

TOPMODEL 투수량계수 감소함수 일반화과정의 적용에 관한 연구

Application of Generalized Transmissivity Decreasing Function in TOPMODEL Operation

정 선 희* / 김 상 현**

Jung, Sun Hee / Kim, Sang Hyun

Abstract

This study investigated the applicability of generalized TOPMODEL approach which introduces the power law of decreasing transmissivity with depth instead of the traditional exponential decreasing function. The 50m digital elevation model(DEM) of Dongkog subwatershed at Wichon Test Watershed was used to perform runoff simulation. Random number generation algorithm was integrated into the calibration process for the reliable of model performance. General power law version of TOPMODEL with exponent 2 and 3 showed higher simulation efficiency than other the approaches. This results from the fact that the power law models with exponent 2 and 3 can represent the soil characteristics of study area better than other models.

Keywords: TOPMODEL, transmissivity, rainfall-runoff modeling

요 지

본 연구는 토양내에서 투수량 계수가 인직방향으로 지수함수적으로 감소한다는 TOPMODEL의 기존 가정을 일반화시킨 투수량계수의 멱급수형 감소모형의 국내지형에 대한 적용성을 검토하였다. 유출모의는 위천 대표 시험 유역의 동곡 소유역(33.6km²)을 대상으로 50m 수치지형도(Digital Elevation Model : DEM)을 사용하였다. 임의의 매개변수 결정의 신뢰성을 확보하기 위해 TOPMODEL 운영시 산정과정에 난수반생 알고리즘을 추가하여 변형된 모형의 효율성을 검토하였다. TOPMODEL 투수량계수 멱급수 감소모형의 멱급수 2와 3의 경우가 다른 멱급수들의 경우나 투수량계수 지수형 감소모형에 비해서 상대적으로 높은 모의 효율을 보였다. 이러한 결과는 유출수분포선의 감쇠곡선 부분 추정에 있어 멱급수 2와 3인 감소모형의 모의능력이 다른 모형들에 비해서 대상유역의 토양특성을 잘 반영하는데 기인한다고 판단된다.

핵심용어 : TOPMODEL, 투수량계수, 강우-유출 모형

* 부산대학교 환경공학과 석사과정

Master Student, Dept. of Envir. Engrg., Pusan National Univ., Pusan, Korea

** 부산대학교 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Envir. Engrg., Pusan National Univ., Pusan, Korea

1. 서론

TOPMODEL은 확립된 수문모형이라기 보다는 적절한 물리적 이론과 적은 수의 매개변수를 이용해서 분포된 유역반응을 모의하는데 이용되는 개념의 집합체라 할 수 있다(Beven, 1997). TOPMODEL은 공간적인 수문현상 분포에 대한 예측력은 우수하지만 지형지수의 수문학적 상사성에서 출발한 몇 가지 가정을 도입한 수문과정의 단순화에 기반을 두고 있다. 유역의 수문과정에 대한 양적 질적 이해를 위해서 수치모형의 표현 향상을 위한 유역특성을 고려한 모형구조의 변화가 가능하다(Ambroise 등 1996b). 이러한 모형구조 일반화와 관련된 최근 연구들은 기존의 TOPMODEL에 이용되어지는 지표하에서의 투수량계수의 지수형 감소 함수에 대해서 포물선형, 선형 그리고 멱급수형의 감소함수를 제안했다(Ambroise 등 1996a; Iorgulescu와 Musy, 1997). Ambroise 등은 지표하에서의 투수량계수의 포물선형과 선형적 감소를 France의 Voages 산지에 위치한 Ringelbach 유역에 적용한 바 있다(Ambroise 등 1996b). 기존의 TOPMODEL은 지표하에서 투수량계수가 지수함수적으로 감소한다는 가정에서 1차 쌍곡선 형태의 감쇠곡선을 도출하게 되는데, 이는 복잡한 특성을 가진 자연유역 기저유출 감쇠곡선을 나타내는데는 한계가 있을 수 있다(김상현 1999a). 본 연구의 대상유역인 위천지역 동곡 소유역에 대해 기존의 TOPMODEL을 적용하는데 한계가 있음을 확인할 수 있었다(김상현, 1999b).

본 연구에서는 위천지역의 동곡 소유역에 대해서 토양단면에서 투수량계수의 멱급수 감소모형 TOPMODEL을 적용해서 각 모형에 대한 효율을 기존의 TOPMODEL과 비교하였다. 그리고 기존의 모형에 Monte Carlo 모의 기법을 추가하여 다양한 매개변수 조합이 모의에 주는 영향을 종합적으로 검토하였다.

2. TOPMODEL 기본이론

지형의 형상에 기반한 물리적 근거와 비교적 적은 수의 매개변수만으로, 지리정보 시스템(GIS)을 활용해서 강우-유출 수문곡선을 예측하는 TOPMODEL은 크게 다음과 같은 4가지 가정에 기초한다.

첫째 유역내에서 사면유출의 거동이 정상상태라는 가정이고, 두 번째 지하수면의 동수경사는 지표면 경사와 같다는 가정이다. 즉, 지표하 흐름구배를 지표면 구

배 $\tan \beta$ 로 나타낼 수 있다는 것이다. 세 번째 지표하에서 투수량계수가 지수함수적으로 감소한다는 것이고, 네 번째 포화지역으로의 유입을 R이 일정하다는 가정이다.

이러한 가정들에 기반하여 수식으로 나타내면 아래와 같다.

세 번째 가정에 의해서

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \quad (1)$$

여기서 K_s 는 포화지점에서의 투수량계수, K_0 는 지표면에서의 투수량계수, f 는 감소 계수, z 는 지표에서 포화 지점까지의 깊이이다. 두 번째 가정을 Darcy의 법칙을 사용해서 나타내면 아래와 같다.

$$q_i = T_i(z_i) \tan \beta_i \quad (2)$$

여기서 T_i 는 i 지점에서의 포화 투수량계수, β_i 는 i 지점에서의 지표면 경사도, q_i 는 i 지점에서의 횡방향 유출이다. 그리고 첫 번째 가정에 의해서 식 (1)과 식 (2)는 식 (3)과 같이 정리되어 진다.

$$a_i R = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (3)$$

여기서 a_i 는 i 지점에서의 기어면적을 나타낸다. 임의 지점에서 지하수면의 깊이는 위의 가정들과 네 번째 가정 (즉, R이 일정하다는 가정)을 적용하여 수식을 전개하면 아래와 같은 TOPMODEL의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} (\lambda - \ln(a/\tan \beta)_i) + \frac{1}{f} (\ln T_0 - \ln T_e) \quad (4)$$

여기서 z_i 는 임의의 지점에서의 지하수면 깊이, \bar{z} 는 유역내의 평균지하수면의 깊이, λ 는 지형지수의 유역 내 평균값 그리고 $\ln T_e$ 는 $\ln T_0$ 의 유역 내 평균값을 나타낸다. 식 (4)에서 모양특성이 균질한 유역 내에서 T_0 는 공간적으로 일정하다고 가정하면 (Beven, 1995) 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} (\lambda - \ln(a/\tan \beta)_i) \quad (5)$$

식 (5)는 유역 내에서 임의의 지점의 지하수의 깊이를 유역평균 지하수 깊이, 지형지수의 유역평균값과 특정 지점의 차와 매개변수 f 로 나타내게 된다. 즉, TOPMODEL은 공간적 변화를 지형인자와 매개변수 f 만을 사용해서 나타낼 수 있다.

3. TOPMODEL 투수량계수 감소함수의 일반화 이론

토양내의 연직방향의 투수량계수 감소는 기반암과 토양의 특성에 따라서 결정되어진다. 기존의 TOPMODEL은 이러한 투수량계수가 토양단면 내에서 연직방향으로 지수함수적으로 감소한다는 가정 하에서 출발하며, 지형지수와 기저유출, 유출량 계산도 이러한 가정 하에 수행되어진다. Iorgulescu와 Musy가 제안한 맥급수형은 O'Loughlin이 제안한 토양내 투수량계수의 선형적 감소와 Ambrose등이 제안한 포물선형적 감소를 포함하는 형태라 할 수 있다 (O'Loughlin, 1986). 투수량계수의 맥급수형 감소모형은 유역의 토양과 기반암의 특성에 따라서 맥급수를 변화시킴으로써 지형적 특수성을 반영할 수 있는 형태이다. 맥급수형에서의 투수량계수 변화는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$T_i = T_0(1 - fz_i)^n \quad (6)$$

여기서 n 은 유역의 특성에 맞게 변화시켜줄 수 있는 맥급수로서, $n=1$ 이면 Iorgulescu가 제안한 선형적 감소이고, $n=2$ 이면 Ambrose 등이 제안한 포물선형 감소함수가 된다.

유역내의 임의의 지점에서의 횡방향 유출량은

$$a_i R = T_0 \tan \beta_i (1 - D_i/M)^n \quad (7)$$

여기서 D_i 는 임의지점에서의 포화 저장부축량이고, M 은 침투층의 최대 증력저장량을 나타내는 것으로 맥급수형에서는 지수형과 달리 유한한 값을 가진다. $fz_i = D_i/M = \delta_i$ 의 관계가 성립한다(Ambrose 등, 1996a; Iorgulescu, 1997; Wolock, 1993). δ_i 는 임의지점에서의 상대 저장부축량을 나타낸다. 맥급수형에서 유역 평균 포화 저장부축량과 임의의 지점에서의 상대적 저장부축량의 관계를 나타내면 다음과 같다(Iorgulescu 등, 1997).

$$(1 - D_i/M)/(1 - D/M) = G_i/\gamma, \quad (8)$$

$$G_i = (a_i/(\tan \beta_i T_0))^{1/n}$$

여기서 G_i 는 유역 내 임의지점에서의 맥급수형 지형지수를 나타내고, γ 는 맥급수형 지형지수의 유역전체의 평균값을 나타낸다. 포화지역으로부터의 총 유출량은 하천으로 유입되는 기저유출의 합으로부터 구할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면

$$Q_b = Q_0(1 - \bar{\delta})^n \quad (9)$$

$$Q_0 = A(\gamma_n)^{-n} \quad (10)$$

로 평균 상대 저장부축량, $\bar{\delta}$, 이 0일 때의 유출을 나타내고, Q_b 는 포화지역의 총 기저유출량, A 는 상부 사면 누가 면적의 합이다.

총 기저유출량을 보존법칙을 사용해서 나타내면 아래와 같이 나타낼 수 있다(Ambrose 등, 1996a).

$$Q_b = AM \frac{d\bar{\delta}}{dt} \quad (11)$$

그러고 chain rule을 사용해서 $d\bar{\delta}/dt$ 를 나타내면

$$\frac{d\bar{\delta}}{dt} = \frac{d\bar{\delta}}{dQ_b} \cdot \frac{dQ_b}{dt} \quad (12)$$

와 같다. 식 (11)과 식 (12)를 이용해서 단위시간당 기저유출량을 단위 저수부축량에 대한 값으로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{dQ_b}{dt} = \frac{Q_b}{AM} \frac{dQ_b}{d\bar{\delta}} \quad (13)$$

식 (9)를 $\bar{\delta}$ 에 대해서 미분정리하여 식 (13)에 대입하면 아래의 (14)식과 같다.

$$\frac{dQ_b}{dt} = -n \frac{\sqrt[n]{Q_b}}{AM} Q_b^{\frac{(2n-1)}{n}} \quad (14)$$

Brutsaert와 Nieber는 식 (14)를 간략화해서 식 (15)를 제안했다(Brutsaert 등, 1977).

$$\frac{dQ_b}{dt} = -aQ_b^B \quad (15)$$

여기서 매개변수 $a = -n \frac{\sqrt[n]{Q_0}}{AM}$ 이고 $B = \frac{(2n-1)}{n}$

이다. 식 (15)를 지체시간에 대해서 적분하면 각 먹급수(n)에 대한 기저유출 감쇠곡선식을 얻을 수 있다.

Ambrose 등이 제안한 토양 내에서 연직방향으로 투수량계수의 선형적 감소와 포물선형 감소는 먹급수형의 식에서 각각 $n=1$ 과 $n=2$ 인 경우이다. 선형적 감소에서의 투수량계수는 $T_i = T_0(1 - \delta_i)$, 포물선형 감소의 경우는 $T_i = T_0(1 - \delta_i)^2$ 로 나타내어진다. 이들 투수량계수를 나타내는 식으로부터 포화지역으로부터의 총 유출량은 아래와 같이 구할 수 있다.

○ 포물선형 감소인 경우,

$$\frac{dQ_b}{dt} = -2 \frac{\sqrt{Q_0} Q_b^{\frac{3}{2}}}{AM} \quad (16)$$

○ 선형 감소인 경우,

$$\frac{dQ_b}{dt} = - \frac{Q_0 Q_b}{AM} \quad (17)$$

4. 토양내 단면에서의 먹급수형 투수량계수 감소의 적용

대상유역은 국제수문개발계획(IHP) 대상유역중의 하나인 위천 대표시험유역의 동곡 소유역으로 유역면적 33.6km², 유로연장 8.0km이고, 고도는 212m-769m, 경사도는 0-15%가 10%, 15-30%가 22.3%, 30% 이상이 67.8%로 지형경사는 급한 편이다. 연평균강우량은 약 1070mm이고, 인평균 증발량은 약 650mm이다. 유역의 대부분은 산림지역이고 하천을 따라 논과 밭이 분포하는 보편적 우리나라의 토지이용상태를 보여준다고 할 수 있겠다. 수치지형지도는 GIS 소프트웨어인 GRASS (USCERL, 1991)를 활용하여 국립지리원에서 작성한 1:25,000 지형도를 분석하여 획득하였다. 수치지형 지도로부터 다방향 흐름 (Multiple Flow Direction) 알고리즘을 적용해서 지형지수를 계산했다. TOPMODEL의 일반화과정의 적용성 검토에 사용되어진 격자의 크기는 50m이고, DEM은 176개의 행과 156개의 열로 구성되어 있다. 동곡소유역의 수치지형도를 그림 1에 나타내었다.

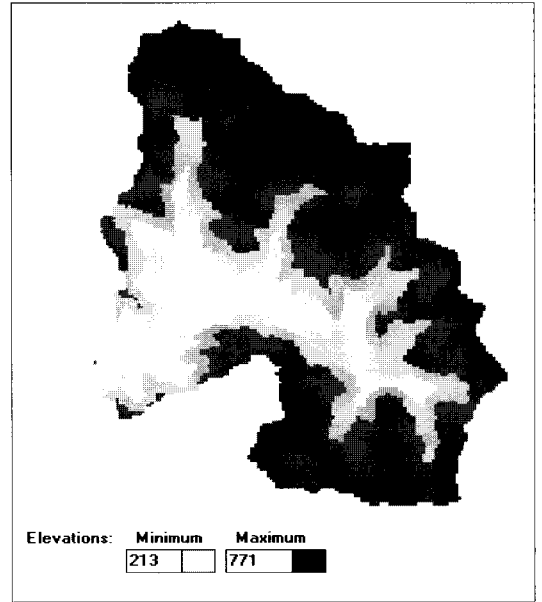


그림 1. 동곡 소유역의 수치지형도(50m DEM)

국제수문개발계획(IHP)연구보고서의 관측자료 중에서 신뢰성이 있다고 판단되어지는 6개의 강우사상에 대해서 투수량계수의 지수함수적 감소형과 먹급수형 감소모형에 대해 유출을 모의하였다(건설교통부, 1992-1998). 모의에 사용되어진 각각의 강우사상에 대한 선행강우상태를 개략적으로 설명하면, 92년 7월 15일 강우사상은 15일 이전에 5일 동안 약 150mm의 강우가 있었고, 92년 8월 11일 강우사상과 93년 6월 27일 강우사상의 경우는 6일 동안 50-60mm 정도의 강우가 계속되었다. 92년 8월 24일 강우사상은 23일에 1.5mm의 소량의 강우가 있었고, 97년 5월 12일 강우사상은 4일 전에 41mm의 강우가 있었으며, 98년 8월 15일 강우사상의 경우는 8월 15일 이전까지 8월 동안 지속적으로 강우가 존재했었다. 먹급수형 감소모형에서는 먹급수를 2, 3, 4, 5로 변화시키며 동곡 소유역의 유출특성을 가장 잘 기술할 수 있는 먹급수를 찾았다. 지형지수는 각 먹급수에 대해서 식 (8)의 n에 2, 3, 4, 5를 대입한 형태인 먹급수 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 지형지수를 별도로 계산하였다.

TOPMODEL의 적용은 유출모의를 최적화하기 위해서 매개변수의 보정을 필요로 한다. 매개변수 보정과정에서의 신뢰성 향상을 위해 기존의 TOPMODEL에 Monte Carlo 모의함수를 추가하여 난수를 발생시키

게 했다(Press 등, 1992). 발생된 임의의 매개변수 대해서 각각 유출을 모의하고, 효율을 Nash와 Sutcliffe의 효율계수 식 (18)을 이용해서 계산했다(Nash와 Sutcliffe, 1970).

$$E (\%) = \left[1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \times 100 \quad (18)$$

여기서 O_i 는 i 번째 관측치, P_i 는 i 번째 모의치, 그리고 \bar{O} 는 관측치의 평균이다. 사용된 매개변수들은 토양 단면 내에서의 투수량계수 감소형태의 변화에 의한 영향만을 보기 위해서 각 강우사상에 대해서는 일정한 범위의 것을 사용하였다. 97년 5월 12일 강우사상에 대해서는 모의결과가 수렴하지 않아서 맥급수 5인 경우는 범위를 조정하였다.

그림 2는 통곡 소유역에 대한 각 맥급수에 대한 지형지수 지도와 지수형 지형지수의 분포이다. 각각의 분포는 최대값과 최소값을 15개의 색상으로 분류해서 나타내었다. 각 지형지수 지도에서 흰색이 높은 지형지수를 나타내고 색상이 짙어질수록 지형지수의 값이 작아진다. 그림 2의 지수형 지형지수 분포도에서는 지형지수 변화양상이 완만하지만, 맥급수형에서는 지형지수의 변화가 급하다. 그리고 맥급수형 지형지수 분포에서 맥급수가 커질수록 지형지수가 큰 값이 많이 분포하고, 지수형과 맥급수형을 비교하였을 때 지수형에 비해서 맥급수 형이 작은 지형지수가 많음을 보여주고 있다. 이러한 맥급수형 지형지수 분포는 우리나라 저평 사면의 경사가 급하여 하천부근의 일부 지역에서만 직접유출현상이 발생하며, 지역의 유출현상을 잘 기술할 것으로 판단된다. 특히, 맥급수가 2와 3인 경우에 지형지수의 변화가 급격한데, 이는 유출모의 결과의 효율이 맥급수가 2인 경우와 3인 경우에 가장 높은 것에서도 확인될 수 있다.

그림 3은 국제수문개발계획(IHP) 시험유역의 강우유출 사상 중 신뢰할 만한 여섯 가지 강우사상의 투수량계수 감소함수 인반화 모형들의 최대효율도출의 적용결과를 보여주고 있다. 전반적으로 모든 형태의 모형이 강우유출사상을 적절히 기술하고 있으나 기저유출 감소곡선 부분의 각 모형에 따른 현격한 차이는 도출되지 않았다. 이는 최대모의 효율 도출이 관측치와 모의치 사이의 침투유량 일치에 많은 영향을 받기 때문인 것으로 분석된다. 포화초과유출에서 기인되는 지표

면유출이 침투유량에 기여하는 바를 보다 합리적으로 반영하기 위한 과정들은(Sauliner, 1997 ; Wigmosta, 1999) 합리적 침투유량 산정에 일정기여를 하고 최대 모의 효율의 매개변수조합에 영향을 줄 것으로 판단된다.

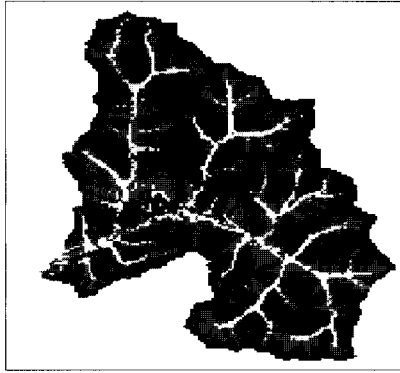
그림 4는 93년 6월 27일 강우사상에서 침투유량이 관측치와 유사하게 모의된 맥급수 감소모형의 예측치를 나타내었다. 그림 4 에서 보면 맥급수 2와 3인 경우의 감소곡선이 관측치와 유사하게 모의되고 있음을 관찰할 수 있다.

표 1에서는 난수발생에 의해 계산되어진 각각의 모형에 대한 최대효율을 정리하였다. 각 모형에 대해서 최대효율은 강우사상에 따라서 다소간의 차이는 있지만 모형별 차이는 극소하다. 매개변수 산정에 난수발생 알고리즘을 추가하여 얻어진 표 1의 결과는 모형구조의 변동성이 구현할 수 있는 수분학적 현상이 강우사상별 변화성을 완전 재현하는데 한계가 있음을 보여준다. 이는 침투유량 산정을 위한 모형구조의 불확실성과 사용된 수문학적 자료들의 불확실성에서 기인한 것으로 판단된다. 표 2는 각 강우사상에 대한 주요 매개변수들의 최대값과 최소값은 보다 성공적인 모의의 실행을 통한 각 모형의 성능을 비교하기 위해 시행착오 범위로 구해진 값들이다. 여기서 root zone storage는 차단과 증발에 의한 함수로서 강우가 지표로 침투되기 전에 감소되는 양이라고 할 수 있다.

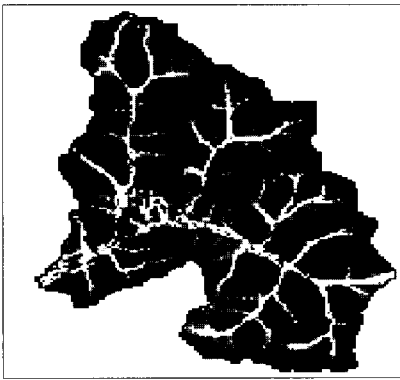
표 3은 6개의 강우사상에 대한 일정 범위 이상의 효율을 나타내는 난수의 개수를 전체 난수발생 개수의 비율로 나타내었다. 표 3에 나타낸 비율은 92년 8월 24일 강우사상을 제외한 나머지 강우사상들은 효율이 70% 이상인 것들의 값이다. 92년 8월 24일 강우사상은 효율이 50% 이상인 것의 비율이다. 97년 5월 12일 강우사상의 경우 표 2의 매개변수들을 적용했을 때, 결과가 수렴하지 않아 매개변수들의 범위를 조정한 결과이다. 표 1과 그림 2에서 볼 때 전체적으로는 지수형보다는 맥급수형이 최대효율이 높고, 또 특정 효율(70% 또는 50%)이상인 경우도 많이 나타난다. 특히, n=2인 경우와 n=3인 경우에 있어서 다른 맥급수 감소모형보다 강우사상에 관계없이 비율이 높게 나타나고 있다.

5. 토 의

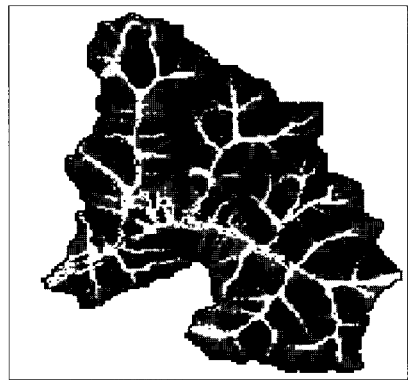
Ambrose 등은 포물선형 감소모형을 기반암이 화강암시대인 지역에 적용한 바 있다(Ambrose 등,



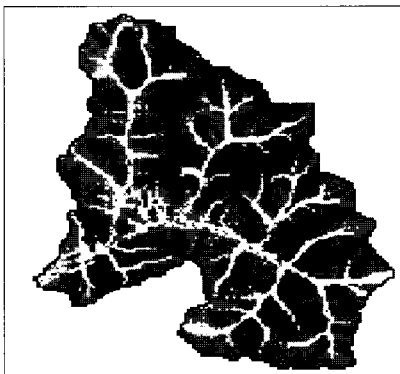
(a) 지수형
(최대값 : 17.6242, 최소값 : 3.8579)



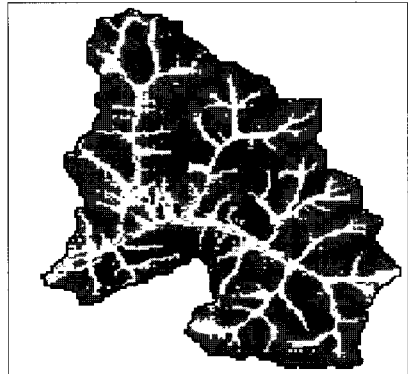
(b) 먹금수 n=2
(최대값 : 10943.94, 최소값 : 0.366)



(c) 먹금수 n=3
(최대값 : 492.92, 최소값 : 0.511)

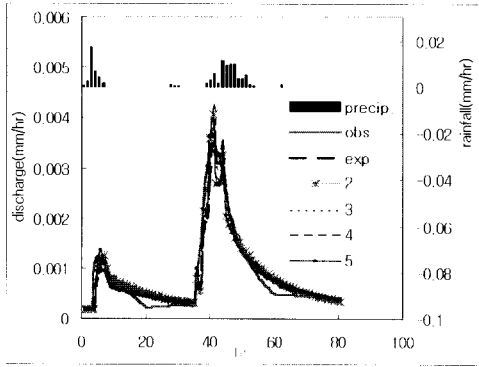


(d) 먹금수 n=4
(최대값 : 104.61, 최소값 : 0.6047)

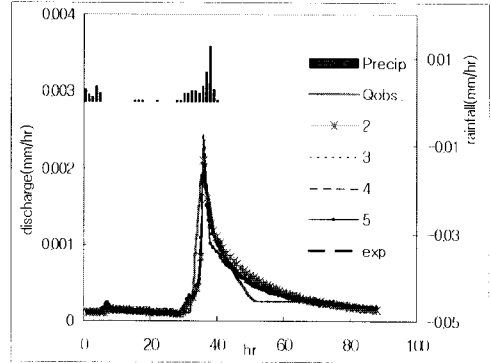


(e) 먹금수 n=5
(최대값 : 41.27, 최소값 : 0.6687)

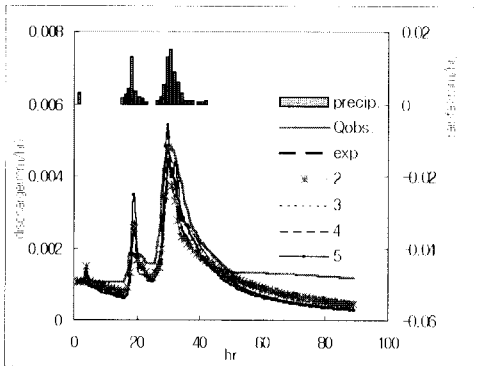
그림 2. 동곡 소유역의 지수형 지형지수와 먹금수형 지형지수의 분포도



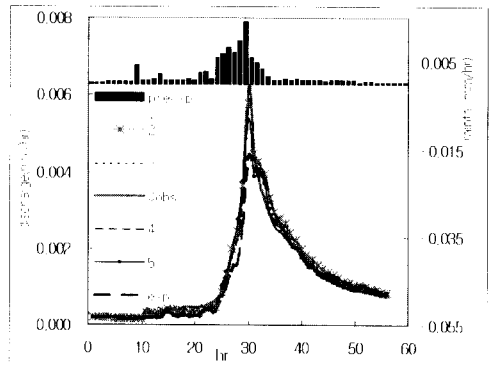
(a) 92년 7월 15일



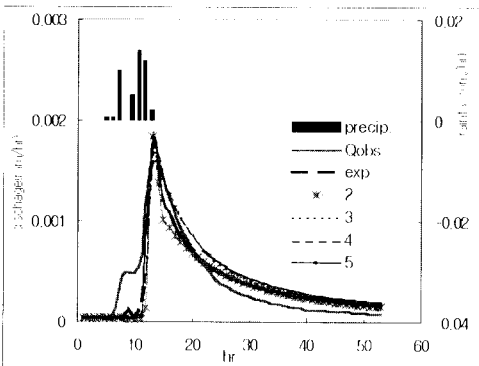
(b) 92년 8월 11일



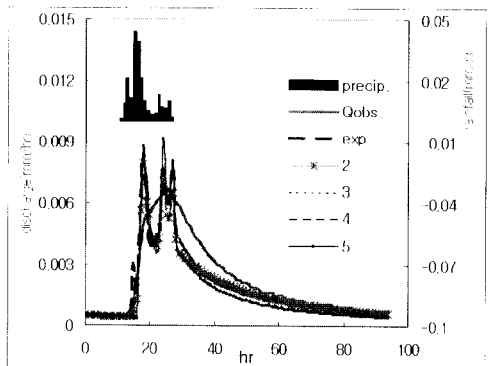
(c) 92년 8월 24일



(d) 93년 6월 27일



(e) 97년 5월 12일



(f) 98년 8월 15일

그림 3. 여러 강우사상에 대한 투수계수의 지수형 감소모형과 먹금수형 감소모형의 적용 결과 (exp는 지수형 감소 모형, 2, 3, 4, 5는 먹금수형 감소모형의 먹금수, Qobs는 관측된 유량, precip.는 강우량)

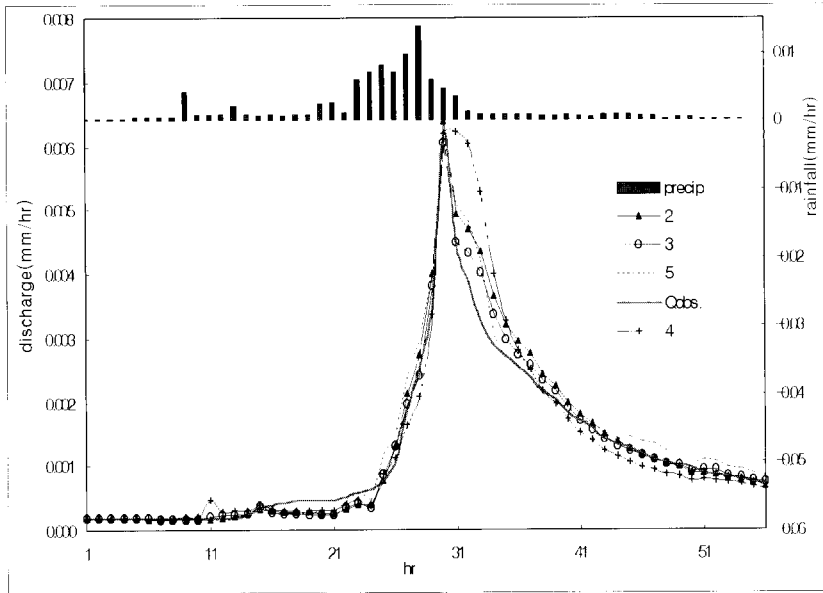


그림 4. 각 모형들을 적용한 감쇠곡선의 비교(93/06/27)

표 1. 강우사상별 유출모형별 모의효율

날짜 \ 감소모형	지수형	막급수형 (n=2)	막급수형 (n=3)	막급수형 (n=3)	막급수형 (n=3)
92/07/15	0.912	0.905	0.900	0.911	0.919
92/08/11	0.821	0.791	0.815	0.820	0.823
92/08/24	0.627	0.571	0.570	0.549	0.509
93/06/27	0.924	0.978	0.986	0.984	0.974
97/05/12	0.840	0.678	0.757	0.744	0.825
98/08/15	0.778	0.806	0.740	0.762	0.668

표 2. 각 강우사상별 주요매개변수의 최대값과 최소값

		92/07/15	92/08/11	92/08/24	93/06/27	97/05/12	97/05/12*	98/08/15
SZM	최대값	0.08	0.09	0.12	0.12	0.12	0.08	0.3
	최소값	0.007	0.005	0.006	0.009	0.06	0.06	0.02
TD	최대값	40	40	90	30	90	40	65
	최소값	5	5	4	3	4	5	3
SRMAX	최대값	0.03	0.09	0.009	0.002	0.009	0.04	.07
	최소값	0.003	0.03	0.003	0.00008	0.003	0.02	.002
SRO	최대값	0.02	0.009	0.02	0.099	0.02	0.005	0.075
	최소값	0.003	0.003	0.0003	0.0009	0.003	0.003	0.003

05/12/97: 막급수 2, 3, 4인 경우에 적용된 매개변수,
SZM: 매개변수 m 에 해당하므로 유효저장 용량,
SRMAX: root zone storage의 최대값,

05/12/97: 막급수 $n=5$ 에 적용된 조정된 매개변수
TD: 단위 부족량에 대한 지연시간
SRO: root zone storage의 초기값

표 3. 강우사상별 유추모형별 Monte Carlo Simulation 모의효율
(일정모의효율이상의 모의 개수 / 전체 모의 개수)

효율 \ 강우사상	92/07/15	92/08/11	92/08/24	93/06/27	97/05/12	98/08/15
지수형 감소	71/500	29/500	41/500	42/500	6/500	46/500
떡급수형 감소 (n=2)	356/500	173/500	62/500	425/500	0/500	224/500
떡급수형 감소 (n=3)	222/500	230/500	87/500	364/500	71/500	222/500
떡급수형 감소 (n=4)	90/500	205/500	35/500	314/500	31/500	204/500
떡급수형 감소 (n=5)	103/500	135/500	1/500	283/500	85/500	82/500

* : 조정된 매개변수를 적용한 결과

1996b). 본 연구의 대상유역인 위천유역은 기반암이 퇴적암 지대이다(장기홍 등, 1981). 본 연구의 결과 기반암이 퇴적암지대인 경우에도 투수량계수의 떡급수형이 수문현상을 잘 기술할 수 있음을 보여준다. 표토층의 깊이는 기반암의 종류와 특징에 관계없이 유역 경사도에 의해 결정되어지고, 기반암의 특징에 의해서 영향을 받지 않는다. 퇴적작용에 의해 형성된 표토층에서의 투수량계수는 기반암의 성질에 기인하기보다는 입도와 분급 그리고 입자의 통극기에 의해서 결정되어지기 때문에 사료된다. 따라서 기반암의 종류와 성질이 분산형모형의 투수계수 감소함수에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

투수량계수의 떡급수 감소모형을 Wigmosta와 Ambroise가 각각 Mehantango Creek과 Rigelbach 유역에 적용한 바 있다(Wigmosta, 1999 ; Ambroise, 1996a). Wigmosta는 배수면적이 7.2km², 경사도는 0%-20%, 고도는 215m에서 500m인 유역에 30m DEM을 사용하여 통계적-유체적 모델과 수치해석(외삽법)을 비교하였는데, 보정을 하지 않았을 때는 떡급수 4에서 8까지가 오차가 가장 작고, 결과에 대해서 외삽법 보정을 행하는 경우에는 떡급수가 1인 경우에 오차가 가장 작음을 밝혔다. Ambroise는 고도가 748m에서 1000m이고, 경사가 평균 20°이고 최대 35°인 Ringelbach 유역에 대해서 투수량

계수의 지수형, 포물선형, 선형 감소모형을 적용하였다. 적용결과에는 포물선형에 효율이 가장 높게 나타나고, 최적화를 행하는 경우에는 지수형과 포물선형에 대한 효율은 거의 비슷하지만, 대수유량에 대한 효율은 포물선형이 우수하다는 결과를 밝혔다. 각 유역의 특성에 따라서 최적의 떡급수는 다르지만 Wigmosta와 Ambroise의 결과에서는 떡급수형이 지수형보다는 토양 내 투수량계수의 분포를 보다 적절하게 기술한다고 할 수 있겠다.

본 연구의 경우 효율의 최대값은 각각의 강우사상에 대해서 토양단면에서 투수량계수 감소함수의 변화에 관계없이 거의 비슷하다. 그러나, 난수를 발생시켜 가면서 광범위한 매개변수의 조합이 모형의 거동에 미치는 영향을 검토하면, 떡급수 n=2와 떡급수 n=3인 경우에 효율이 70% 또는 50%이상인 비율이 높다. 특히, 지수형 감소곡선의 형태에 비해서는 떡급수 감소곡선의 형태의 적정모의 비율이 월등히 높음을 발견할 수가 있다.

떡급수형의 지형인자는 지수형에 비해서 그 분포범위가 넓다. 그리고, 지수형에 비해서 분포에서 크게 벗어나 있는 극한치가 존재한다. 이와 같은 극한치의 존재는 모형의 보정 과정에 부정적인 영향을 미치므로 본 연구에서는 3%에 해당하는 극한치를 실제 유출량 계산에는 포함시키지 않았다. 임의로 배제시킨 지형지

표 4. 지수형 지형지수와 떡급수형(n=2, 3, 4, 5) 지형지수 분포의 평균, 분산, 왜곡도

	지수형	떡급수 (n=2)	떡급수 (n=3)	떡급수 (n=4)	떡급수 (n=5)
평균	6.790	42.812	11.077	5.981	4.077
분산	3.992	3584.047	78.058	13.599	3.746
왜곡도	1.421	2.800	1.944	1.671	1.283

표 5. 토양단면에서 지수형과 먹급수형 투수량계수 감소모형에 사용된 지형지수의 최대값과 최소값

	지수형	먹급수형 (n=2)	먹급수형 (n=3)	먹급수형 (n=4)	먹급수형 (n=5)
지형지수 최대값	17.62	10943.94	492.92	104.61	41.27
지형지수 최소값	3.858	0.366	0.511	0.605	0.669

수는 강우초기에 유출량에 기여하는 것으로 이들의 효과를 검토해 보았다. 먹급수 3, 4와 5에 대해서 배제시킨 비율이 작아질수록 강우초기의 유출량의 값이 적은 쪽으로 증가함을 확인하였다. 이는 매개변수 보정과정에 중요한 영향을 주는 요소로 국소수 국한지에 의해서 전체의 유출 과정에 대한 매개변수가 변화됨을 의미한다. 이들 국한지의 지형인자들이 가지는 수분학적 설명은 강우유출시 발생하는 수로의 형성으로 기술될 수 있고 수로격자의 사면유출 계산과정에서 배제에 대한 긍정적 효과도 검토된 바 있다(Saulnier 등, 1997).

먹급수형의 경우 특히, 먹급수가 2와 3인 경우는 최대 지형지수가 각각 10943.94와 492.92로 매우 크다(표 5 참고). 그러나, 전체의 90%에 해당하는 지형지수가 각각 90과 24보다 작은 범위에서 분포한다. 기존의 TOPMODEL에서 사용하는 지수형 지형지수에서는 지형지수의 분포범위가 넓지 않아서 지형지수를 나누는 구간의 개수가 유출모의에 크게 영향을 주진 않지만, 먹급수형의 경우에는 특히, 먹급수가 2와 3인 경우는 그 분포범위가 넓어서 구간의 구분 개수가 예측력에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 이는 소수 국한치를 계산과정에서 제외시킴으로 발생하는 문제를 완화시킬 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 기반암이 퇴적암으로 형성되어진 위천지역의 동곡 소유역에 대한 Iorghulescu와 Musy가 제안한 토양내에서 투수량계수의 먹급수형 감소 모형을 적용하였다.

(1) 경사가 급한 국내의 산지지형에 대한 토양단면에서 최적의 투수량계수의 감소 형태를 찾고자 하는 과정에서 유출모의 결과 투수량계수의 먹급수형 감소는 강우사상에 따라 다소의 차이는 있지만 지수형 감소 못지않게 예측력이 뛰어나고, 특히 먹급수 2와 먹급수 3인 경우에 모의효율이 높은 것으로 나타났다.

(2) 난수발생기법을 활용한 모형기동의 광범위한 검토도 실시되었고, TOPMODEL 일반화 과정의 국내

산지유역 적용과정에서 유출 모의시 활용될 수 있는 매개변수들의 범위를 제시하였다.

참 고 문 헌

- 김상현 (1999a). "TOPMODEL의 이해" 한국수자원학회지, 한국수자원학회 Vol. 32, No. 2, pp. 30-33.
- 김상현, 이지영 (1999b). "개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구" 한국수자원학회지, 한국수자원학회 Vol. 32, No. 4, pp. 489-499.
- 건설교통부 (1992-1998). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서.
- 장기홍, 이윤종, 박병권 (1981). "균위도폭 및 설명서", 1981년 한국지질도, 한국 동력 자원 연구소
- Ambroise B., Freer J. and Beven K., (1996a). "Application of a generalized TOPMODEL to the small Rigelbach catchment, Vosges, France." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp. 2147-2159.
- Ambroise B., Freer J. and Beven K., (1996b). "Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 7, pp. 2134-2145.
- Beven, K. J., Lamb R., Quinn P., Rominowicz R. and Freer J. (1995). *TOPMODEL, Computer Model of Watershed Hydrology*, edited by V. P. Singh, Water Resour. Publications, pp. 627-668.
- Beven, K. J. (1997). "TOPMODEL : A CRITIQUE." *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp. 1069-1085.
- Brutsaert, W. and Nieber J. L. (1977). "Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau." *Water Resour. Res.*, Vol. 13, pp. 637-643.
- Iorghulescu I. and Musy A. (1997).

- "Generalization of TOPMODEL for a power law transmissivity profile." *Hydrol. Proce.*, Vol. 11, pp. 1353-1355.
- Nash, J. E., and Sutcliffe J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion for principles." *J. of Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
- O'Loughlin E. M. (1986). "Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic analysis." *Water Resour. Res.*, Vol. 22, pp. 794-804.
- Press, William H., Teukolsky Saul A., Vetterling William T. and Flannery B. P. (1992). *Numerical Recipes in fortran second edition*, pp. 266-277, Cambridge University Press.
- 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
- Quinn, P. F., Beven K. J. and Lamb R. (1995). "The $\ln(a/\tan B)$ index: How to Calculate it and How to Use it Within the TOPMODEL Framework." *Hyorol. Proce.*, Vol. 9, pp. 161-182.
- Saulnier G. M., Beven K. J. and Oblet C. (1997). "Digital Elevation Analysis for Distributed Hydrological Modelling : Reducing Scale Dependence in Effective Hydraulic Conductivity Values" *Water Resour. Res.*, Vol. 33, No. 9, pp. 2097-2101.
- USACERL (1991) *GRASS4.0 User's Reference Manual*.
- Wigmosta M. S., Lettenmaier D. P. (1999). "A comparison of simplified method for routing topographically driven subsurface flow" *Water Resour. Res.*, Vol. 135, No. 1, pp. 255-264.
- Wolock D. M. (1993). "Simulation the Variable-Source Area concept of Streamflow Generation with the Watershed Model TOPMODEL" *U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*.

(국문번호:99-066/접수:1999.08.27/심사완료:1999.09.27)