

## 경남 상북면 양산단층 시부지역에 대한 습윤지수 특성 연구

한지영\*, 김성욱\*, 강문기\*\*, 김상현\*\*\*, 김인수\*\*\*\*

\*지반정보연구소 611-828 부산시 부산진구 양정2동 333-6

\*\**(주)한주지질*, 609-811 부산시 금정구 남산동 35-8

\*\*\*부산대학교 환경공학과, 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

\*\*\*\*부산대학교 지질학과, 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

groundinfo@chollian.net

### <요약문>

연구지역은 경남 양산시 상북면 삼삼리 일원으로 양산단층과 인접하며 급한 경사의 자연사면으로 이루어져 있다. 수치지형자료를 이용하여 고도값을 갖는 자료층을 추출한 후 10m×10m 크기의 격자별로 DEM으로 변환하고, 이로부터 단위 격자의 경사도, 경사방향도, 음영도를 작성하고, 흐름분배 알고리즘을 이용하여 설정된 격자별로 상부사면의 기여면적과 습윤지수를 산정하였다.

높은 습윤지수를 보이는 지역은 북서-남동 방향의 선형구조로 나타나며, 국소지역의 전단단열 특성과 일치한다. 한편 연구지역에서 전기비저항 탐사를 실시하여 높은 습윤지수를 나타내는 지역과 저비저항 이상대의 분포를 비교한 결과 습윤지수가 높은 지역은 모두 낮은 전기비저항 이상대로 관찰된다. 즉 습윤지수는 암석의 화학적 풍화를 수반하는 파쇄대의 분포와 일치하며 이를 토대로 국소지역에서 파쇄대의 예측과 암석의 안정성을 예측하는 방법으로 이용될 수 있다.

**key word** : DEM, 습윤지수, 전기비저항탐사

## 1. 서 론

GIS 자료의 영상처리방법이 발전함에 따라 개발사업과 지질재해의 방재분야에서도 지리정보시스템을 이용한 재해 요인의 분석이 활용되고 있으며 그 범위가 확대되고 있다.

대부분의 수문 모의에서 물의 흐름은 중력의 영향을 받는 흐름으로 표현되며, 지형은 흐름을 나타내는 적절한 입력 값으로 고려되고 있다 (Wolock and Price, 1994). 상부사면기여면적과 경사도의 비로써 표현되는 습윤지수 (wetness index)는 수분의 포화정도를 나타내는 인자로서 TOPMODEL, THALES와 TOPOG 등의 분포형 수문모형의 입력변수로서 사면유출모델과 토양수분의 모의과정에서 사용되어 왔다 (Burt and Butcher, 1985; 이학수 외, 2001; 한지영 외, 2003).

개발공사와 관련된 지질재해는 자연생태의 평형상태가 이루어지지 않는 결과로 지속적으로 발생하며, 예측 가능한 현상이다. 이 연구는 국소지역의 포화정도를 지시하는 습윤지수를 강우 시 형성되는 수계의 공간적인 분포를 제시하고, 지질 및 불연속면의 분포와 비교 검토함으로써 암석의 안정성과 파쇄대를 예측하는 방법으로 습윤지수의 적용을 목적으로 한다.

연구 지역은 경상남도 양산시 상북면 상삼리 일원으로 동부는 양산단층이 위치한다. 대상지역의 유역은 개발사업 예정지로 면적은 약 12,6753,000 m<sup>2</sup>이다. 구성 암석은 경상계 유천층군의 화산암류와 백악기말에서 3기초에 형성된 흑운모화강암이 분포한다 (그림 1).

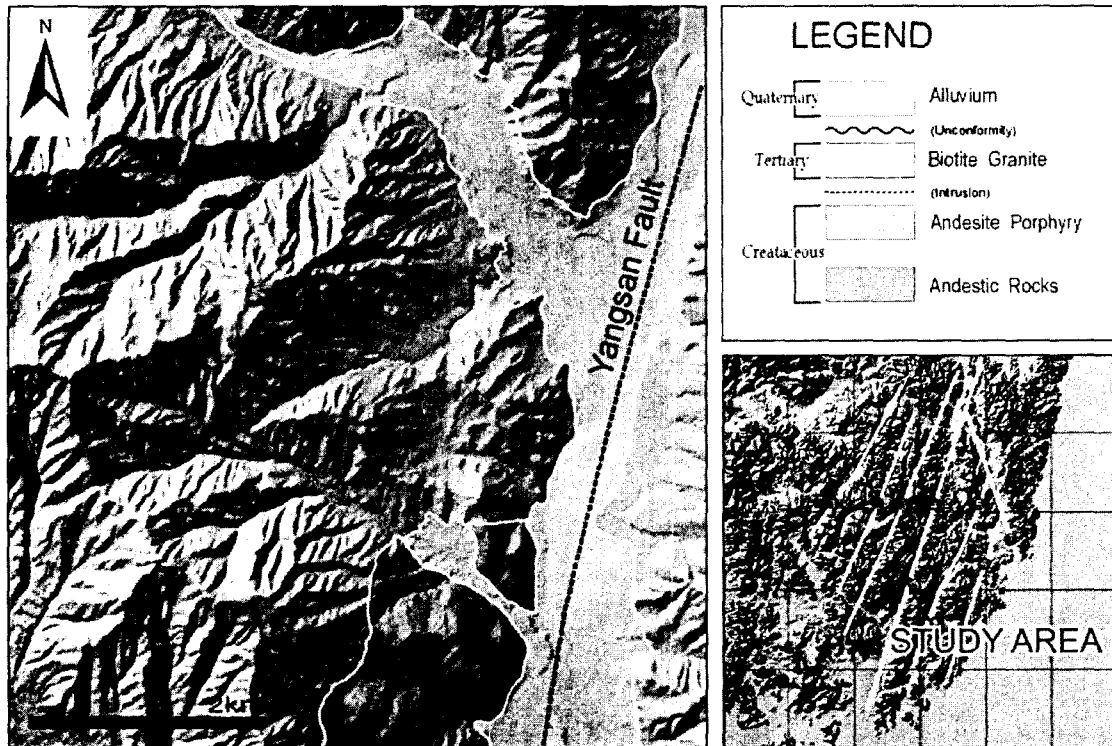


그림 1. 연구지역의 지질

## 2. 지형

산계는 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향의 계곡을 경계로 배열되며, 대상유역 내에서 수계 방향은 양산천 (양산단층의 방향)과는 다른 방향을 보여주고 있으며, 주 수계인 양산천으로 수렴된다 (그림 2).

## 3. 국소지역의 포화정도 산정

유역에서 물의 흐름이 정상상태이고 지하수면의 경사와 지표의 경사가 같다고 가정하면 Darcy의 법칙은 식 1과 같다 (Beven and Kirkby, 1979).

$$Q_i = A_i R = T_i(z_i) \tan \beta_i C_i \quad (1)$$

식 1의 양변을  $C_i$ 으로 나눠주면 식 2가 된다.

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

지표면하에서 수리 전도도의 분포는 다양한 경향성을 가지며 수리 전도도가 지표면으로부터 지수함수적으로 감소한다고 가정하면 지하수위  $z_i$ 에서 토양층 깊이  $z_D$ 까지 적분함으로써  $T_i$ 를 계산할 수 있다 (Beven, 1982).

$$K_s(z) = K_0 \exp(-fz) \quad (3)$$

$$T_i = \int_{z_i}^{z_D} K_0(x) dx = \frac{K_0}{f} (\exp(-fz_i)) \quad (4)$$

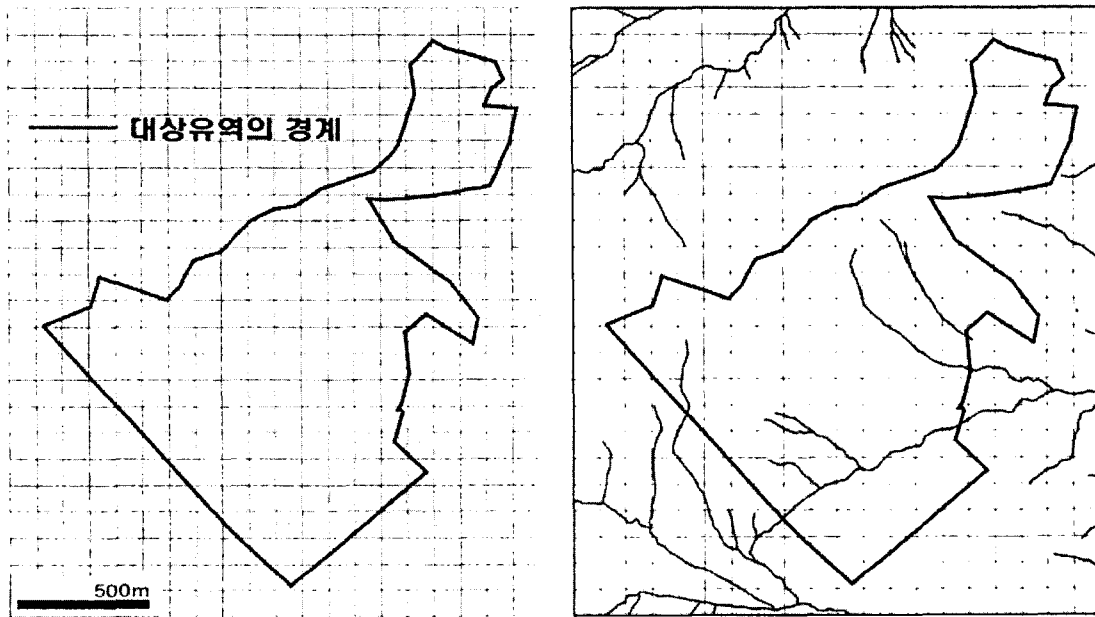


그림 2. 연구지역의 산계 (좌)와 수계 (우)

$z_D$ 값은  $z_i$ 값에 비해 매우 크기 때문에  $\exp(-fz_D)$ 값은 0으로 둘 수 있고 식 (3)은 간단히 변형될 수 있고, 그 결과를 식 1에 대입하고 식 5를 지하수위  $z_i$ 에 대해 정리하면 식 6이 된다.

$$q_i = a_i R = T_0 \tan \beta_i \exp(-fz_i) \quad (5)$$

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln\left(\frac{a_i R}{T_0 \tan \beta_i}\right) \quad (6)$$

식 6을 유역의 면적에 대해 적분하면 유역평균에 대한 지하수위를 계산할 수 있다.

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \int_A \left(-\frac{1}{f} \ln\left(\frac{a_i R}{T_0 \tan \beta_i}\right)\right) dA = -\frac{1}{f} \ln(R) - \frac{1}{f} \Lambda \quad (7)$$

$\Lambda$  :  $\ln(a_i/T_0 \tan \beta_i)$  의 유역평균 값

식 6과 식 7을 정리하여 임의 지점의 지하수위와 유역의 평균수위와의 관계를 이끌어 낼 수 있고 (식 8),  $T_0$ 가 유역에 대해 모두 일정한 값을 가진다면 식 9와 같이 표현된다.

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} \left[ \Lambda - \ln \frac{a_i}{T_0 \tan \beta_i} \right] \quad (8)$$

$$z_i = \bar{z} + \frac{1}{f} \left[ \Lambda^* - \ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} \right] \quad (9)$$

$\Lambda^*$  :  $\ln(a_i/\tan \beta_i)$ 의 유역 평균값

위에서 유도된 식에서 유역의 임의 지점에서 지하수위와 유역평균 지하수위와의 차이는  $\Lambda^*$ 와 임의 지점에서의  $\ln(a_i/\tan \beta_i)$ 의 차이로 계산될 수 있다. 여기서  $\ln(a/\tan \beta)$ 는 습윤지수 (Wetness Index)라 하며 국소 지역의 포화정도를 나타낸다 (Beven and Kirkby, 1979).

상부사면 기여면적의 산정은 흐름을 분배하는 방법에 의해 결정된다. 흐름 경로를 예측하여 상부사면 기여면적을 계산하는 방법은 8개의 이웃격자 중 경사가 가장 급한 격자로만 흐름을 분배하는 단방향 흐름 (SFD : Single Flow Direction) 알고리즘 (O'Callaghan and Mark, 1984), 고도가 낮은 주위 격자 모두에 흐름을 분배하는 다방향 흐름 (MFD : Multiple Flow Direction) 알고리즘 (Quinn et al., 1991), 격자 기반의 모델에 있어서 흐름의 점원적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적 특성임을 고려하여 점원이 아닌 면에서 흐름을 형성하고 발생된 흐름은 하경사 방향으로 2차원 흐름관을 형성한다고 가정하는 DEMON (Digital Elevation Model Networks) 알고리즘 (Costa-Cabral and Burges, 1994) 등이 알려져 있다 (Fig. 3). 이 연구에서는 흐름방향선을 따라 흐름을 형성시키는 DEMON 알고리즘을 이용하였다. 하경사 흐름분배를 계산은 식 10과 같고, 경사도(Slope)  $s$ 는 유한차분 방법을 사용하여 산출할 수 있다 (식 11).

$$f_E = \frac{A_\Delta}{A} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{1}{\tan \alpha}, \quad f_S = 1 - f_E \quad (10)$$

여기서,  $A_\Delta$ 는 그림 1에서 삼각형의 넓이를 나타내고  $A$ 는 격자넓이( $\Delta x \Delta y$ )이고,  $\alpha$ 는  $E$  방위를 기준으로 반시계 방향으로 측정한 흐름 방향각이다. 한 격자는 두 개의 격자로부터 흐름을 받는다.

$$s_{FD} = \sqrt{z_x^2 + z_y^2} \quad (z_x, z_y: \text{미분계수}) \quad (11)$$

#### 4. GIS 자료의 구축

연구지역의 전단단열계 파악을 위한 지형 자료는 국립지리원 1:5,000 축척의 수치지형도와 USGS의 수치지형자료를 이용하여 지형자료에 고도값을 갖는 자료층을 추출한 후 10m×10m 크기의 격자별로 DEM으로 변환하였다. 작성된 DEM에서 격자는 361,201개이며 이 중 설정한 유역 내의 격자는 128,365개이다. DEM으로부터 음영도 (그림 3의 b), 경사도 (그림 3의 b)를 계산 후 GIS 자료로 구축하였으며, 흐름분배 알고리즘을 이용하여 설정된 격자별로 상부사면의 기여면적 (그림 3의 c)과 습윤지수 (그림 3의 d)를 계산하였다. 경사도는 경사를 %를 나타낸 것이며, 상부사면 기여면적은 각 격자에서

결정된 상부로부터 받을 수 있는 격자 면적을 자연대수로 취한 값이다.

## 5. 토의 및 결론

암석의 안정성은 풍화작용과 직접적인 상관성이 있으며, 풍화의 대부분은 물과의 반응에 의한 것으로 알려져 있다. 암석의 균열을 따라 분포하는 물의 흐름 정도는 암석의 물리적, 화학적 풍화와 비례하며 주위에 비해 함수 정도가 높은 부분은 상대적으로 낮은 암석 강도를 가지게 된다.

단위 강우가 지속된다는 가정 하에서, 습윤지수의 분포는 상부사면으로부터 받을 수 있는 흐름을 양으로 나타나며, 흐름 정도로 포화도를 산정함으로써 강우 사상 시 한시적으로 발생하는 수계의 공간적 흐름을 표현할 수 있다. 강우는 지형을 따라 흐를 것으로 예상되며, 어느 정도 강우가 내리고 흐름을 형성시킨다면 습윤지수는 국소 지역에서 흐름과 수렴에 대한 지표가 될 수 있다.

습윤지수로 표현되는 수계는 지형도에 나타나지 않는 일시적인 수계까지 표현할 수 있으며 이에 대한 경사도를 고려한 습윤지수를 이용하여 국소지역의 포화정도를 산정함으로써 암석의 물리적 풍화와 함께 화학적 풍화가 우세한 단열대 지질 재해가 발생 가능한 지역을 예측하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

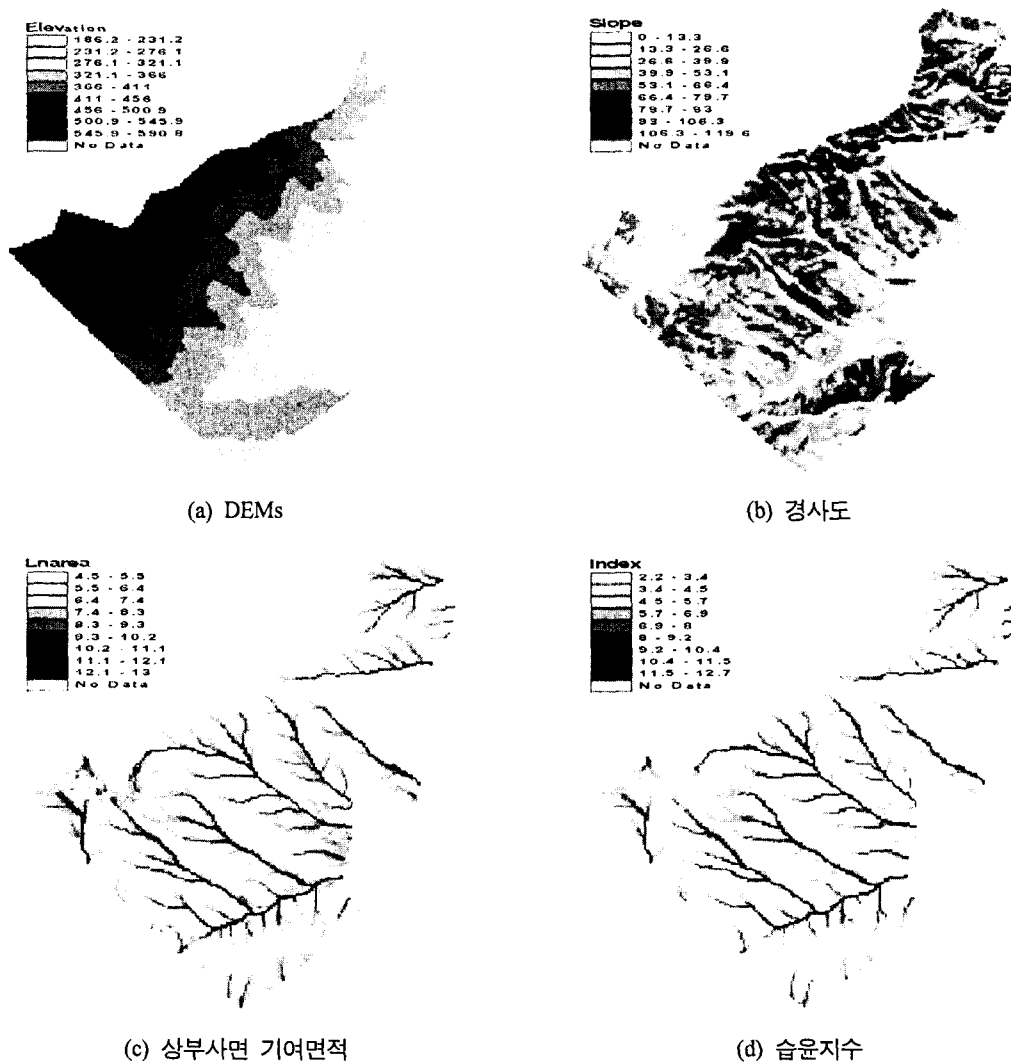


그림 3. 연구지역의 경사도, 상부사면 기여면적, 습윤지수

연구지역의 습윤지수 (그림 3-d)는 북서-남동 방향과 북동-남서방향의 선형구조로 나타나며 최대의 습윤지수는 북서 방향에 발달하며, 수지상의 소규모 수계는 북서-남동 방향으로 형성되는 수계로 수렴된다. 높은 습윤지수를 가지는 지점은 물이 포화될 가능성이 높은 지점에 해당하며, 풍화저항력이 낮은 지역으로 개발시설의 설계와 시공에서 각별한 주의를 요구된다.

양산단층을 우향이동의 단열로 볼 때 북서-남동 방향으로 선형의 포화대는 주 단열과 운동성격이 상이한 (antithetic) R-공액전단단열에 해당하며, 지표조사에서 관찰되는 소단층은 이 방향에서 최대 빈도를 보여준다.

그림 4는 연구지역의 남서부에서 북동 방향으로 전개한 측선의 전기비저항분포를 나타낸 것이다. 단면의 150m, 380m, 600m, 700m 지점에서 보이는 저비저항 이상대의 위치는 선형의 높은 습윤지수가 관찰되는 지점과 일치하는 것으로 물의 포화정도가 높은 지역은 암석의 단열대 및 화학적 풍화 정도가 높은 지역을 반영하고 있었음을 지시한다.

이상과 같이 국소지역에서 습윤지수는 단열대와 단열작용과 연관된 암석의 풍화 정도를 반영하며 지질학적으로 취약한 부분과 재해 가능 지역을 예측하는데 도움을 줄 수 있다. 지금까지 논의된 습윤지수는 흐름을 결정하는 인자를 지형으로 가정하여 유도한 것이며, 물리적, 화학적 풍화에 의한 암석의 파쇄는 습윤정도에 따라 달라진다는 사실에 기초한 것이다. 그러나 실제 암석의 강도는 암석을 이루는 조암물질들에 따라 차이를 보이므로 파쇄대 예측 시 보다 광범위한 지역을 고려한 정보를 제공할 필요가 있으며 이에 대한 연구가 필요하다.

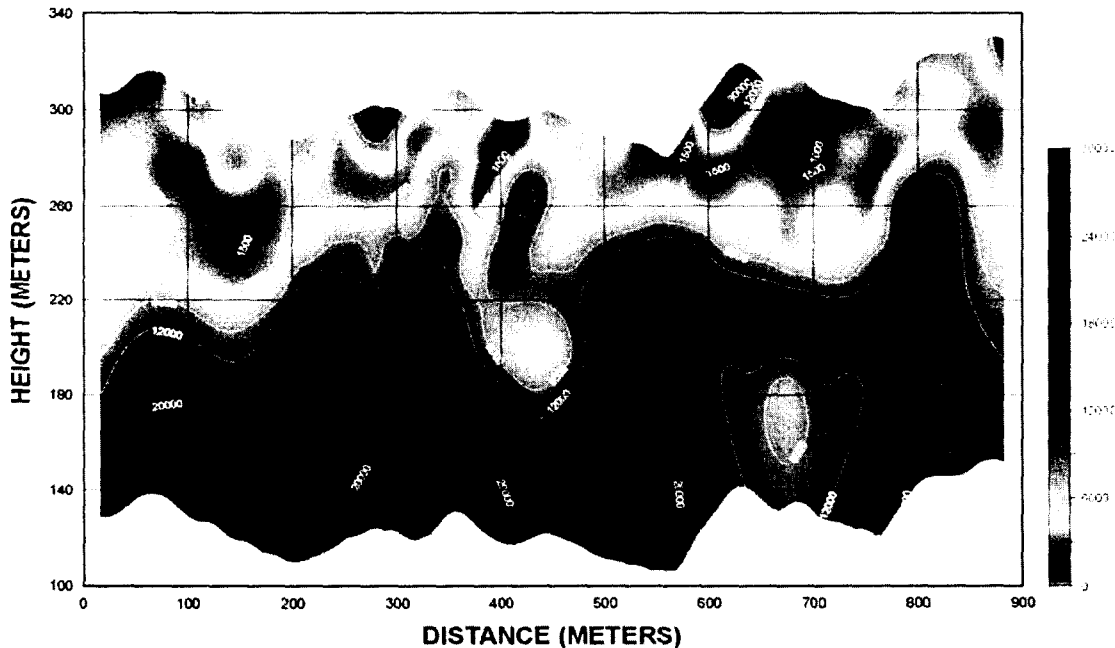


그림 4. 남서-북동 방향으로 배열한 측선의 전기비저항 분포

## 6. 참고문헌

1. 이학수, 김경현, 한지영, 김상현(2001) "수치 지형인자를 활용한 토양수분분포 예측" 한국구수자원 학회논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 391-401.
2. 한지영(2003) "토양수분 예측을 위한 수치지형 분석과 동역학적 습윤지수의 개발" 부산대학교 공

학석사 학위논문, 71p.

3. Ambrose, Beven and Freer(1996) "Toward a generalization of the TOPMODEL concept : Topographic indices of hydrological similarity." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2135-2145.
4. Beven(1982) "On subsurface stormflow an analysis of response times." *Hydrological Science Journal*, Vol. 27, pp. 505-521.
5. Burt and Butcher(1985) "Topographic controls of soil moisture distributions" *Journal of Soil Science*, Vol. 36, pp. 469-486.
6. Wolock and Price(1994) "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model." *Water Resources Research.*, Vol. 30, No. 77. pp. 3041-3052.