韓國水資源學會論文集
第32卷 第5號 · 1999年 10月
pp. 515~524

공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용

Modification of TOPMODEL Considering Spatial Connectivity of Saturated Area

김 상 현* / 김 경 현**
Kim, Sang Hyun / Kim, Kyung Hyun

Abstract

A methodology to resolve a TOPMODEL problem has been suggested, which is associated with the spatial distribution of soil moisture behaviour in a runoff mechanism. A procedure to integrate the spatial information of saturation deficit in the TOPMODEL reflects the connectivity of saturated area in a watershed. The developed algorithm includes an improved basis in tracing the runoff path without increasing the number of parameters. The performance of the developed algorithm has been tested to an upland subwatershed, namely Dongok, which is the IHP watershed located at Wichon, Korea. Comparing with the original statistical version of the TOPMODEL, it has been found that the suggested algorithm can relax an overestimation of peak rate in the runoff simulation.

Keywords: spatial distribution of saturation, TOPMODEL, runoff simulation, connectivity, overestimation of peak flow

요 지

본 연구는 유역내 토양수분의 공간적 분포를 고려하는 과정에서 TOPMODEL이 가지고 있는 구조상의 문제를 해결하는 방안을 제시한다. 포화초과유출을 모의하는 기존 TOPMODEL은 유출모의시 유역내 포화부분의 공간적인 정보를 반영하는 과정에 있어 포화면적의 연결성을 고려한 유출 알고리즘의 개발로 발전되었다. 개발된 알고리즘은 TOPMODEL의 매개변수를 증가시키지 않고 개선된 유출경로 추적의 근거를 제시함으로써 모형의 합리성과 적용성을 제고시켰다. 본 연구에서 개발된 포화면적 연결모형과 기본적인 통계적 입력모형형태의 TOPMODEL을 국제수문개발계획 대상유역인 위천유역내의 동곡소유역에 적용한 결과 본 연구에서 개발된 포화면적 연결모형이 다른 두 모형에서 발생하는 모의시 과도첨두유량계산의 문제를 해결할 수 있었다.

핵심용어 : 포화의 공간적 분포, TOPMODEL, 유출 모의, 연결성, 과도첨두유량

* 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수
Assistant Prof., Dept. of Envir. Engrg., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea
** 부산대학교 공과대학 환경공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Envir. Engrg., Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea

1. 서 론

TOPMODEL은 1979년 Kirkby와 Beven에 의해 개발된 지형적 기반 모형(Topograpically based model)로서 GIS의 발전과 더불어 그 발전 가능성이 더욱 커져왔다(Kirky 와 Beven, 1979). 그러나 TOPMODEL의 몇 가지 가정에 기인하는 문제점들과 공간적인 정보를 효과적으로 다룰 수 없는 문제 등이 또한 지적되어 왔다(Beven, 1993; Ambroise 외 1996; Saulnier 외, 1997; Wigmosta와 Lettenmaier 1999). Western 등(1999)은 최근의 연구에서 각종 지형인자의 토양수분함량 예측력을 비교분석한 바 있으며 그 중 TOPMODEL의 지형지수(topographic index; Kirkby, 1975)는 토양수분함량의 구조화 정도(organization)가 높을 때 예측력이 우수하다는 것을 밝혔다. 이는 유출계산시 TOPMODEL의 공간포화분포를 고려하는 기존의 모형구조가 충분하지 않음을 의미한다. TOPMODEL은 지하수위의 경사와 지표면의 경사가 같다는 가정과 수리전도도(hydraulic conductivity)의 변화를 고려해 개발되었다. 또한 지형지수를 통해 결정된 저류량에 대한 초과강우 여부에 따라 포화초과유출을 계산하고 평균지하수위로부터 지표하유출을 계산하는 구조를 가진다. 이 때 지형정보는 격자별로 입력되지 않고 통합적(lumped)으로 입력되기 때문에 지형의 공간적 특성이 직접적으로 반영되지 못한다. 그렇기에 포화초과유출의 연결성에 대한 고려 역시 모형구조에 포함되지 못했다. 다시 말하면 TOPMODEL에서는 각각의 격자에서 발생한 포화초과유출을 주위 격자의 포화 여부와 관계없이 모두 포화초과유출계산에 포함시켰다. 그러나 사면유출의 수문거동을 고려하면 특정지역이 포화되어 포화초과유출이 발생했다 하더라도 주위 토양이 아직 포화되지 않았다면 짧은 거리의 지표면흐름을 형성했다가 다시 토양 속으로 재침투해 들어가는 것을 관찰할 수 있다(Dunne 등, 1970).

본 연구에서는 이 과정을 고려하기 위해 지형지수의 통합적 분포를 사용하는 기존의 통계적모형 대신에 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형을 개발하였다. 이를 통해 각 격자에서 계산된 포화초과강우 값을 주변 격자의 포화여부를 고려해서 누적시킴으로써 최종 유출구까지의 포화면적의 공간적 기여를 실제적으로 고려했다. 또한 본 연구에서 개발된 모형과 기존 TOPMODEL의 포화초과유출량을 비교분석하는데 주안점을 두었으며 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형으로 계산한 포화초과유출량도 함께 비교하였다.

2. TOPMODEL의 기본이론

본 연구에 적용된 TOPMODEL은 다음과 같은 세 가지 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. 이 가정은 대상 유역의 토양구조에 따라 달리 적용될 수 있음이 제안된 바 있다(Ambroise 등, 1996). 세 번째 가정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \tag{1}$$

여기서 K_0는 지표면에서의 수리학적 전도도, f는 감소계수, z는 지표에서 포화지점까지의 깊이이다. 또한 두 번째 가정에 의해 Darcy의 법칙을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = T_i(z_i)\tan\beta_i \tag{2}$$

여기서 T_i는 i지점에서의 포화 투수계수, β_i는 i지점에서의 사면의 경사도, q_i는 i지점에서의 횡방향 유출이다. 그리고 첫 번째 가정에 의해 위 두 식은 다음과 같이 전개된다.

$$a_i R = T_0 \tan\beta_i \exp(-fz_i) \tag{3}$$

여기서 R은 포화층으로의 유입이다. 위 식으로부터 몇 차례의 수식전개를 통해 다음과 같은 TOPMODEL의 지배방정식을 유도할 수 있다(Franchini M. 등, 1996).

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f}\left[\lambda - \ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right)\right] + \frac{1}{f}\left[\ln T_0 - \ln T_a\right] \tag{4}$$

위 식에서 유역의 평균지하수면과 유역 내 임의 지점에서의 지하수면의 차는 지형지수의 평균값 λ와 임의

지점값 $\ln(\frac{a_i}{\tan\beta_i})$의 차와 전달계수(transmissivity)의 평균값 T_a과 임의의 지점값의 차이로 표현됨을 알 수 있다. 그러나 유역 내에서 전달계수가 일정하다고 가정하면 위 식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f}[\lambda - \ln(\frac{a_i}{\tan\beta_i})] \quad (5)$$

z_i 값으로부터 i 지점에서의 포화지점까지의 깊이를 예측할 수 있다.

3. 포화 면적 연결 알고리즘의 개발

3.1 통계형 모형과 공간 분포형 모형

기존의 TOPMODEL은 수치고도지도로부터 얻어지는 분포형(distributed) 지형지수 입력자료를 유출량계산 과정에서는 통합형(lumped)으로 전환하여 적용한다. 즉 지형지수의 공간적 분포가 통계적 분포로 바뀌어 계산에 참여하게 된다. 따라서 TOPMODEL은 분포형적인 특성과 통합형적인 특성을 동시에 지니고 있으며, 지형지수의 통계적 분포를 사용하는 모형 혹은 TOPMODEL 통계형 입력모형이라 한다. 이는 모든 수문학적 상태와 유동(fluxes) 즉, 토양 수분 함량, 지하수위, 증발산량, 지표면흐름이 계산시간별로 지형지수의 통계적 분포에서 얻어진 지형지수의 대표값에 의해 계산됨을 의미한다. 한편 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형 혹은 TOPMODEL 분포형 입력모형을 고려할 수 있는데 이 경우 수문학적 상태와 유동이 매 계산시간별로 각각의 격자(cell)에 대해 계산되어진다. 이 두가지의 모형에서 지표하흐름(subsurface flow) 양의 계산은 아래 함수를 공유하기 때문에 포화초과유출량이 같은 경우 항상 동일함을 확인할 필요가 있다.

$$q_{subsurface} = \frac{K_0}{f} e^{-\lambda} e^{-f\overline{z_{wt}}} \quad (6)$$

여기서 $\overline{z_{wt}}$ 는 지하수위까지의 평균깊이이다. 앞선 연구를 통해 TOPMODEL 통계적 입력모형과 TOPMODEL 분포형 입력모형으로 예측된 지표면흐름양 사이에 큰 차이가 없는 것으로 알려졌다 (Wolock, 1995). 이는 포화면적의 공간적 분포가 시간적으로 변화되는 과정을 유출계산과정에서 합리적으로 반영하지 못한데서 기인한 것으로서 구체적으로는 포화부분의 연결성 여부에 대한 고려가 유출계산 과정에서 결여되었음을 의미한다.

3.2 포화격자 연결성

통계적 입력모형과 분산형 입력모형은 일단 포화초과강우가 발생한 것으로 계산되면 그 지점에서 유출지점까지의 포화면적의 연결성 유무와는 관계없이 총유출량에 기여하게 된다. 이는 실제의 유출현상과 일치하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서 제안하는 하나의 방법은 포화초과유출이 발생한 지점에서부터 최종유출지점까지의 자연유하선상에 포화되지 않은 지역이 없을 때 비로소 그 흐름이 연결되어 유출에 기여한다는 생각에 기반한다. TOPMODEL에서 포화여부를 결정하는 매개변수는 지형지수이므로 이는 포화초과강우가 발생한 지점의 지형지수와 같거나 큰 주변 격자들이 그 지점에서 출구지점까지 계속해서 이어짐을 의미한다.

그림 1의 (a)에 제시된 지형지수지도의 예를 살펴보면 고립되어 있는 지형지수 17값을 가진 격자들이 존재한다. 만약 지형지수 17값을 가진 격자들에서 포화초과강우가 발생한다면 이들 고립된 격자들에서 발생한 양은 주변의 비포화된 지역으로 재침투해 표면하유출에 기여하게 될 것이다. 이에 기반해 포화초과유출이 발생한 격자의 연결성 유무를 고려해 그 양을 해당하는 흐름의 총량에 기여하도록 하는 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형 즉 TOPMODEL 포화면적 연결모형을 개발하였다. 그림 1 (b)의 지형지수지도는 각각의 격자와 그 주변 격자의 지형지수 값을 비교해 주변값 중 가장 큰 값으로 바꾸었다. 개발된 알고리즘(그림 2)은 이렇게 처리된 두 지형지수지도를 계산시간별로 비교하며 동일한 위치의 임의의 두 격자가 같은 값의 지형지수를 가진 때는 연결이 이루어진 것으로 판단하고 다를 때는 일단 연결 유무의 판단을 보류한다. 연결 유무 판단이 보류된 격자에서 포화초과유출이 발생했을 경우 그림 1의 (b)에 제시된 지형지수지도의 해당 격자가 포화될 때 연결이 된 것으로 판단하고 그렇지 않으면 연결이 되지 않은 것으로 판단한다. 연결이 된 것으로 판단된 격자에서 발생한 포화초과유출량은 모두 지표흐름에 기여하게 되고 연결이 되지 않은 것으로 판단된 격자에서 발생한 포화초과유출량은 지표하흐름으로 재침투하게 된다.

10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	14	17	14	15	15	16	16	16	10
10	14	14	14	15	15	16	16	16	10
10	15	15	15	16	15	17	16	16	10
10	15	15	15	16	15	17	16	16	10
10	14	15	15	15	15	16	17	17	10
10	14	14	14	17	17	14	14	14	10
10	14	14	17	14	14	14	14	14	10
10	14	14	14	14	14	14	14	14	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

(a) 포화면적 연결모형에서 저류량 부족을 계산하는 지형지수지도

10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	14	14	14	15	15	16	16	16	10
10	14	14	14	15	15	16	16	16	10
10	15	15	15	15	15	17	16	16	10
10	15	15	15	15	15	17	16	16	10
10	14	15	15	15	15	16	17	17	10
10	14	14	14	16	16	14	14	14	10
10	14	14	16	14	14	14	14	14	10
10	14	14	14	14	14	14	14	14	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

(b) (a)와 비교되면서 포화면적의 연결성 유무를 결정하기 위해 처리된 지형지수지도

그림 1. 지형지수지도자료의 처리

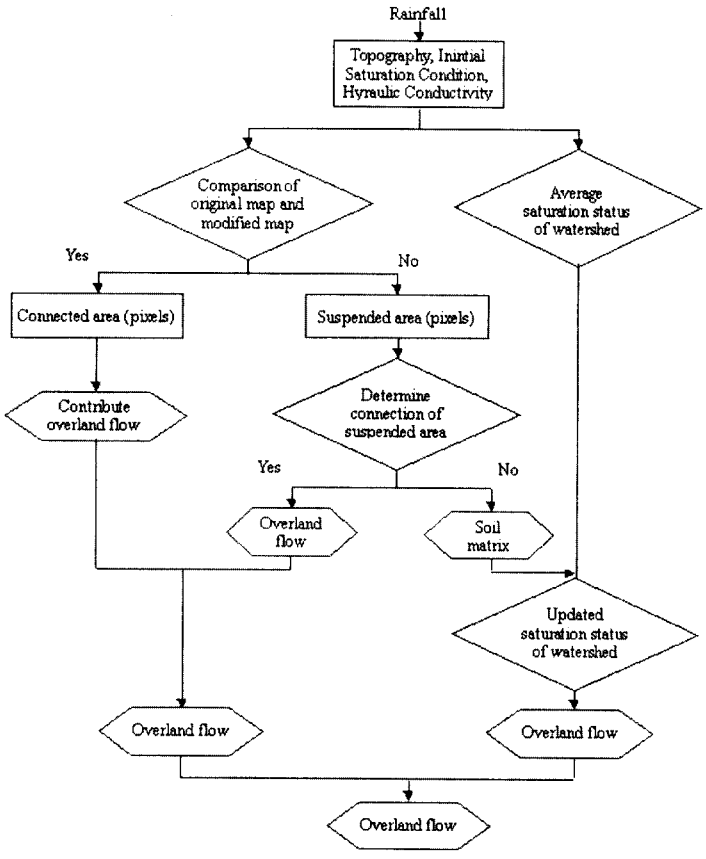


그림 2. 포화면적 연결모형에 사용된 알고리즘

4. 모형의 적용

4.1 대상유역

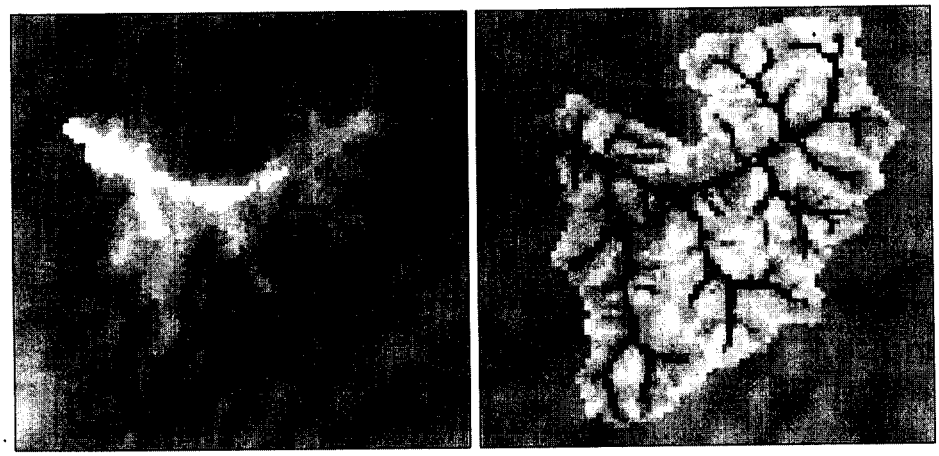
대상유역으로 건설교통부에서 설치운영하고 있는 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 소유역을 선정하였다. 위천 유역은 경상북도 군위군에 위치하고 있으며 낙동강의 소지류를 형성한다. 연평균강우량은 약 1070mm 이며 연평균 증발량은 약 650mm 이다. 대상 유역인 동곡 소유역은 위천 유역의 동북쪽 끝에 위치하며 면적이 33.6km^2, 수로연장 8.0km이다. 14개의 소규모 농업용 저수지를 포함하고 있으며 고도는 최저 212에서 최고 769, 경사도는 0~15%가 10%, 15~30%가 22.3%, 30%이상이 67.8%로 경사가 급한 지형이다. 북쪽의 고도가 높고 따라서 하천은 남쪽으로 흐른다. 유역의 대부분은 산림지역이고 하천을 따라 소규모의 논들이 있으며 드물게 밭이 분포하고 있는 매우 단순한 토지이용상태를 보여준다.

4.2 지형지수의 계산

지형인자해석은 국립지리원에서 작성한 1/25,000 지형도를 이용하였고 분석은 GIS 소프트웨어인 GRASS (Steven, 1997)를 활용하였다. 그림 3의 (a)는 위천 대상 유역 동곡지점의 수치지형지도로 격자 크기는 100m이며 최고 769m에서 최저 212m 의 고도분포를 이루고 있음을 보여준다. 이 수치지형지도로부터의 지형지수계산은 다방향 흐름(Multiple Flow Direction) 알고리즘을 적용해 계산하였다(Quinn, 1991). 이는 임의의 격자가 지닌 상경사 면적(up-slope area)이 보다 낮은 고도를 지닌 모든 주변 격자로 그 고도차에 따라 배분되는 알고리즘이다. 또 다른 지형지수계산 알고리즘인 단방향 흐름(Single Flow Direction) 알고리즘(Jenson 과 Dominique, 1988)은 임의의 격자에서 가장 고도가 낮은 주변 격자로 상경사 면적을 이전시킨다. 앞선 연구를 통해 다방향 흐름 알고리즘이 실제 토양수분함량을 잘 반영하나 유출모의에 있어서는 두 알고리즘이 거의 유사한 결과를 나타내는 것으로 지적되었다(Wolock 외 1995). 그림 3의 (b)는 다방향 흐름 알고리즘을 적용해서 얻은 대상유역의 지형지수와 그 공간적 분포를 격자크기 100m의 수치지도로 표현했다. 지형지수의 크기는 최대 16.296에서 최소 4.481임을 보여준다.

4.3 유출계산

1992년부터 1997년까지 위천 시험 유역의 동곡소유역지점의 관측자료로부터 비교적 신빙성이 높은 것으로 사료되는 6개의 강우유출사상을 추출하였다. 초기 관측유량으로부터 산정된 초기포화결핍도가 모의를 위한 초기 조건으로 설정되었다. 또한 증발산량 입력값은 IHP보고서의 동곡지점 최대·최저 증발량과 사인곡선



(a) 수치지형지도(Digital Terrain Map, 100m grid size)

(b) 지형지수지도(ln a/tanβ)

그림 3. 위천 대상 유역 동곡지점

의 조합을 이용해 획득했다. 사용된 사인곡선은 평균 일일 증발산에 대한 년간곡선과 증발산 유효시간이 계절에 따라 변하는 일일 곡선의 조합이다(Calder 외 1983).

수차례의 매개변수 보정을 거쳐서 관측치와 잘 일치하는 모의결과를 각각의 모형에 대해 확보할 수 있었으며 각각의 모형에 대한 모의 효율은 표 1에 나타내었다. 또한 최종적으로 사용한 매개변수 중 모의결과에 대한 민감성이 비교적 높은 것으로 판단되는 4가지를 표 2에 나타내었다. 여기에서 M은 공극률을 고려한 감소계수이며 SRmax는 식생뿌리층의 최대저류량, TD는 비포화층에서의 체류시간, SR0는 식생뿌리층에서의 초기 저류부족량이다. 모의 효율계산은 Nash 와 Sutcliffe 가 제안한 다음의 식을 사용했다(Nash 등, 1970).

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O_i})^2} \quad (7)$$

여기서 O_i는 관측값이며 $\overline{O}$는 관측치의 평균값, P_i는 예측값이다.

모형 적용결과 포화면적 연결모형의 모의 효율은 강우사상에 따라 TOPMODEL 통계형 입력모형과 TOPMODEL 분포형 입력모형에 대해 강우사상에 따라 다소간 높거나 낮게 나타났다(표 1). 그리고

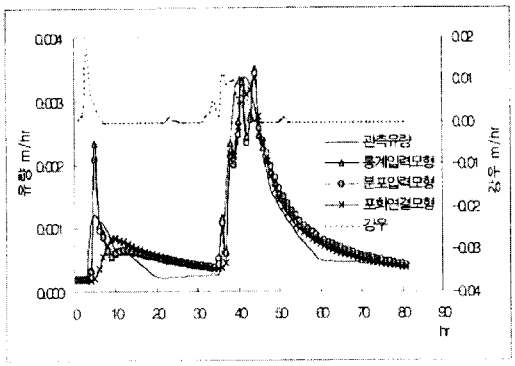
표 1. 각각의 강우사상에 대한 모의 효율

모형종류	모의 효율					
	920715	920811	920824	930627	970512	970624
통계입력모형	85.6	64.7	58.1	84.3	80.9	87.5
분포입력모형	83.7	62.5	58.0	79.7	81.8	88.1
포화연결모형	86.7	56.6	45.7	93.3	66.3	85.0

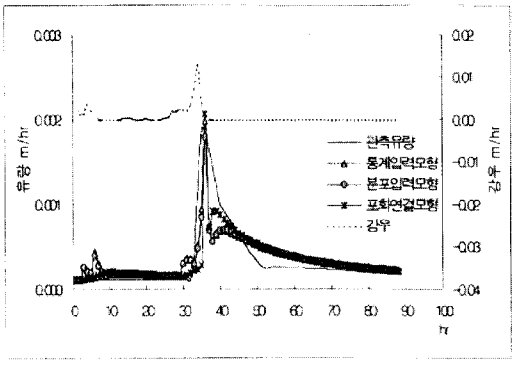
표 2. 각각의 강우사상에 대해 3개의 모형에 적용된 매개변수

강우사상	모형종류	매개 변수			
		M(m)	SRmax(m)	TD(h)	SR0(m)
920715	통계입력모형	0.018	0.015	50	0.0008
	분포입력모형	0.018	0.015	50	0.0008
	포화연결모형	0.016	0.015	30	0.0008
920811	통계입력모형	0.015	0.015	50	0.0008
	분포입력모형	0.015	0.015	50	0.0008
	포화연결모형	0.0135	0.015	30	0.0008
920824	통계입력모형	0.025	0.015	50	0.0008
	분포입력모형	0.025	0.015	50	0.0008
	포화연결모형	0.019	0.015	30	0.0008
930627	통계입력모형	0.02	0.008	50	0.000048
	분포입력모형	0.02	0.008	50	0.000048
	포화연결모형	0.015	0.008	10	0.000048
970512	통계입력모형	0.009	0.1	30	0.005
	분포입력모형	0.009	0.1	30	0.005
	포화연결모형	0.0087	0.1	30	0.005
970624	통계입력모형	0.013	0.05	40	0.0003
	분포입력모형	0.013	0.05	40	0.0003
	포화연결모형	0.013	0.05	40	0.0003

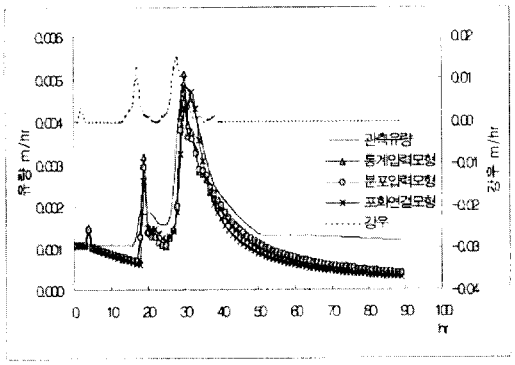
TOPMODEL 포화면적 연결모형의 경우 전자의 두 모형이 과다하게 예측한 포화초과유출값을 현저하게 낮출 수 있었다. 그림 4의 (a), (c), (d), (f) 의 경우 강우사상 초기에 전자의 두 모형에 의해 과다예측되었던 값이 TOPMODEL 포화면적 연결모형에서는 포화초과유출값으로 계산되지 않았음을 볼 수 있다. 이 결과는 포화초과유출량만을 도시한 그림 5에서 확인할 수 있다. 즉 발생한 포화초과유출이 유출점과 연결되지



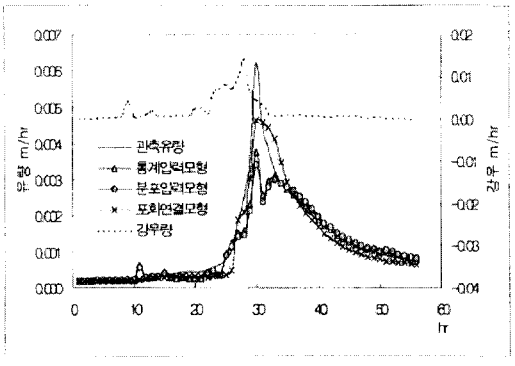
(a) 1992년 7월 15일 강우사상



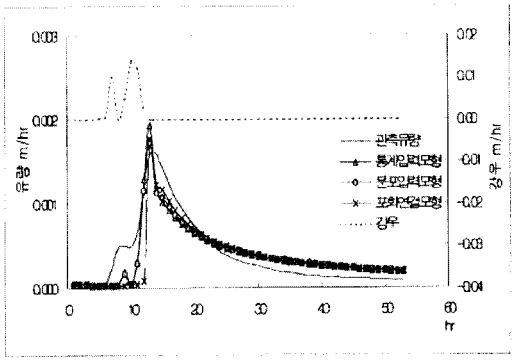
(b) 1992년 8월 11일 강우사상



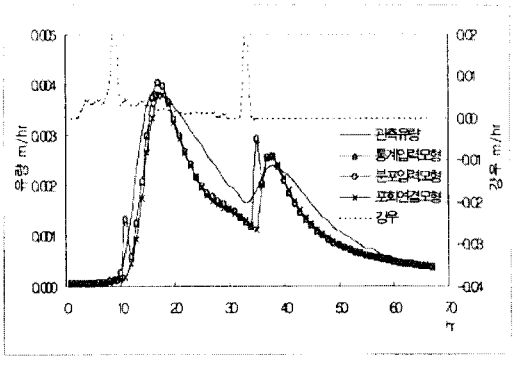
(c) 1992년 8월 24일 강우사상



(d) 1993년 6월 27일 강우사상

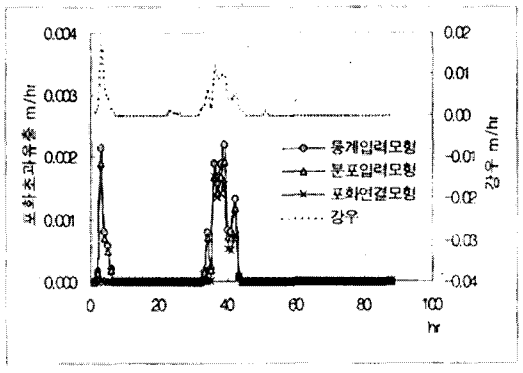


(e) 1997년 5월 12일 강우사상

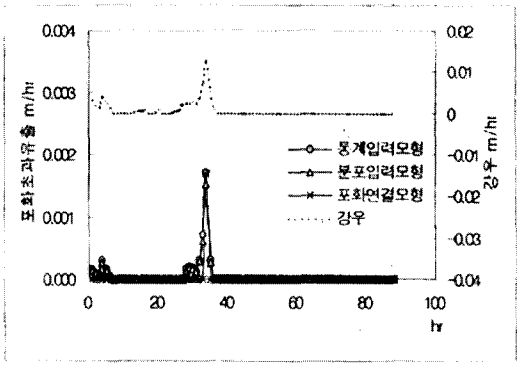


(f) 1997년 6월 24일 강우사상

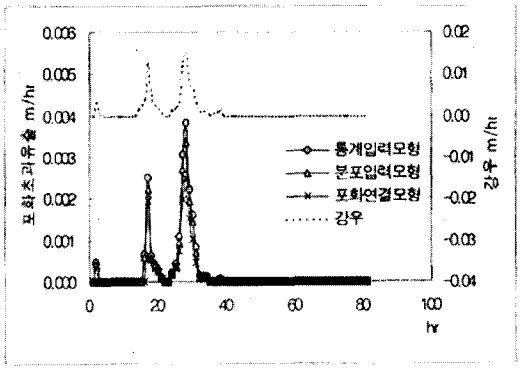
그림 4. 각각의 강우사상에 대한 총 유출량 모의결과 (TOPMODEL 통계형 입력모형, TOPMODEL 분포형 입력모형, TOPMODEL 포화면적 연결모형)



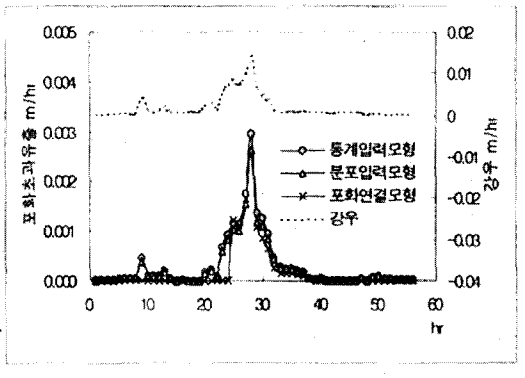
(a) 1992년 7월 15일 강우사상



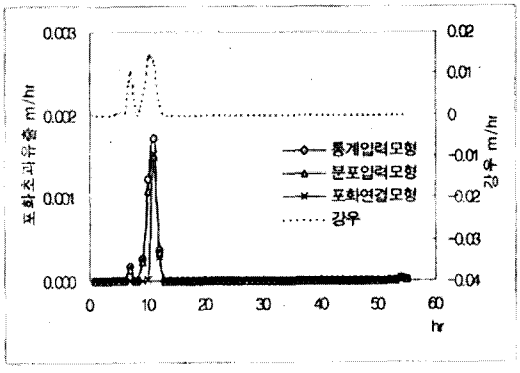
(b) 1992년 8월 11일 강우사상



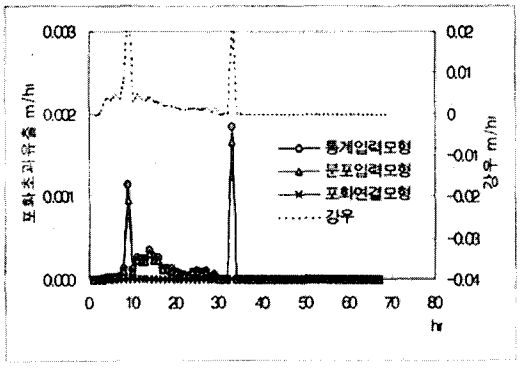
(c) 1992년 8월 24일 강우사상



(d) 1993년 6월 27일 강우사상



(e) 1997년 5월 12일 강우사상



(f) 1997년 6월 24일 강우사상

그림 5. 각각의 강우사상에 대한 지표흐름 모의결과 (TOPMODEL 통계형 입력모형, TOPMODEL 분포형 입력모형, TOPMODEL 포화면적 연결모형)

않았음을 고려해 준 것으로 TOPMODEL 포화면적 연결모형이 기존 TOPMODEL보다 포화초과 유출 모의 능력이 우수함을 보여주고 있다.

TOPMODEL 통계형 입력모형의 포화초과유출 계산량이 TOPMODEL 분포형 입력모형 보다 상대적으로 많은 이유는 알고리즘의 차이에서 비롯된다고 판단된다. 즉 TOPMODEL 통계형 입력 모형의 경우 지형지수의 통계적 분포 입력값이 계산에 참여할 때 해

당등급과 그 전등급의 지형지수값에서 동시에 포화가 일어나는 경우와 해당등급에서만 포화가 일어나는 경우를 구분해서 계산하나 TOPMODEL 분산형 입력모형의 경우는 해당 등급에 대해서만 고려되어 있기 때문이다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 TOPMODEL의 기본가정 중 하나인 사면 유출에서의 수문거동의 정상상태에 관한 제한을 완화시키는데 기여한다. 이는 기존모형이 고려하지 못한 강우 사상별, 시간별 유출기여면적의 공간적 변화를 유출모의시 반영함을 의미한다. Wigmosta와 Lettenmaier는 TOPMODEL의 지형지수가 천이상태에서 공간적으로 변화하는 수문거동을 적절히 설명하지 못한다고 밝혔는데(Wigmosta 와 Lettenmaier, 1999), 이는 TOPMODEL의 유출모의시 수문곡선 상승부분의 과도산정과 수문곡선 하강부분의 과소산정으로 나타난다. 이 문제는 포화면적 연결모형이 보여주는 초기 포화격자 중 비연결부분의 유출기여 지체 및 지하 재침투 등으로 유출모의시 발생되는 문제를 완화시켜줄 수 있다.

한편, 과도한 기여면적 산출로 발생되는 과다한 지형지수의 산정이 유출모의에 주는 부정적인 영향을 완화시키기 위한 연구들은(Quinn 등, 1995; Saulnier 등, 1997) 수로격자고려, 수로시발면적도입, 높은 투수계수의 사용 등으로 시도되어져 왔는데, 지형지수분포의 상단 부분값의 처리나 이에 상응하는 효과를 얻기 위한 각종 변수의 보정 등으로 종합될 수 있다. 포화면적 알고리즘은 초기 유출 모의시, 비연결 상단 지형지수 격자의 직접 유출기여를 배제함으로 관련연구들이 추구하고 있는 방법과 상응하는 효과를 얻을 수 있다. 또한 관련 연구들이 추가의 변수 도입을 통한 모형의 복잡성 증가나 지형지수 산정시 인위적인 판단에 따른 수치 변형 등의 문제를 안고 있는데 반하여, 포화 면적 연결 알고리즘은 기존 TOPMODEL의 매개변수의 복잡성을 증가시키지 않고 지형지수의 계산결과를 변형 없이 사용하여 관련연구와 유사한 모의 효과를 도출함으로서 TOPMODEL의 실용성 증대에도 기여할 것으로 판단된다.

Western등의 여러 가지 지형 인자와 토양수분에 관계에 관한 연구는(Western, 1999) 다른 지형인자와 비교해서 지형지수가 토양수분의 공간적 분포를 가장 정확히 설명하면서도, 유역의 포화 정도에 따른 제한점이 있음을 지적했다. 이는 모형으로부터 판단된 포화초과 흐름의 연결성 유무는 실제 유역의 포화초과 흐름의 연결성과 일치하지 않을 수 있음을 의미한다. 따라서 지형지수의 공간적 분포에 기반한 유출의 공간적 특성을 획득하는 방법론의 정확한 적용을 위해서는, 보다 정확한 토양 수분함양을 예측하는 지형인자의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 TOPMODEL 통계형 입력모형과 TOPMODEL 분포형 입력모형이 고려하지 못한 포화면적의 연결성을 고려한 TOPMODEL 포화면적 연결모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 TOPMODEL 포화면적 연결모형은 TOPMODEL 통계형 입력모형과 TOPMODEL 분포형 입력모형에 비해 상대적으로 정확한 유출계산능력을 보였으며 특히 후자의 두 모형에 의해 과다예측된 포화초과유출값을 적절히 완화시키는 능력을 보였다. 이 같은 결과는 계산된 포화초과 유출값을 연결성의 유무에 따라 지표하흐름과 지표면 흐름에 각각 기여하게 되는 포화면적 연결모형의 구조에서 비롯된다.

참 고 문 헌

건설교통부 (1992~1997). 국제수문개발계획 연구보고서

Ambroise, B., Beven, K. J. and Freer, J. (1996). "Toward a generalization of the TOPMODEL concepts : Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp. 2135~2145.

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.

Beven, K. J. (1993). "Prophecy reality and uncertainty in distributed hydrological modeling" *Adv. Wat. Resource* 16, pp. 41~51

Calder I. R., Harding R. J. and Rosier, P. T. W. (1983). "An objective assessment of soil-moisture deficit models." *J. Hydrol.*, Vol. 60, pp. 329~355.

Dunne, T. and Black, R. D. (1970). "Partial area contributing to storm runoff in a small New England watershed." *Water Resour.*

Res., Vol. 6, No. 5, pp. 1296~1311.

Franchini, M., Wendling, J., Obled C. and Todini E. (1996). "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *J. Hydrol.*, Vol. 175, pp. 293~338.

Jenson, S. K. and Dominque J. O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Photo. Engi. Remo. Sens.* Vol. 54, No. 11, pp. 1593~1600

Quinn, P. F., Beven, K. J., 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

Quinn P. F., Beven K. J. and Lamb R., (1995). "The $\ln(a/\tan\beta)$ INDEX : How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework." *Hydro. Proc.*, Vol. 9, pp. 161~182

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.

Saulnier, G. M., Beven, K. J. and Obled, C. (1997). "Digital elevation analysis for distributed hydrological modeling: Reducing scale dependence in effective hydraulic conductivity value." *Water Resour. Res.*, Vol. 33, No. 9, pp. 2097~2101.

Steven F.Clamons (1997). *GRASS4.2 Programmer's Manual.* Grass Research Group, Department of Geology, Baylor Univ.

Western, A. W., Grayson, R. B., 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.

Western, A. W. and Grayson, R. B. (1999). "The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements." *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 10, pp. 2765~2768.

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.

Wolock, D. M. and McCabe, G. J. (1995) "Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1315~1324.

(논문번호:99-040/접수:1999.05.18/심사완료:1999.07.26)