

TOPMODEL로부터 포화면적의 공간적 연결성을 고려한 모형의 개발과 적용성 검토

김 경 현**, ○김 상 현*, 김 건 목**, 정 선 희**, 이 지 영**

1. 서론

TOPMODEL은 1979년 Kirkby와 Beven에 의해 개발된 물리적 기반의 모형(Physically based model)로서 GIS의 발전과 더불어 그 발전 가능성이 더욱 커져왔다. 그러나 TOPMODEL의 몇 가지 가정에 기인하는 문제점들과 공간적인 정보를 효과적으로 다룰 수 없는 문제 등이 지적되어왔다(Saulnier 외, 1997; Wigmosta 와 Lettenmaier 1999). Western 등은 최근의 연구에서 각종 지형지수의 토양수분함량 예측력을 비교 분석한 바 있으며 그 중 TOPMOEL의 지형지수(topographic index; kirkby, 1975)는 토양수분함량의 구조화 정도(organization)가 높을 때 예측력이 크다는 것을 밝혔다. 이는 유출계산시 TOPMODEL의 공간포화분포 고려구조가 적절치 않음을 의미한다. TOPMODEL은 지하수위의 경사와 지표면의 경사가 같다는 가정과 수리학적 전도도(hydraulic conductivity)의 변화를 고려해 개발된 지형지수를 이용한 지표하 흐름의 움직임에 따른 저유량부족의 계산에 중점을 두었으며 그 결과 포화초과유출의 연결성에 대한 고려가 없었다. 다시 말하면 TOPMODEL에서는 각각의 격자에서 발생한 포화초과유출을 주위 격자의 포화 여부와 관계없이 모두 포화초과유출에 포함시켰다. 그러나 유역 내 물의 거동을 살펴볼 때, 특정지역에서 포화가 일어나 포화초과유출이 발생했다 하더라도 주위 토양이 아직 포화되지 않았다면 짧은 거리의 지표면흐름을 형성했다가 다시 토양속으로 재침투해 들어가는 것을 관찰할 수 있다(Dunne 등 1970). 이 현상을 고려하기 위해 지형지수의 통계적 분포를 사용하는 통합적(lumped)모형 대신에 이를 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형으로 변형시켰다. 이에 기반해 각 격자에서 계산된 포화초과강우 값을 누적시킬 때(주변 격자의 포화여부를 고려해서) 최종유출구까지의 포화면적의 공간적 기여를 실제적으로 고려했다.

본 연구에서는 개발된 모형과 TOPMODEL의 포화초과유출량을 비교분석하는데 주안점을 두었으며 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형으로 계산한 포화초과유출량도 함께 비교하였다. 이를 위해 건설교통부에서 관리하는 국제수문개발계획(IHP) 대상유역인 위천유역의 시간별 실측 자료를 이용하였고 Lancaster University에서 개발한 시간별 증발산량 계산 프로그램을 사용하였다. 지형인자해석은 국립지리원에서 작성한 1/5,000 지형도를 이용하였고 분석은 GIS 소프트웨어인 GRASS를 활용하였다. 지형지수계산은 다방향 흐름 알고리즘을 적용해 계산하였다.(Quinn, 1991)

* 부산대학교 환경공학과 조교수

**부산대학교 환경공학과 석사과정

2. TOPMODEL의 기본이론

본 연구에 적용된 TOPMODEL은 다음과 같은 세가지 기본 가정에 근거하여 복잡한 수문과정을 사상하고 이로부터 간명하게 개념화된 함수에 기반하고 있다. 첫째 유역 내에서의 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, 지표면 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.(Beven 외, 1996) 세 번째 가정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz)$$

여기에서 K_0 는 지표면에서의 수리학적 전도도, f 감소계수, z 지표에서 포화지점까지의 깊이이다. 또한 두 번째 가정에 의해 Darcy의 법칙을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_i = T_i(z_i) \tan \beta_i$$

여기에서 T_i 는 i 지점에서의 포화 투수계수, β_i 는 i 지점에서의 사면의 각, q_i i 지점에서의 횡방향 유출이다. 그리고 마지막으로 첫 번째 가정에 의해 위 두식은 다음과 같이 된다.

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

여기에서 R 은 지하수위로의 유입이다. 위 식으로부터 몇 차례의 수식전개를 통해 다음과 같은 TOPMODEL의 지배방정식을 유도할 수 있다. (Franchini M. 외 1996)

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

위 식에서 유역의 평균지하수면과 유역 내 임의 지점에서의 지하수면의 차는 지형지수의 평균값 λ 와 임의 지점값 $\ln\left(\frac{a_i}{\tan \beta_i}\right)$ 의 차와 전달계수(transmissivity)의 평균값 T_a 과 임의의 지점값의 차이로 표현됨을 알 수 있다. 그러나 유역 내에서 전달계수가 일정하다고 가정하면 위 식은 다음과 같이 바뀐다.

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

여기서 $\lambda^* = \lambda + \ln T_0$ 이다. z_i 값으로부터 i 지점에서의 포화지점까지의 깊이를 예측할 수 있다.

3. 포화 면적의 연결성(connectivity)

3.1 지형지수를 사용하는 두가지 모형의 형태

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(이하 TOPMODEL 통계적 입력모형)이라 한다. 이는 모든 수문학적 상태와 유동(fluxes) (예를 들어 토양 수분 함량, 지하수위, 증발산량, 지표면흐름) 이 계산시간별로 지형지수의 통계적 분포에서 얻어진 지형지수의 대표값에 의해 계산됨을 의미한다. 한편 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형(이하 TOPMODEL 분포형 입력모형)을 고려할 수 있는데 이 경우 수문학적 상태와 유동이 매 계산시간별로 각각의 격자(grid cell)에 대해 계산되어진다. 이 두가지의 모형에서 지표면흐름(subsurface flow) 양의 계산은 아래 함수를 공유함으로써 항상 동일함을 확인할 필요가 있다.

$$q_{subsurface} = \frac{K_0}{f} e^{-\lambda} e^{-fz_{wt}}$$

여기서 $\overline{z_{wt}}$ 는 지하수위까지의 평균깊이이다. 앞선 연구를 통해 TOPMODEL 통계적 입력모형과 TOPMODEL 분포형 입력모형으로 예측된 지표면흐름양이 큰 차이가 없음을 지적된 바 있기에 (Wolock D.M., 1995) 두 모형의 총유출량 예측값은 거의 같다고 볼 수 있다. 그러나 토양이용 현황을 고려한 유역내의 영양염류의 분포와 그것의 거동 혹은 토사유실을 모형화 할 때 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형이 훨씬 유용할 것임을 쉽게 짐작할 수 있다. 이 두 모형에서는 포화초과유출(saturation excess runoff)과 같은 개념으로 사용될 수 있으나 본 논문에서 제안한 연결성(connectivity)개념이 적용된 모형에서는 두 개념이 구별되어야 한다. 연결성 개념은 보다 논리적인 지표면유출량의 계산 뿐 아니라 공간적 정보를 활용하는데 유용하리라 본다.

3.2 포화격자 연결성

앞서 기술한 TOPMODEL의 두가지 형태 모두는 일단 포화초과강우가 발생한 것으로 계산되면 그 지점에서 유출지점까지의 연결성 유무와는 관계없이 총유출량에 기여하게 된다. 이는 명백히 비합리적이며 실제의 유출현상과 일치하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 하나의 방법은 포화초과강우가 발생한 지점에서부터 유출지점까지의 자연유하선상에 포화되지 않은 지역이 없을 때 비로소 그 흐름이 연결되어 있다는 점에 착안했다. TOPMODEL에서 포화여부를 결정하는 파라미터는 지형지수이므로 이는 포화초과강우가 발생한 지점의 지형지수와 같거나 큰 주변 격자들이 그 지점에서 출구지점까지 계속해서 이어짐을 의미한다. 그림 1.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. 오른쪽 지형지수지도는 각각의 격자와 그 주변 격자의 지형지수 값을 비교해 주변값 중 가장 큰 값으로 바꾸었다. 처리한 후 두 지도를 비교하며 포화초과유출이 발생한 격자의 연결성 유무를 고려해 그 양을 해당하는 흐름종류의 총량에 기여하도록 하는 지형지수의 공간적 분포를 사용하는 모형(이하 TOPMODEL 포화면적 연결모형)을 개발하였다. TOPMODEL 포화면적 연결모형은 지형지수가 실제 토양의 수분함량을

10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
10	14	<u>17</u>	14	15	15	16	16	16	16	10	10	14	<u>14</u>	14	15	15	16	16	16	10	
10	14	14	14	15	15	16	16	16	16	10	10	14	14	14	15	15	16	16	16	10	
10	15	15	15	16	15	<u>17</u>	16	16	16	10	10	10	15	15	15	15	15	<u>17</u>	16	16	10
10	15	15	15	16	15	<u>17</u>	16	16	16	10	10	10	15	15	15	15	15	<u>17</u>	16	16	10
10	14	15	15	15	15	16	<u>17</u>	<u>17</u>	10	10	10	14	15	15	15	15	16	<u>17</u>	<u>17</u>	10	10
10	14	14	14	<u>17</u>	<u>17</u>	14	14	14	10	10	10	14	14	14	<u>16</u>	<u>16</u>	14	14	14	10	10
10	14	14	<u>17</u>	14	14	14	14	14	10	10	10	14	14	<u>16</u>	14	14	14	14	14	10	10
10	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10	10	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10
10	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10	10	14	14	14	14	14	14	14	14	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

그림 1 지형지수지도자료의 처리. 왼쪽에 있는 고립된 지형지수 17값이 오른쪽에서 주변격자 중 가장 큰 값과 같이 변했다. 이로써 왼쪽 그림의 좌측 상단의 17값의 격자는 지형지수값 14가 포화되었을 때 중간 하단의 3개의 17값의 격자는 지형지수값 16이 포화되었을 때 비로서 지표수흐름에 기여하게 된다. 이전에 발생한 포화초과강우는 지표수흐름에 기여하도록 모형화했다.

정확하게 반영한다는 가정하게 적용되었다.

그러나 지형지수의 토양 수분함량에 대한 예측력은 시간적, 공간적으로 변하는 것이 밝혀졌다 (Western A.W. 외, 1999). 따라서 지형지수의 예측력의 정도가 이 방법의 한계를 결정하게 될 것이다.

4. 모형의 적용

4.1 대상유역

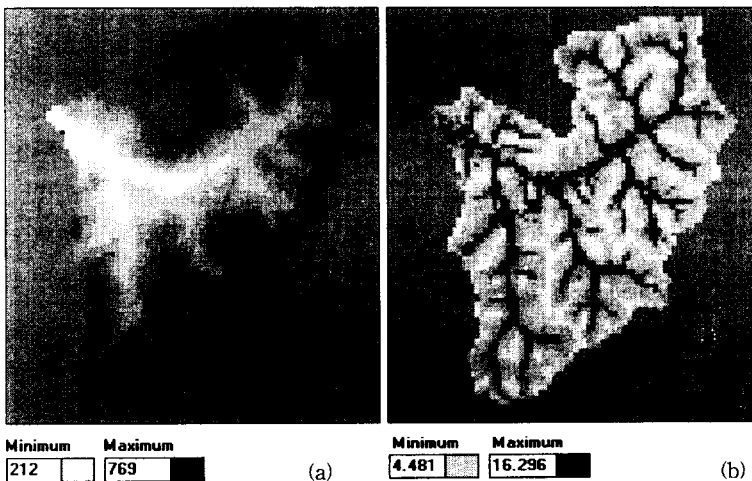
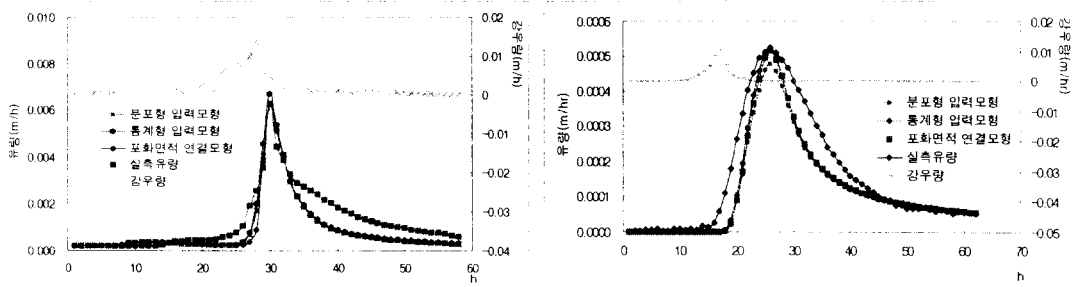


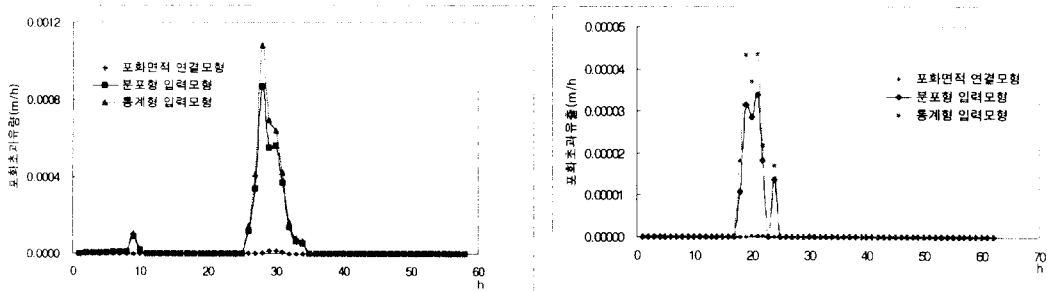
그림 2. (a) 위천 대상 유역 동곡지점의 수치지형지도(Digital Terrain Map, 100m grid size) (b) 지형지수지도

대상유역으로 건설교통부에서 설치운영하고 있는 낙동강의 위천 대표시험유역의 동곡 소유역을 선정하였다. 위천 대표시험유역의 면적은 427.525 km², 유로연장은 42.83km이며 동곡지점은 유역면적 33.6km²이고 유로연장은 8.0km이다. 본 연구에서 사용된 관측자료는 국제수문개발계획(IHP)의 일환으로 이루어진 위천 대표시험유역의 동곡관측지점의 성과이며 건설교통부의 IHP보고서에 수록된 자료를 이용하였다.



(a)

(c)



(b)

(d)

그림 3. 동국 지점에서의 3가지 모형의 적용결과 (1993.6.27~30) (a) 총유출량 비교 (b) 포화유출량 비교

그림 4. 동국 지점에서의 3가지 모형의 적용결과 (1994.5.14~16) (c) 총유출량 비교 (d) 포화유출량 비교

4.2 모형의 적용

모형 적용결과 총유출량에 대한 3가지 모형의 예측값은 거의 유사한 것으로 나타났다.(그림 3,4) 그러나 포화초과유출량의 경우 TOPMODEL 통계형 입력모형은 TOPMODEL 분포형 입력모형보다 상대적으로 많이 나타났으며 TOPMODEL 포화면적 연결모형은 미소 양만이 계산되었다.(그림 3,4) TOPMODEL 통계형 입력모형의 포화초과유출 계산량이 TOPMODEL 분포형 입력모형보다 상대적으로 많은 이유는 알고리즘의 차이에서 비롯된다고 판단된다. 즉 전자의 경우 지형지수의 통계적 분포 입력값이 계산에 참여할 때 해당등급과 그 전등급의 지형지수값에서 동시에 포화가 일어나는 경우와 해당등급에서만 포화가 일어나는 경우를 구분하나 후자는 해당 등급에 대한 고려만 되어있다. TOPMODEL 포화면적 연결모형의 포화초과유출량은 매우 작게 나타났는데 이러한 이유에 대해서 두가지 측면의 해석이 가능하다. 첫째 실제 지표면 흐름을 형성하는 강우의 양이 이처럼 작다는 것이다. 즉 해당 강우사상에서 지표흐름이 실제로 거의 발생하지 않았다고 보는 것이다. 두 번째는 지형지수지도 자체가 가지는 조직화 정도가 낮기 때문에 이러한 결과가 나온다고 볼 수 있다. 조직화 정도는 질서가 있는 정도 혹은 규칙이 있는 정도를 의미하며 조직화의 정도가 높을수록 연결성이 높아진다. 첫째 측면으로 사고할 수 있는 유일한 가능성은 지형지수를 이용해서 계산한 토양수분함량이 실제와 일치한다고 가정했을 때이다. 그러나 Western 등의 연구에 의해 습한 조건에서 지형지수의 공간적 분포에 대한 예측력은 약 50% 정도로 나타났다.(Western 외 1999) 따라서 두 번째 측면이 고려되어야 하며 본 연구과정에서 획득한 지형지수지도의 조직화는 그리 높지 않았다.

5. 결론 및 고찰

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 입력모형과 총유출량 계산에서는 차이가 미소했다. TOPMODEL 포화면적 연결모형은 다른 두 모형보다 상대적으로 미소한 포화초과유출양을 나타내었다. TOPMODEL 포화면적 연결모형은 지형지수가 실제 토양수분함량을 정확하게 예측한다는 가정하게 적용되었으나 이러한 가정은 적절치 못하다. 지형지수의 예측력이 만족스럽지 않을 뿐 아니라 지형지수지도의 조직화 정도가 높지 않았기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법론이 적용되기 위해서는 토양수분함량을 보다 정확하게 예측할 수 있는 지형지수의 개발이 요구된다.

참고문헌

- 조홍제, 조인필, 김정식(1997). "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구" 한국수자원학회논문집, Vol.30, no.5, PP515~526
- Ambrose B., Beven K.J., 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.
- Franchini M., Wendling J., Obled C., Todini E. (1996) "Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL." *J. Hydrol.*, Vol. 175. pp. 293~338.
- Western A.W., Grayson R.B., Bloschl G., 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., 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.
- Saulnier G.M., Beven K.J., Obled Charles (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.
- Wigmosta M.S., 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.
- Dunne T., 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.
- Quinn P., Beven K.J. Chevallier P., Planchon O. (1991) "The prediction of hillslope flow path for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydro. Proc.*, Vol. 5, pp. 59~79