

급사면에 형성된 일시적 포화대의 지하수면깊이에 대한 TOPMODEL의 예측능력 검증

Test for the TOPMODEL's Ability to Predict Water Table Depths of the Transient Saturation Zones which Are Formed on the Steep Hillslope

안 중 기*

An, Jung Gi

Abstract

In order to evaluate the TOPMODEL's prediction ability for spatial distribution of water table depths, two major assumptions and governing equation of water table depth are tested. For the test, data of hydrological observations are used and a soil survey is made in the steep hillslope with thin soils. Responses of water table and hydraulic properties of soil are coincident with two major assumptions of the TOPMODEL's such as water table gradient parallel to the local topographical slope and exponential decline in transmissivity with depths. Soil texture and the decline rate of transmissivity(f) are homogeneous in space at the 0~0.3m depths of the soil of the hillslope, but they are heterogeneous in space below its 0.3m depths due to the vertical change of soil texture and the ' f '. It is shown that the TOPMODEL's equation can be used for simulating distribution of water table depth at the depths with uniform values of the ' f '.

Keyword : TOPMODEL, water table depth, test of assumptions and governing equation, the decline rate of transmissivity

요 지

TOPMODEL의 지하수면깊이 분포에 대한 예측능력을 평가하기 위해 2개 기본가정과 지하수면깊이에 대한 지배방정식을 검증하였다. 검증에는 토양두께가 얇은 급경사 사면의 수문관측과 토양조사 자료를 이용하였다. 조사사면에서 지하수면반응과 토양의 수리적 특성은 지형경사와 평행하는 수리경사, 지하수면깊이에 지수함수적으로 감소하는 투수량계수 등과 같은 TOPMODEL의 기본가정과 일치하였다. 토양의 투수량계수감소율(f)과 토성은 지표부터 깊이 0.3m까지 사면전체에서 공간적으로 균질하지만, 토성과 f 의 수직적인 변화로 깊이 0.3m 아래부터 공간적으로 불균질한 특성을 보인다. 조사사면에서 TOPMODEL의 지배방정식은 f 값이 공간적으로 균질한 깊이의 지하수면깊이 분포를 예측하는데 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : TOPMODEL, 지하수면깊이, 가정과 지배방정식검증, 투수량계수감소율

* 농업기반공사 제주도본부 환경지질부 계장

Subsection Chief, Dept. of Environmental Geology, KARICO Jeju Province Office, 2127 1, Samyang-dong, Jeju-city, Jeju do, Korea

(E mail : angro40@hanmail.net)

1. 서론

TOPMODEL은 분포 또는 반분포방식으로 유역의 수문반응, 특히 지표유출이나 중간류유출(subsurface flow) 기여지역의 거동을 모의할 수 있는 개념적 도구이다(Beven 등, 1995). 이 모델을 온대습윤지역의 유역에 적용한 결과 하천유출 모의능력이 우수하다는 외국의 연구결과가 많이 발표되었으며(Beven 등, 1984; Robson 등, 1993; Franks 등, 1998; Cameron 등, 1999), 우리나라에서도 유역유출모의에 적합하다는 연구결과들이 발표되고 있다(조홍제 등, 1997; 조홍제와 조인율, 1998; 김상현과 김경현, 1999; 조홍제 등, 2000; 이학수 등, 2001; 이학수 등 2002).

이와 같이 TOPMODEL의 유역유출모의 능력에 대한 검증연구들은 많지만 유역내의 토양수분이나 지하수면깊이(지하수위)의 공간적 분포에 대한 모의결과를 관측자료로 검증한 연구는 Moor와 Thompson (1996), Lamb 등(1997), Seibert 등(1997), Lamb 등(2001), 김진훈 등(2002) 등의 연구가 있을 뿐 비교적 적은 편이다. TOPMODEL은 강우에 의한 지하수면깊이 변화로부터 지표유출과 중간류유출 발생을 비교적 적은 수의 매개변수로 모의하는 수문모형을 유역유출의 공간적 분포에 대한 검증은 이 수문모형을 유역유출에 측 외에 토양수분의 공간적 분포 예측, 유역유출의 성분 분리, 수질예측 등에 적용하기 위해서 반드시 필요한 절차라고 할 수 있다. 이런 검증 연구가 부족한 것은 강수량과 하천유출 관측자료는 쉽게 이용할 수 있는 반면 지하수면깊이 변화를 검증할 적당한 관측자료가 드물기 때문이다(Lamb 등, 2001). 우리나라에서도 강수량-유역유출 관측자료는 많이 있지만 유역내부의 수문현상에 대한 관측자료가 적기 때문에 TOPMODEL에서 제시한 지하수면깊이변화, 지표유출, 중간류유출 발생 등과 같은 수문학적 거동을 검증하지 못하고 있다.

본 연구에서는 토양두께가 얇은 급경사 사면의 토양 조사자료와 지하수면깊이, 중간류유출 관측자료를 이용하여 TOPMODEL의 지하수면깊이 분포에 대한 예측능력을 검토하였다. 먼저 사면의 수문반응과 토양특성 모델의 기본가정과 일치여부를 검증하여 조사사면에 모델의 적용가능여부를 분석하였고, 다음으로 TOPMODEL의 지하수면깊이에 대한 지배방정식을 관측자료로 검증하여 지하수면분포에 대한 예측능력을 검토하였다.

2. TOPMODEL의 기본이론

TOPMODEL은 사면(유역)유출과정을 다음과 같은 3가지 가정에 근거하여 모의하는 수문모형이다. 첫째, 포화대의 지하수면 변화는 단위면적당 균일한 중간류유출 발생으로(또는 공간적으로 균일한 지하수함양에 의한 연속적인 안정상태로) 개략화하여 나타낼 수 있다(A1). 둘째, 포화대의 수리경사는 국지적인 지표면의 지형경사로 개략화할 수 있다(A2). 셋째, 사면하류방향의 투수량계수는 지하수면깊이에 지수함수적으로 감소한다(A3). 세 번째 가정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T = T_0 \exp(-fz) \quad (1)$$

여기서 f 는 투수량계수감소율(m^{-1}), T_0 는 지표포화투수량계수(m^2/h), z 는 국지적인 지하수면깊이(m), T 는 지하수면깊이 z 에서의 투수량계수(m^2/h)이다.

수리경사와 포화흐름에 대한 두 번째 가정에 의해 사면상의 i 지점에서 단위등고선길이당 중간류유출율 $q_i(m^2/h)$ 는 다음과 같다.

$$q_i = T_{0i} \tan\beta \exp(-fz_i) \quad (2)$$

여기서 T_{0i} , β , z_i 는 각각 i 지점의 지표포화투수량계수, 지표면경사도, 지하수면깊이이다.

첫번째 가정으로부터 유출율 q_i 는 식 (3)과 같다.

$$q_i = ra \quad (3)$$

여기서 a 는 i 지점으로 배수되는 상류부사면의 단위등고선길이당 면적(m)이며 r 은 지하수함양율(m/h)이다.

식 (2)와 (3)을 이용한 수식전개로부터 지점지하수면깊이는 평균지하수면깊이, 지형지수, 지표포화투수량계수와 식 (4)의 지하수면깊이에 관한 지배방정식과 같은 관계를 가진다.

$$z_i = z_a - 1/f[\ln(a/\tan\beta)_i - \lambda - \ln T_{0i} + \ln T_e] \quad (4)$$

여기서 z_a 는 사면의 평균지하수면깊이, $\ln(a/\tan\beta)_i$ 는 i 지점 지형지수, λ 는 지형지수의 사면평균값, T_e 는 지표포화투수량계수의 사면평균값이다.

TOPMODEL의 지점별 지하수면깊이와 평균지하수면깊이는 식 (4)의 관계를 나타내므로 i 지점과 j 지점의 지하수면 깊이는 식 (5)와 같은 기울기가 1인 선형관계를 가진다.

$$z_i = z_j + (1/f)[\ln(a/\tan\beta)_j - \ln(a/\tan\beta)_i + \ln T_{O_i} - \ln T_{O_j}] \quad (5)$$

3. 자료 및 연구방법

3.1 조사사면 및 관측방법

조사사면은 경기도 여주군 점동면 부구리에 위치한 사면으로 평균경사는 약 34° 이다(그림 1). 사면에는 높이가 3~5m되는 리기다소나무, 졸참나무, 갈참나무 등이 자라고 있으며 밀도는 2.5 개체/ m^2 이다. 사면토양의 최대심도는 120cm이며, 토양 하부에는 기반암이 분포한다. 2개 지점에서 8cm 깊이별로 토양을 조사한 결과 토성(soil texture)은 양토, 식양토, 사질식양토, 미사질양토 등으로 나타났다(그림 2(a)). 사면 상·하류부는 깊이 32cm 하부부터 토성 및 수리전도도가 차이를 보이고 있다. 상·하류부 지점은 모두 지표에서 32cm 깊이까지 주로 양토가 분포하지만, 사면상류(P1)는 32~64cm 깊이까지 식양토가 분포하고 사면하류(P2)는 양토(깊이 32~48cm), 사질식양토(깊이 48~80cm)가 분포하여 깊이 32cm 하부부터 두 지점의 토성이 다르게 나타난다. 깊이 40cm부터 110cm까지의 수직방향의 수리전도도는 P1이 $0.003 \sim 0.29m/h$ (평균 $0.101m/h$), P2가 $0.015 \sim 0.421m/h$ (평균 $0.151m/h$)로 사면상류의 수리전도도가 하류보다 작으며, 사면상류는 깊이증가에 따라 수리전도도가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나

타난다.

포화대의 지하수면깊이는 심도 약 0.7~1.2m의 관측정(직경 4cm)을 설치하여 측정하였다(그림 1). 1993년 7월 25일부터 1994년 9월 4일까지 약 13개월 동안의 관측기간중 포화대는 우량이 큰 강우가 내린 7월~9월에 형성되고 다른 기간에는 형성되지 않으며, 포화대의 지속기간은 포화대가 형성된 후의 강우량에 따라 차이를 보여 10~37일 정도이다(안중기와 최무웅, 1998). 따라서 이 포화대는 장기간 동안 존재하는 지하수체가 아니라 강우에 의해 토양층에 일시적으로 형성되는 포화대이다.

사면하류의 지표면 침식부에 트랜치를 설치하여 지표면과 토양층을 통한 유출량을 측정하였다(그림 1). 트랜치는 지표에서 80cm 깊이까지 설치하였으며, 폭은 90cm이다. 지표유출량은 지표 부근에 물받이를 설치하여 측정하고 토양층을 통한 유출량은 물받이를 40cm 깊이, 80cm 깊이에 설치하여 측정하였다(그림 3). 토양층을 통한 유출은 강우에 의해 포화대의 수위가 상승함과 동시에 발생하며 유출량은 포화대의 수위변화와 유사하게 변화하고 유출지속기간은 5일 이내로 짧은 특징을 보인다(안중기와 최무웅, 1998). 이 유출은 토심이 얇은 사면에서 7~9월중에 일시적으로 형성된 포화대로부터 빠르게 발생하므로 포화대의 물이 사면하류방향으로 빠른 속도로 유동한 중간류(subsurface flow) 유출이라고 할 수 있다. 지하수면깊이와 중간류유출량과의 관계 분석에는 40cm 깊이, 80cm 깊이의 유출량 측정값을 합하여 사용하였다. 조사지역의 자세한 토양의 물리적 특성과 수문관측방법은 안중기(1995), 안중기와 최무웅(1998)에 제시되어 있다.

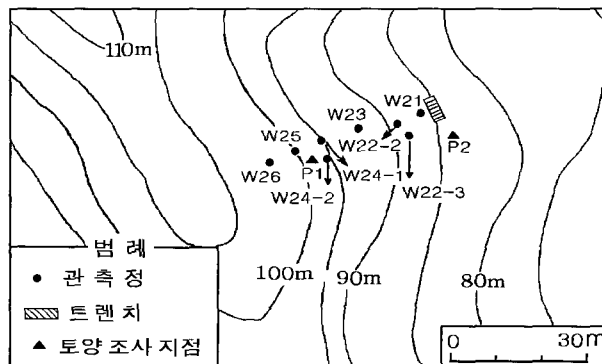
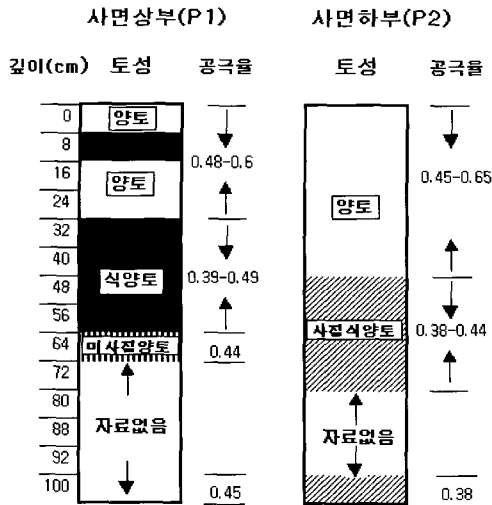
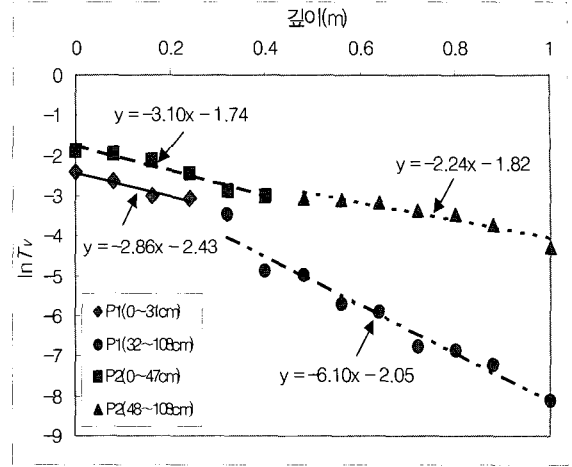


그림 1. 연구지역의 지형과 관측시설 위치



(a) 토성과 공극율



(b) 수직방향 투수량계수

그림 2. 깊이에 따른 토양의 특성(a)과 수직방향 투수량계수 T_v 의 변화(b) (그림(b)의 직선과 수식은 회귀선과 회귀식임)

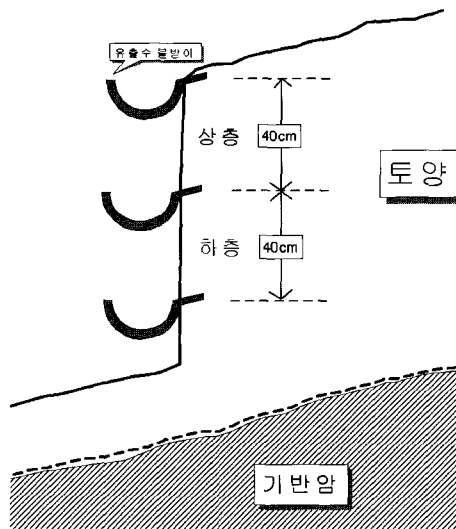


그림 3. 지표유출과 중간류 유출측정을 위한 트렌치의 단면도

3.2 검증방법

조사사면의 '94년 7월부터 9월까지 지하수면깊이(그림 4), '94년 8월 29일~30일에 관측한 중간류유출을 자료를 이용하여 조사사면의 투수량계수와 수리경사 등이 모델의 기본가정에 적합한지를 분석하였다. 가정 A2를 검증하기 위해 관측정간의 포화대의 수리경사와 지형경사를 비교하였다. 관측정이 위치한 지점의 표고, 관측정간의 거리측량자료로 인근 관측정간의 지형경사를

계산하였다.

지하수면깊이에 따른 사면하류방향의 투수량계수의 변화경향(가정 A3)은 트렌치부근의 수리경사와 중간류 유출 측정자료를 이용하여 식 (6)의 Darcy의 공식으로 유출율별 투수량계수를 산정하고, 이 값을 트렌치 인근의 관측정의 지하수면깊이와 비교하여 검증하였다.

$$T = q_i/I \quad (6)$$

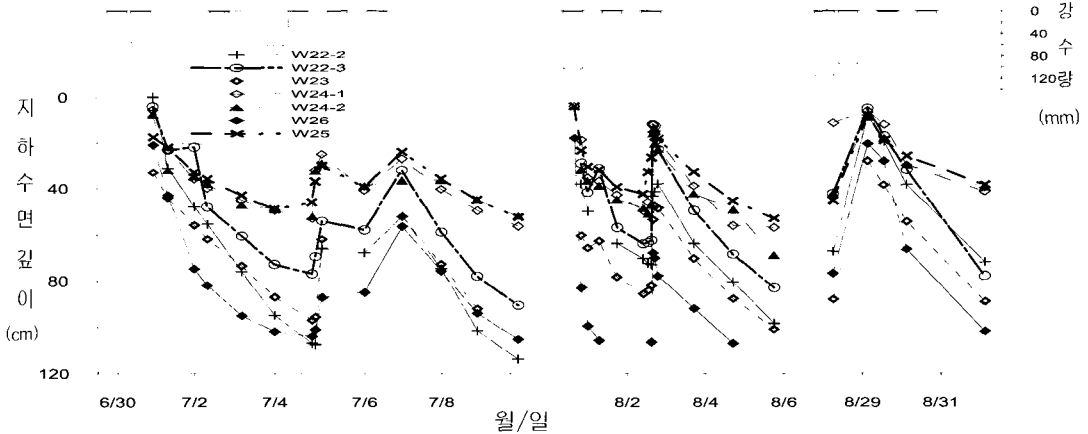


그림 4. 검증에 이용한 지하수면깊이 관측자료('94.7.1~'94.9.1)

여기서 q_i 는 i 지점에서의 유출율, I 는 수리경사이다.

관측된 중간류유출율은 지표부터 80cm 깊이까지의 유출율이므로 80cm 깊이부터 트렌치 설치 지점의 기반암 깊이 110cm까지의 유출율을 Darcy법칙으로 추정하여 관측된 유출율을 보정하였다. 80~110cm구간의 유출율추정에는 트렌치부근 P2지점의 사질식양토의 수직방향의 수리전도도의 평균값 0.064m/h를 이용하였고 수리경사는 지형경사 0.32를 적용하였다.

TOPMODEL의 지하수면깊이 분포 및 변화경향에 대한 모의능력은 관측자료로 지하수면깊이에 관한 지배방정식(식 4)의 성립여부를 분석하여 검증하였다. 먼저 사면의 평균지하수면깊이(z_a)와 지점지하수면깊이(z_i) 관측값 사이에 기울기 1의 선형관계 성립여부를 트렌치에서 관측한 중간류유출량으로 유도한 z_a 변화경향을 이용하여 분석하였다. 즉 사면의 z_a 를 구할 수 없기 때문에 식 (7)과 같이 일정시간 동안의 사면으로부터 유출량(ΔQ)과 유효공극율(θ)로부터 평균지하수면깊이 변화량(Δz_a)를 구하여 z_i 관측값과 비교하였다. θ 는 TOPMODEL의 f 와 m (공극율을 고려한 투수량계수 감소율)의 관계(식 (8))로부터 산정하였는데, f 는 가정 검증에서 산정한 값, m 은 식 (9)의 시간과 유출율 관계로부터 구하였다.

$$\Delta z_a = \Delta Q \times \theta \quad (7)$$

$$f = \theta / m \quad (8)$$

$$1/Q_b = 1/Q_o + t/m \quad (9)$$

여기서 Q_b 는 유출율(m/h), Q_o 와 t 는 각각 사면전체가

지표까지 포화되었을 때의 유출율(m/h)과 포화된 이후의 경과시간(h)이다.

평균지하수면깊이 변화경향을 알 수 없는 다른 관측자료들은 관측정간의 지하수면깊이가 식 (5)와 같이 기울기가 1인 선형관계를 나타내는지 분석하였다. 지점지하수면깊이와 평균지하수면깊이가 기울기가 1인 선형관계일 때 관측정간의 지하수면깊이는 기울기가 1인 관계를 보이므로 기울기 1의 최적선을 작성하고 결정계수를 구하였다.

또한 관측된 지하수면깊이와 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 의 관계를 분석하여 식 (4)의 지하수면깊이에 관한 지배방정식과 같은 관계의 성립여부를 검토하였다. 관측지점의 지형지수는 관측정의 표고측량자료로 5m간격의 표고를 추정하여 계산하였다. 사면에서 단위면적당 동일한 중간류유출이 발생한다는 가정으로 트렌치의 중간류유출을 관측자료를 이용하여 각 관측정이 위치한 지점의 유출율을 추정하고 이 유출율, 지표면경사, 지하수면깊이 관측값으로 식 (2)를 이용하여 T_{0i} 를 산정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 TOPMODEL의 가정 검증

4.1.1 수리경사와 지형경사

관측정간의 수리경사와 지형경사(지표면경사)를 비교한 결과 관측정간의 4개 수리경사중 2개 수리경사가 지형경사와 거의 일치하지만 다른 2개 수리경사는 지형경사보다 크거나 작게 나타난다(그림 5). 사면하류에 위치한 W22-2와 W23, 사면중간의 W24-1과 W25의

지형경사는 각각 0.311, 0.365인데 수리경사와 지형경사의 평균절대오차(mean absolute error)가 각각 0.0124, 0.0064로 수리경사가 지형경사와 비교적 유사하다(표 1). W22-2와 W23의 경우 포화대가 사면에 존재한 총 17일 중에 약 64%에 해당하는 10.8일 동안의 수리경사가 지형경사의 ± 0.01 이내이며 약 89%에 해당하는 15일 동안의 수리경사가 지형경사의 $+0.01 \sim -0.02$ 이내이다. W24-1과 W25의 경우 포화대가 존재한 18.3일 중에 약 96%에 해당하는 17.5일 동안의 수

리경사가 지형경사의 ± 0.01 범위 이내에 있다.

사면중간의 W23과 W24-1, 사면상류의 W25와 W26의 지형경사는 각각 0.368, 0.317인데 수리경사와 지형경사의 평균절대오차는 각각 0.034, 0.062로 수리경사는 지형경사와 차이가 크게 나타난다. W23과 W24-1의 수리경사는 대부분 0.387~0.408로 지형경사보다 0.02~0.04 정도 높지만 변화폭이 0.02 정도로 비교적 작은 편이다. 그림 1에서와 같이 두 관측지점 사이에서 지형경사가 크게 변하므로 두 지점의 표고 측량

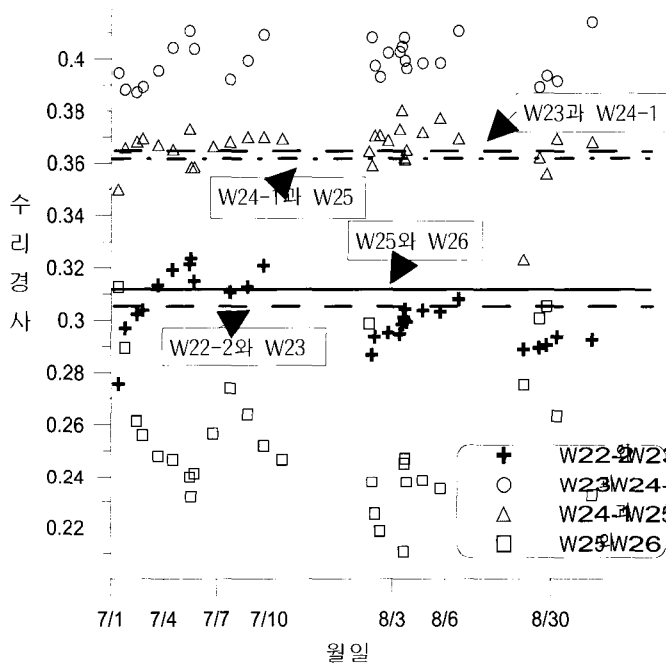


그림 5. 관측점간의 수리경사와 지형경사 비교
(x축과 평행한 실선과 점선은 지형경사를 나타냄)

표 1. 일시적 포화대의 수리경사와 지형경사 비교

항 목		W22-2와 W23	W23과 W24-1	W24-1과 W25	W25와 W26
관측수		29	29	32	29
지형경사		0.311	0.368	0.365	0.317
수리경사	중위수	0.301	0.400	0.368	0.247
	범위	0.276~0.323	0.387~0.443	0.323~0.380	0.211~0.313
	지형경사와의 평균절대오차	0.0124	0.0340	0.0064	0.0620

과 지하수위 관측으로 구한 지형경사나 수리경사가 조사지점의 실제 국지적인 지형경사와 수리경사의 분포를 반영하지 못하기 때문에 이 자료로 지형경사와 수리경사의 관계를 분석하기 어렵다고 할 수 있다. 상류부의 W25와 W26 사이의 수리경사는 0.21~0.31로 변화폭이 0.1정도로 크며 관측된 수리경사중 75% 이상이 지형경사보다 0.05~0.1정도 작기 때문에 이 지점에서 수리경사는 지형경사와 관계가 없는 것으로 판단된다.

이와 같이 사면상류부를 제외하고 지형경사와 수리경사가 거의 일치하는 것으로 나타나므로 TOPMODEL의 첫 번째 가정이 조사사면에서 성립되는 것으로 판단된다.

4.1.2 지하수면깊이와 투수량계수

지하수면깊이(z_i)에 따른 투수량계수(T)의 변화경향(가정 A3)을 분석하기 위해 8월 29일~30일의 중간류 유출율로 T 를 계산할 때 수리경사는 트랜치 단면의 침출면의 관찰자료와 3m 상류에 위치한 W21의 지하수위자료로 계산하였다. 2회 관찰한 침출면의 최상단과 W21의 지하수면의 수리경사가 0.393~0.407로 비교적 유사하므로 수리경사는 중간값 0.4를 적용하였다. 그림 6은 T 와 W21의 z_i 관계그래프로 투수량계수는 지하수면깊이와 지수함수적인 관계를 보이고 있다. 지수함수에 의한 추세를 구한 결과 포화투수량계수(T_0)는 식 (10)과 같이 $1.06\text{m}^2/\text{h}$, f 는 6.21로 나타났다.

$$T = 1.06 \exp(-6.21z_i) \quad (10)$$

사면의 2개 지점에서 수직방향의 수리전도도를 측정 한 자료로 계산한 수직방향의 투수량계수(T_v)도 지하수

면깊이와 지수함수적인 관계를 보이고 있다(그림 2(b)). 그림 2(b)는 수리전도도 측정값에 샘플간격(8cm)을 곱하여 T_v 를 산정하고 T_v 와 z_i 관계를 표시한 그림이다. 두 지점의 토성은 전술한 바와 같이 깊이 0.3m 부근까지 양토로 동일하지만 그 하부부터 서로 차이가 발생한다. 토성별로 볼 때 z_i 와 투수량계수의 자연로그값($\ln T_v$)은 선형관계를 보여 식 (1)과 같은 관계를 나타내고 있다. 그러나 두 지점에서 z_i 와 $\ln T_v$ 와의 회귀선의 기울기는 다르게 나타난다. 사면하류(P2)는 토성의 변화에 관계없이 f 에 해당하는 기울기가 유사한 경향을 보이지만, 사면상류(P1)의 경우 양토층(깊이 0~30cm)은 사면하류와 기울기가 유사하지만, 0.3m 하부의 식양토층은 하류보다 2배정도 크게 나타난다.

수직방향의 투수량계수 자료로 볼 때 사면상류는 토성이 달라지는 깊이 30cm 아래부터 f 값이 사면하류와 달라지는 경향을 보인다. 사면하류방향과 수직방향의 수리전도도는 동일하지 않지만 일반적으로 사면하류방향의 수리전도도가 토양에 발달된 대공극과 토양층위 때문에 수직방향의 값보다 큰 점으로 볼 때 사면하류방향의 투수량계수의 지하수면깊이에 따른 변화경향도 수직방향의 변화경향과 유사할 것으로 추정된다.

4.2 TOPMODEL의 지하수면깊이에 관한 지배 방정식 검증

4.2.1 평균지하수면깊이와 지점지하수면깊이관계

조사사면의 평균지하수면깊이 변화량(Δz_a)을 8월 29일부터 8월 30일까지 사면유출량과 유효공극율로 식 (7)을 이용하여 구하고 지점지하수면깊이(z_i) 관측값과 비교하였다(그림 7). 사면토양의 유효공극율을 식 (9)의

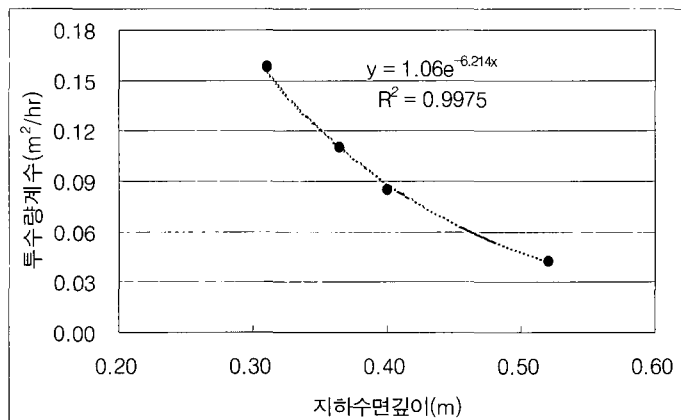


그림 6. 트랜치부근의 지하수면깊이(z_i)와 투수량계수(T)관계

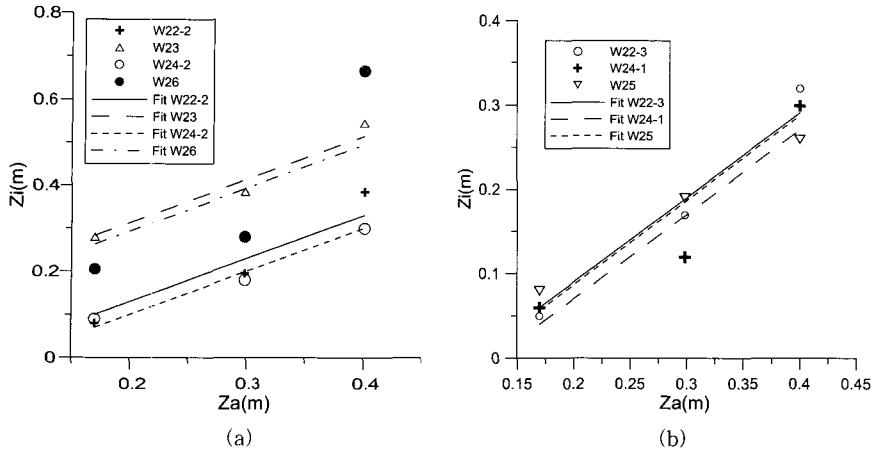


그림 7. 평균지하수면깊이(Z_a)와 지점지하수면깊이(Z_i) 관계 (Z_a 초기값은 0.17m로 가정하였으며, 직선은 기울기 1의 최적선임)

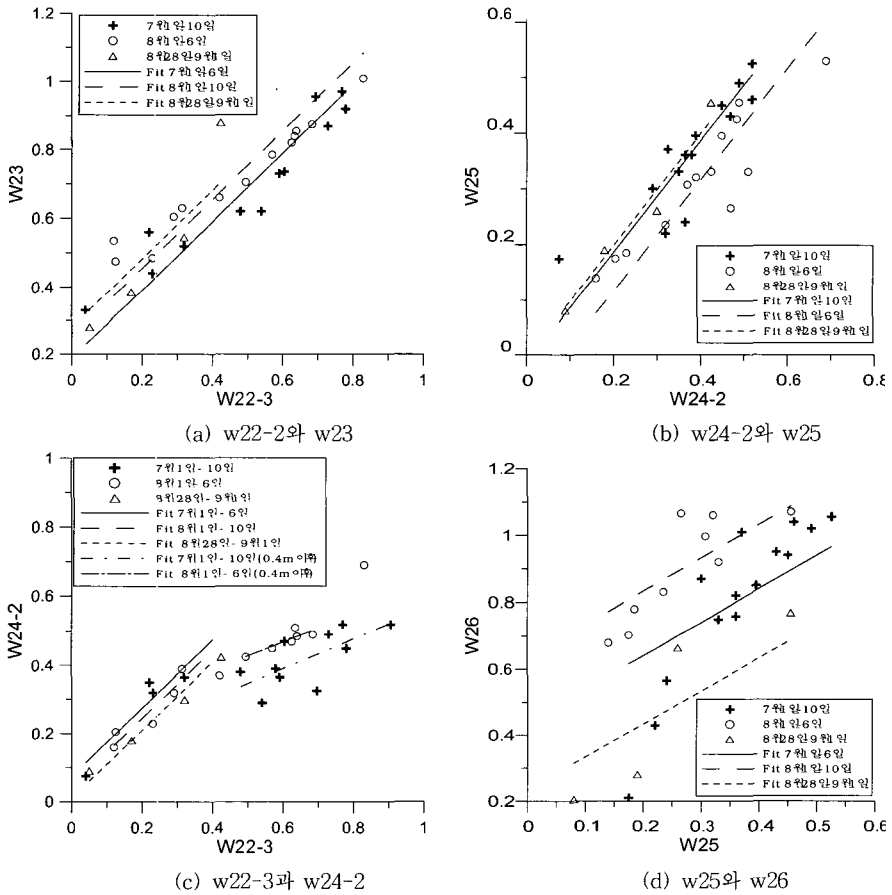


그림 8. 관측점간의 지하수면깊이(Z_i)관계 (Z_i 의 단위는 m, 직선은 기울기 1의 최적선임, 단 (c)의 우측 직선은 기울기 0.44의 최적선)

시간(t)과 $1/Q_b$ 의 관계로부터 구한 $m=0.0093$ 과 식 (10)의 $f=6.21$ 로 식 (8)을 이용하여 구한 결과 0.058이었다. 사면상류에 위치한 W26을 제외한 다른 지점은 기울기 1의 최적선과 관측값의 편차가 대부분 0.05m 이내로 나타나고 있어 이 기간중에 z_a 와 z_i 는 TOPMODEL의 지배방정식과 같은 기울기 1의 선형관계를 나타낸다.

관측경간의 지하수면깊이 관계를 분석하기 위해 1일 강수량 100mm이상의 호우로 사면에 일시적인 포화대가 형성된 이후 배수된 기간 동안의 관측자료에 대해 기울기 1의 최적선을 작성하였다(그림 8). W26를 제외한 6개 관측경간의 기울기가 관측자료 전체 또는 일부 깊이까지 1에 가까운 선형관계를 보이고 있다. 사면하류의 3개 관측정(W22-2, W22-3, W23)간의 z_i 와 사면상류의 3개 관측정(W24-1, W24-2, W25)간의 z_i 는 전체 관측자료가 기울기 1의 선형관계를 보이며 결정계수가 0.63 이상으로 높게 나타난다(그림 8(a)과 (b)). 그렇지만 사면하류의 2개 관측정(W22-2, W22-3)은 사면상류의 3개 관측정(W24-1, W24-2, W25)과 0.4m 깊이까지 기울기 1인 관계를 보이지만, 0.4m 이후부터 기울기가 약 0.44인 선형관계를 보인다(그림 8 (c)). 사면 하류와 상류에 위치한 관측경간의 지하수면깊이가 일정 깊이(약 0.4m)까지 기울기가 1인 선형관계를 보이고 그 이후부터 기울기가 달라지는 것은 4.1.2에서 언급한 것처럼 두 지점간의 토양특성의 차이 즉 투수량계수감소율(f)이 0.3m 깊이부터 서로 차이가 발생하는 것과 관계가 있는 것으로 판단된다.

4.2.2 지하수면깊이와 지형지수, 투수량계수의 관계

조사사면에서 사면하류방향의 지표포화투수량계수(T_{0i})분포에 대한 측정자료가 없기 때문에 지점지하수면깊이(z_i)와 지형지수, T_{0i} 의 관계를 직접적으로 분석하기 어렵다. T_{0i} 의 공간적변이가 작아 $\ln T_{0i}$ 와 $\ln T_e$ 가 거의 동일하다면 z_i 는 지형지수 $\ln(a/\tan\beta)$ 와 기울기가 $1/f$ 인 선형관계를 가지며, 지점별 지형지수가 증가할수록 z_i 는 감소하는 관계를 나타내게 된다. $\ln T_{0i}$ 와 $\ln T_e$ 가 동일하다는 가정으로 f 가 사면전체에서 동일한 자료, 즉 사면상류의 3개 관측정(W24-1, W24-2, W25)의 z_i 가 0.4m이내인 시기의 관측자료를 이용하여 지점별 지형지수-지하수면깊이 관계 그래프를 작성한 결과 지형지수가 증가할수록 지하수면깊이가 감소하는 관계는 1회 관측값을 제외하고 나타나지 않는다(그림 9(a)과 (b)). 이것은 조사사면에서 T_{0i} 의 공간적 변이

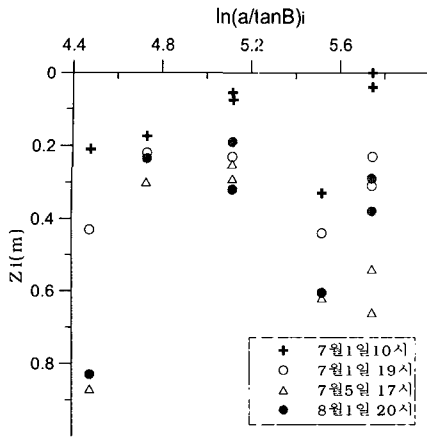
가 크기 때문에 z_i 가 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 에 대해 선형관계를 가지거나, T_{0i} 의 공간적변이가 크지 않지만 z_i 가 TOPMODEL의 지배방정식과 달리 지형지수와 선형관계를 나타내지 않는 것으로 볼 수 있다.

TOPMODEL의 중요 매개변수중의 하나인 사면하류방향의 T_{0i} 에 대한 적당한 측정방법이 없기 때문에 T_{0i} 의 공간적 분포를 구하는 것이 문제가 되고 있다 (Beven, 2001). 본 연구에서는 T_{0i} 를 산정하기 위해 먼저 관측정이 위치한 지점의 유출율 q_i 를 추정하고 식 (2)의 q_i 와 T_{0i} 의 관계로부터 관측정이 위치한 지점의 T_{0i} 를 산정하였다. TOPMODEL의 첫 번째 가정과 같이 조사사면에서 단위면적당 동일한 지중수유출이 발생한다고 가정하면 유출율 q_i 는 상류부 사면의 단위등고선길이당 면적(a)이 증가할수록 증가하며 q_i 는 단위면적당 발생하는 유출율(q_e), a 와 식 (11)의 관계를 나타낸다. 여기서 q_e 는 가장 하류부에 위치한 트렌치 유출율 관측값을 트렌치부터 능선까지 사면면적으로 나누어 개략적으로 구할 수 있다.

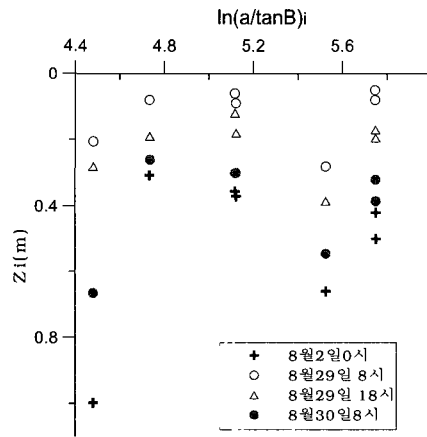
$$q_i = q_e \times a = q_e / A \times a \quad (11)$$

여기서 q_e 는 단위면적당 발생하는 유출율(m/h), q_i 는 트렌치에서 단위등고선길이당 유출율(m²/h), A는 단위 등고선길이당 트렌치부터 능선까지 사면면적(m)이다.

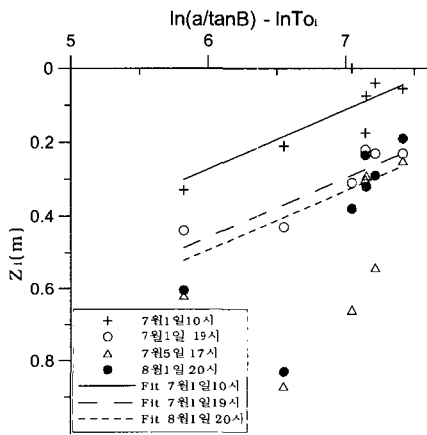
f 가 동일한 시기인 8월 29일~30일의 트렌치 유출율 관측자료를 이용하여 각 지점의 q_i 를 추정하고 T_{0i} 를 산정하였다. 표 2와 같이 8월 30일 8시 유출율로 산정한 3개 관측정(W22-2, W23, W26)의 T_{0i} 를 제외하고 대부분 변화범위가 0.1m²/hr로 일정한 경향을 보이고 있다. 8월 29일의 유출율로 산정한 T_{0i} 는 사면하류 P2인근의 2개 관측정(W22-2, W22-3)이 0.22~0.29m²/hr, 사면상류의 P1인근의 3개관측정(W24-1, W24-2, W25)이 0.09~0.14m²/hr로 사면하류의 값이 사면상류보다 1.6~3.2배 크게 나타난다. 2개 토양조사 지점의 수직방향의 수리전도도 측정값으로 계산한 수직방향의 지표포화투수량계수의 경우 사면하류(P2)가 0.154m²/hr, 사면상류(P1)가 0.089m²/hr로 사면하류가 상류보다 1.7배정도 크게 나타난다. 단위면적당 동일한 중간류유출이 발생한다는 가정으로 추정된 사면 상하류의 T_{0i} 값의 비율이 토양조사자료로 산정한 수직방향의 포화투수량계수의 비율과 유사한 점으로 볼 때 사면하류방향의 T_{0i} 가 적절하게 산정된 것으로 판단된다.



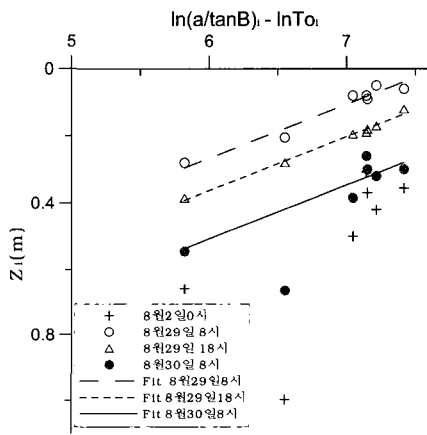
(a) z_i 와 $\ln(a/\tan\beta)_i$



(b) z_i 와 $\ln(a/\tan\beta)_i$



(c) z_i 와 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln To_i$



(d) z_i 와 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln To_i$

그림 9. 지하수면깊이(z_i)와 지형지수($\ln(a/\tan\beta)_i$), 지표포화투수량계수($\ln To_i$) 관계 (그림 (c)와 (d)의 직선은 -0.161 의 기울기를 갖는 최적선)

표 2. 관측점이 위치한 지점의 지표포화투수량계수(To_i) 산정결과

(단위: m^2/hr)

구분		W22-2	W22-3	W23	W24-1	W24-2	W25	W26
8월29일 8시		0.26	0.22	0.73	0.11	0.14	0.09	0.14
8월29일 18시		0.29	0.24	0.75	0.09	0.13	0.09	0.12
8월30일 8시		0.47	0.31	1.02	0.14	0.14	0.07	0.64
변화범위		0.21	0.10	0.29	0.05	0.01	0.02	0.52
8월29일 평균	To_i	0.27	0.23	0.74	0.10	0.13	0.09	0.13
	$\ln To_i$	-1.30	-1.47	-0.30	-2.30	-2.03	-2.41	-2.07

표 2의 8월 29일의 T_{0i} 의 평균값으로 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 을 계산하고 관측된 z_i 와 비교한 결과 z_i 는 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다(그림 9(c)과 (d)). 그림의 직선은 지배방정식의 $-(1/f)$ 에 해당하는 $-0.161 (= -1/6.21)$ 의 기울기를 갖는 최적선으로 대부분의 관측자료가 최적선 부근에 분포하여 관측된 z_i 는 관측지점의 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 와 기울기 $-(1/f)$ 인 선형관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

4.3 검토

TOPMODEL의 2개 기본가정에 대해 토양조사 및 수문관측자료로 검증한 결과 조사사면에서 지하수면반응과 토양의 수리적인 특성이 기본가정과 일치하는 것으로 판단된다. 사면상류 W26을 제외한 관측경간의 수리경사는 지형경사와의 평균절대오차가 ± 0.012 이내로 적고 수리경사가 비교적 일정한 경향을 보인다. 이런 점을 볼 때 사면의 대부분 지점에서 포화대의 수리경사는 지표면의 지형경사로 개략화하여 나타낼 수 있는 것으로 생각된다. 사면하류에 설치된 트렌치의 중간류유출율로 산정한 사면하류방향의 투수량계수와 인근 관측정의 지하수면깊이 관계, 상하류 2개 토양조사지점의 수직방향의 투수량계수와 지하수면깊이관계를 보면 사면하류방향의 투수량계수는 지하수면깊이와 지수함수적인 관계를 보이고 있다. 그러나 수직방향의 투수량계수와 지하수면깊이 관계로 볼 때 사면하류는 깊이에 따른 투수량계수감소를 f 의 변화가 없이 두께 1.1m의 토양전체가 비교적 일정하지만 사면상부는 0.3m 깊이에서 토성변화와 함께 f 값이 변화하는 경향을 보인다.

사면상류의 z_i 가 0.4m보다 작은 경우 관측정의 z_i 는 사면의 평균지하수면깊이 z_a 와 기울기 1의 선형관계를 보이며 $\ln(a/\tan\beta)_i - \ln T_{0i}$ 가 증가할수록 작아지는 경향을 보여 조사사면에서 지하수면의 반응은 식 (4)의 지하수면깊이에 관한 지배방정식과 같은 반응을 나타낸다. 그러나 사면상류의 z_i 가 0.4m보다 클 때 사면 상·하류의 관측경간의 지하수면깊이는 기울기가 0.44인 선형관계를 보여 식 (4)의 방정식과는 다른 경향을 보인다. 지배방정식이 적용되지 않는 깊이는 사면상류의 토성이 양토에서 식양토로 변하며, 수직방향의 투수량계수의 f 값이 2배정도 증가하는 0.3m 깊이 부근이다. 조사사면에서 TOPMODEL의 지하수면에 관한 지배방정식이 지표부터 일정 깊이까지만 적용되는 것은 사면상부에서 토성의 수직적인 변화와 함께 f 값이 크게 변화하여 이 깊이부터 사면에서 f 값이 공간적으로 불균질

하게 되기 때문으로 판단된다.

TOPMODEL의 지하수면깊이에 대한 예측능력을 검증한 결과 토양특성 특히 f 값이 공간적으로 균질한 사면에서 지하수면의 반응은 TOPMODEL의 지배방정식과 같은 반응을 보이므로 모델을 이용하여 지하수면깊이의 공간적 분포를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 사면의 일정깊이까지 토양의 특성이 공간적으로 균질하지만 사면의 일부지점에서 토양특성의 수직적인 변화가 크게 발생하여 토양특성이 공간적으로 불균질하게 되는 경우 토양특성이 균질한 깊이까지 TOPMODEL에 의한 예측이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구결과와 사면의 일부지점에서 발생한 토양특성의 수직적인 변화가 TOPMODEL의 f 나 m , θ 와 같은 매개변수 특성을 공간적으로 불균질하게 하는 요인이라는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 토양두께가 얇은 급경사사면의 토양조사, 지하수면깊이, 중간류유출 관측자료로 TOPMODEL의 기본가정과 TOPMODEL의 지하수면깊이에 대한 지배방정식을 검증하여 모델의 지하수면깊이 분포에 대한 예측능력을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 조사사면의 일부 지점을 제외하고 수리경사가 지형경사와 거의 일치하며, 사면방향의 투수량계수는 지하수면깊이와 지수함수적인 관계를 보여 토양의 수리특성과 수문반응이 TOPMODEL의 기본가정과 일치하는 것으로 나타났다.
- (2) 조사사면에서 토성(soil texture)과 투수량계수 감소율 f 의 수직적인 변화가 발생하여 사면에서 f 값은 일정깊이까지 공간적으로 균질하지만 그 하로부터 불균질하게 나타난다.
- (3) 지하수면의 반응은 f 값이 공간적으로 균질한 깊이까지 TOPMODEL의 지하수면깊이에 관한 지배방정식과 같은 반응을 보여 토양두께가 얇고 공간적으로 f 값이 균질한 사면에서 모델을 이용한 지하수면깊이 분포 예측이 가능한 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 김상현, 송광익, 한건연 (1996). "Tile Drain의 영향과 GIS를 연계한 농경지 유역에 대한 수문학적 모의." **한국수자원학회논문집**, 제29권, 제6호, pp. 203-216.
- 김상현, 김경현 (1999). "공간적 포화면적의 공간적 연

- 결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용” **한국수자원 학회논문집**, 제32권, 제5호, pp. 515-524.
- 김진훈, 배덕효, 장기호, 조천호 (2002). “TOPMODEL의 토양수분 변동성 모의에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제1호, pp. 66-75.
- 안중기 (1995). **소유역곡저부 천층지하수의 수위와 흐름변화**. 박사학위논문, 건국대학교, pp. 10-32.
- 안중기, 최무웅 (1998). “강우에 의한 급사면의 일시적인 포화대형성과 중간류유출.” **한국수 자원학회논문집**, 제31권, 제2호, pp. 167-176.
- 이학수, 한지영, 김경현, 김상현 (2001). “지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분 석연구.” **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제4호, pp. 403-414.
- 이학수, 김남원, 김상현 (2002). “수정 TOPMODEL에 의한 유출해석과 일반화(설마천유역을 중 심으로).” **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제3호, pp. 295-306.
- 조홍제, 조인률, 김정식 (1997). “TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구.” **한국수자원학회논문 집**, 제30권, 제5호, pp. 515-526.
- 조홍제, 조인률 (1998). “분포형 유출모형을 이용한 홍수 유출해석.” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제2호, pp. 199-208.
- 조홍제, 김정식, 이근배 (2000). “TOPMODEL을 이용한 장기유출해석.” **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제4호, pp. 393-405.
- Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979). “A physically based variable contributing area model of basin hydrology.” *Hydrological Science Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.
- Beven, K. J., and Wood, E. F. (1983). “Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing Areas.” *Journal of Hydrology*. Vol. 65, pp. 139-158.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., Schoffield, N., and Tagg, A. (1984). “Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments.” *Journal of Hydrology*. Vol. 69, pp. 119-143
- Beven, K. J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J. (1995). “TOPMODEL.” *Computer models of watershed hydrology*, Edited by Singh, V. P., Water Resources Publications, Highlands Ranch, pp. 627-668.
- Beven, K. J. (2001). *Rainfall-runoff modelling: the primer*, Wiley, Chicheste, pp. 187-202.
- Cameron, D., Beven, K. J., Tawn, J., Blazkova, S., and Naden, P. (1999). “Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty).” *Journal of Hydrology*. Vol. 219, pp. 169-187.
- Franks, S. W., Gineste, Ph., Beven, K. J., and Merot, Ph. (1998). “On constraining the predictions of a distributed model: the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process.” *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 787-797.
- Lamb, R., Beven, K. J., and Myrab, S. (1997). “Discharge and water table predictions using a generalised TOPMODEL formulation.” *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 9, pp. 1145-1168.
- Lamb, R., Beven, K. J., and Myrabø, S. (2001). “Shallow groundwater response at Minifelt.” *Spatial patterns in hydrological processes observations and modelling*, Edited by Grayson, R. and Blöschl, G., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 272-303.
- Moor, R. D., and Thompson, J. C. (1996). “Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept?” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 663-669.
- Robson, A. J., Whitehead, P. G., and Johnson, R. C. (1993). “An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments.” *Journal of Hydrology*. Vol. 145, pp. 357-370.
- Seibert, J., Bishop, K. H., and Nyberg, L. (1997). “A test of TOPMODEL’s ability to predict spatially distributed groundwater levels.” *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 9, pp. 1145-1168.

(논문번호:03-33/접수:2003.03.31/심사완료:2003.11.17)