정된다. 따라서 강우를 흡수할 수 있는 공간은 Λ가 클수록 T_0가 작을수록 따라서 Q_0가 작을수록 크다. 일반적으로 시간 scale이 커질수록 단위계산시간당 입력되는 강우량은 커지는데 이를 받아들일 저류량의 크기는 그것에 비례해서 증가하지 않기 때문에 지표유출량이 많아진다(표 3). 한편 T_0값이 커질수록 지표유출이 줄어드는데 그 이유는 국부적인 포화가 덜 발생하기 때문이다. 반대로 TD값은 작을수록 지표유출이 줄어든다. TD값이 불포화저류에서 포화저류로의 이동시 지체시간을 의미하기 때문이다. 본 연구에서는 여러 번의 모의를 통해 위 두 사실을 확인했다. 이 같은 사실은 그림 3의 결과와 대부분 일치하는데 과다하게 계산된 지표유출을 줄이기 위해 T_0는 대체로 커지게 되고 TD는 작아지는 경향을 보이나 TD의 경우는 1보다 작을 수 없기 때문에 그 변화는 그리 크지 않다. 그러나 본 연구에서 쓰인 목적함수를 최대화하는 방향으로 최적화 되기 때문에 매개변수의 움직임이 대체적인 경향에서 벗어나는 경우도 나타난다. 한편 위 계산의 결과에서 입력수문자료의 시간 scale은 계산결과에도 큰 영향을 미치므로 적절한 scale의 선택이 요구된다. TOPMODEL 경우 시간 scale이 커짐에 따라 나타나는 지표유출 비율의 증가와 이에 따른 매개변수의 변화는 격자크기를 함께 증가시킴으로써 완화시킬 수 있을 것으로 생각된다. 격자크기가 커 질수록 Λ값이 증가하며(그림 4) Q_0가 작아져 시간 scale의 증가에 따른 효과를 반감시킬 수 있기 때문이다.

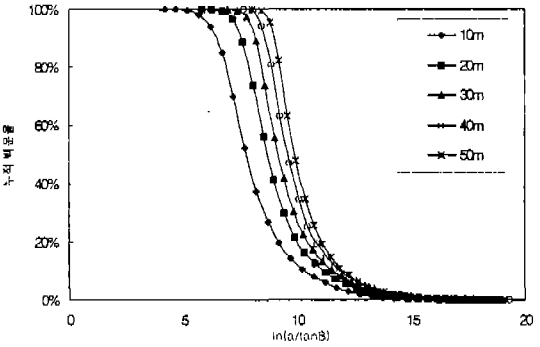


그림 4. 격자 크기변화에 따른 지형지수의 변화

한편 그림 3에서 세 개의 매개변수는 시간 scale이 증가할수록 변화폭이 점점 줄어들다 1day에서는 전혀 다른 변화양상을 보이는데 이는 시간 scale의 증가에 따라 TOPMODEL의 기본가정인 정상상태 조건에 보다 적합해 지기 때문이나(Wigmosta 외, 1999) sample 개수의 감소에 의한 정보손실의 영향이 점점 커지기 때문에 적절한 시간 scale의 설정이 또한 필요하다.

5. 결론

본 연구에서 시간 scale의 변화는 TOPMODEL 적용에 있어 매개변수와 총유출에 대한 지표유출의 비에

영향을 준다는 것을 밝혔다. 앞선 연구에서 격자크기의 변화는 이러한 영향과는 반대의 작용을 하는 것으로 확인되었다. 따라서 TOPMODEL 적용시 주어진 시간 scale에 따라 적절한 격자크기의 조합이 필요함을 제안하였다. 또한 시간 scale이 증가할수록 TOPMODEL의 정상상태 가정을 잘 만족시키나 반면에 sample개수 감소에 따른 정보의 손실이 또한 계산결과에 영향을 미쳤다. 그러므로 시간 scale과 선정에 있어 정상상태조건과 정보손실사이의 균형을 위한 적절한 시간 scale선정이 필요함을 보였다.

참고 문헌

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

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.

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.

Press W.H. and Teukolsky S.A. and Vetterling W.T. and Flannery B.P. *Numerical Recipes in fortransecond edition*, pp. 266-277, Cambridge University Press, 1992.

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.

Seyfried M.S. and Wilcox B.P. (1995) "Scale and the nature of spatial variability: Field examples having implications for hydrologic modeling." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 1, pp. 173~184.

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.

Wigmosta M.S. and Lettenmaier D.P. (1999) "A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 1, pp. 255~264.

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.