



연구 지역은 경상남도 양산시 상북면 상삼리 일원으로 양산단층의 서부에 위치한다. 양산단층은 한반도 동남부에서 북북동-남남서 방향의 선상으로 200km에 걸쳐 연장 발달하고 있다. 단층의 지형적 특징은 직선상의 단층곡을 형성하며 곳에 따라 넓은 파쇄대를 수반하며, 단층면은 경사는 수직의 분포를 보여준다(Um and Reedman, 1975). 양산단층은 대체로 우수주향이동(dextral strike-slip)의 단층운동을 하였던 것으로 알려져 있다(그림 1).

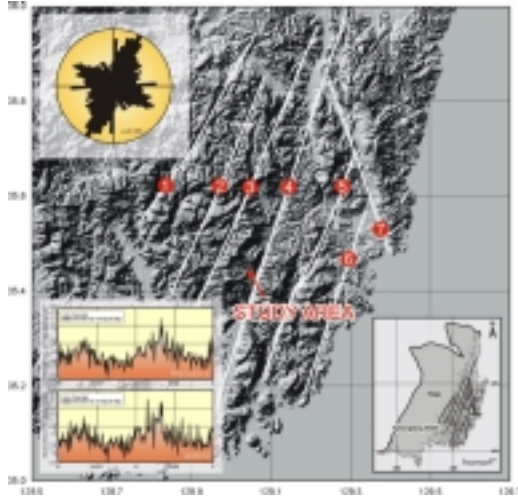


그림 1. 양산단층계의 음영도

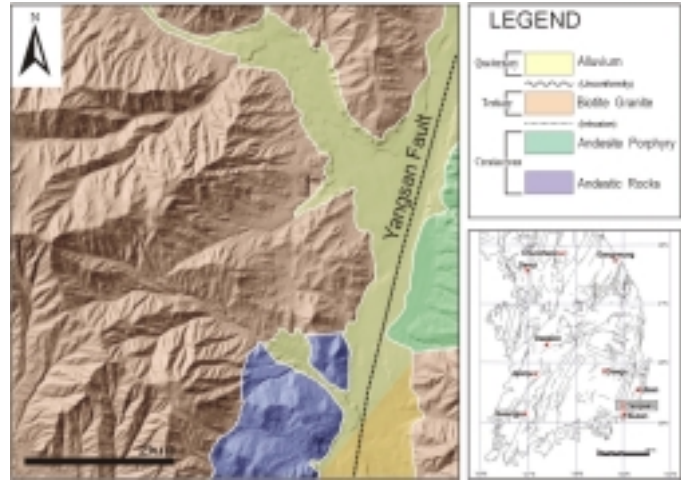


그림 2. 연구지역의 위치와 지질

대상지역의 면적은 약 12,6753,000 m<sup>2</sup>이며, 구성 암석은 경상계 유천층군의 화산암류와 백악기말에서 3기초에 형성된 흑운모화강암이 분포한다(그림 2). 산지의 모양은 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향의 계곡을 경계로 배열되어 있다. 대상구역 내에서 수계는 격자상을 가지며 수계의 흐름 방향은 양산천(양산단층의 방향)과는 다른 방향을 보인다 (그림 3).

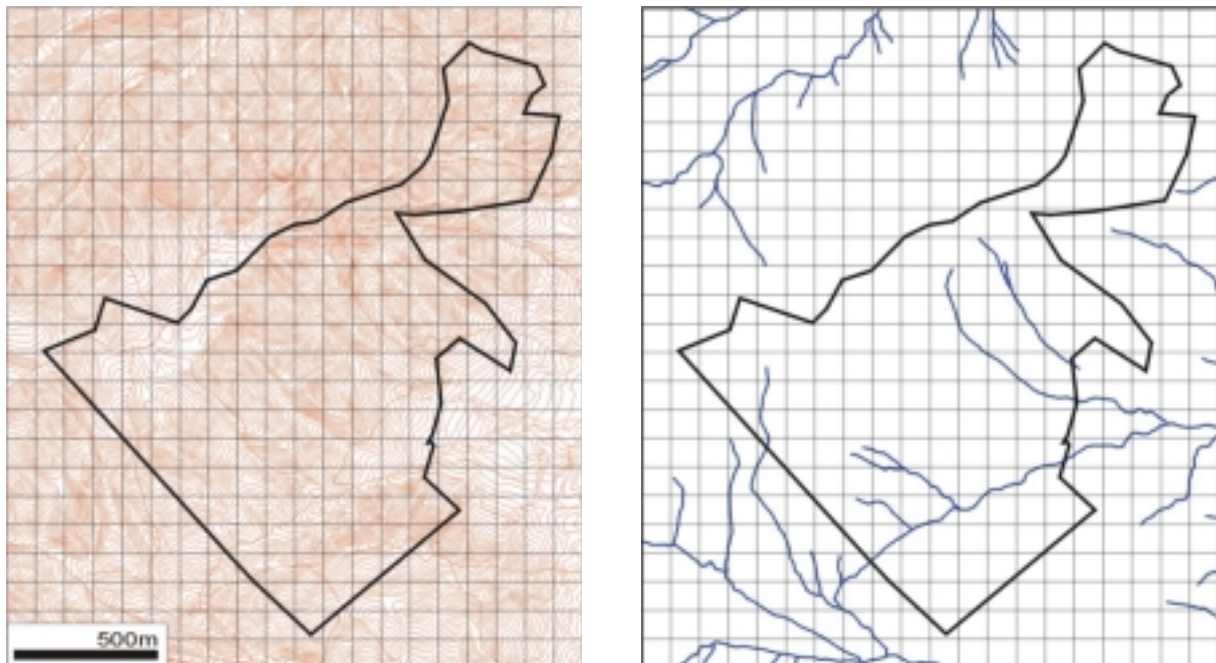


그림 3. 연구지역의 산계(좌) 및 수계(우)

### 3 연구방법

#### 3.1 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.

#### 3.2 습윤지수를 이용한 국소 지역의 포화 정도 산정

유역에서 물의 흐름이 정상상태이고 지하수면의 경사와 지표의 경사가 같다고 가정하면 Darcy의 법칙은 식(1)과 같고 양변을  $C_i$ 으로 나눠주면 식(2)가 된다(Beven and Kirkby, 1979).

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

- |       |                               |                |                     |
|-------|-------------------------------|----------------|---------------------|
| $Q_i$ | : 지점에서 횡방향 유출                 | $C_i$          | : 흐름을 가로지르는 등고선의 길이 |
| $R$   | : 지하수층으로 배수되는 유출량             | $T_i$          | : $i$ 지점에서의 포화 투수계수 |
| $z_i$ | : 지표에서 포화지점까지의 깊이             | $\tan \beta_i$ | : $i$ 지점에서 경사       |
| $A_i$ | : $i$ 지점으로 배수될 수 있는 상부사면 기여면적 |                |                     |

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

지표면하에서 수리 전도도의 분포는 다양한 경향성을 가지며(Ambroise 외, 1996) 수리 전도도가 지표면으로부터 지수함수적으로 감소한다고 가정하면 지하수위  $z_i$ 에서 전체 토양층 깊이  $z_D$ 까지 적분함으로써  $T_i$ 를 계산할 수 있다(Beven, 1982).

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

- |       |                   |     |        |
|-------|-------------------|-----|--------|
| $K_0$ | : 지표면에서의 수리 전도도   | $f$ | : 감소계수 |
| $z$   | : 지표에서 포화지점까지의 깊이 |     |        |

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

$z_D$ 값은  $z_i$ 값에 비해 매우 크기 때문에  $\exp(-fz_D)$ 값은 0으로 둘 수 있고 식(3)은 간단히 변형될 수 있다. 그 결과를 식(1)에 대입하고 식(5)를 지하수위  $z_i$ 에 대해 정리하면 식(6)이 된다. 식(6)을 유역의 면적에 대해 적분하면 식(7)과 같이 유역평균에 대한 지하수위를 계산할 수 있다.

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

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

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

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

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

#### 4. 연구결과

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.

습윤지수는 흐름을 결정하는 인자를 지형으로 가정하여 유도한 것이며, 물리적, 화학적 풍화에 의한 암석의 파쇄는 습윤정도에 따라 달라진다는 사실에 기초한 것이다. 단위 강우가 지속된다는 가정 하에서, 습윤지수의 분포는 상부사면으로부터 받을 수 있는 흐름을 양으로 나타나며, 흐름 정도로 수분의 포화정도를 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 표현되지 않는 일시적인 수계를 표현할 수 있으며 이를 이용하여 국소지역의 포화정도를 산정함으로써 암석의 물리적 풍화와 함께 화학적 풍화가 집중되는 단열대와 물의 수렴으로 재해가 발생할 수 있는 지역을 예측하는 정보를 제공할 수 있다.

구축된 DEM으로부터 음영도(그림 4의 a), 경사도 (그림 4의 b)를 계산 후, 흐름분배 알고리즘을 이용하여 설정된 격자별로 상부사면의 기여면적(그림 4의 c)과 습윤지수(그림 4의 d)를 계산하였다. 경사도는 경사비를 %를 나타낸 것이며, 상부사면 기여면적은 각 격자에서 결정된 상부로부터 받을 수 있는 격자 면적을 자연대수로 취한 값이다.

그림 4에서 높은 습윤지수가 나타나는 부분(포화대)은 북서-남동 및 북동-남서방향의 선형으로 나타나며, 빈도에서 북서-남동 방향이 우세하다. 수지상으로 분기되는 소규모의 지류는 북서-남동 방향의 수계로 수렴된다. 높은 습윤지수를 가지는 지점은 강우시 주변에 비해 수분의 포화정도가 높은 지점으로

물에 의한 암석의 풍화가 용이한 조건을 가진 부분에 해당한다.

포화대의 발달 방향은 북북동-남남서 방향의 양산단층(그림 1)과 다른 방향을 지시하며, 양산단층을 우향이동의 단열로 볼 때 운동성격이 상이한(antithetic) R-공역전단단열의 방향에 해당한다. 연구지역에서 습윤지수에 의해 예상되는 포화대의 방향은 양산단층과 같은 대규모 단층운동에 수반된 전단단열의 방향으로 배열되며, 대규모 단층에 인접한 지역의 경우라도 국소지역의 단열은 대규모 단층과 상이한 방향성을 가질 수 있음을 보여준다.

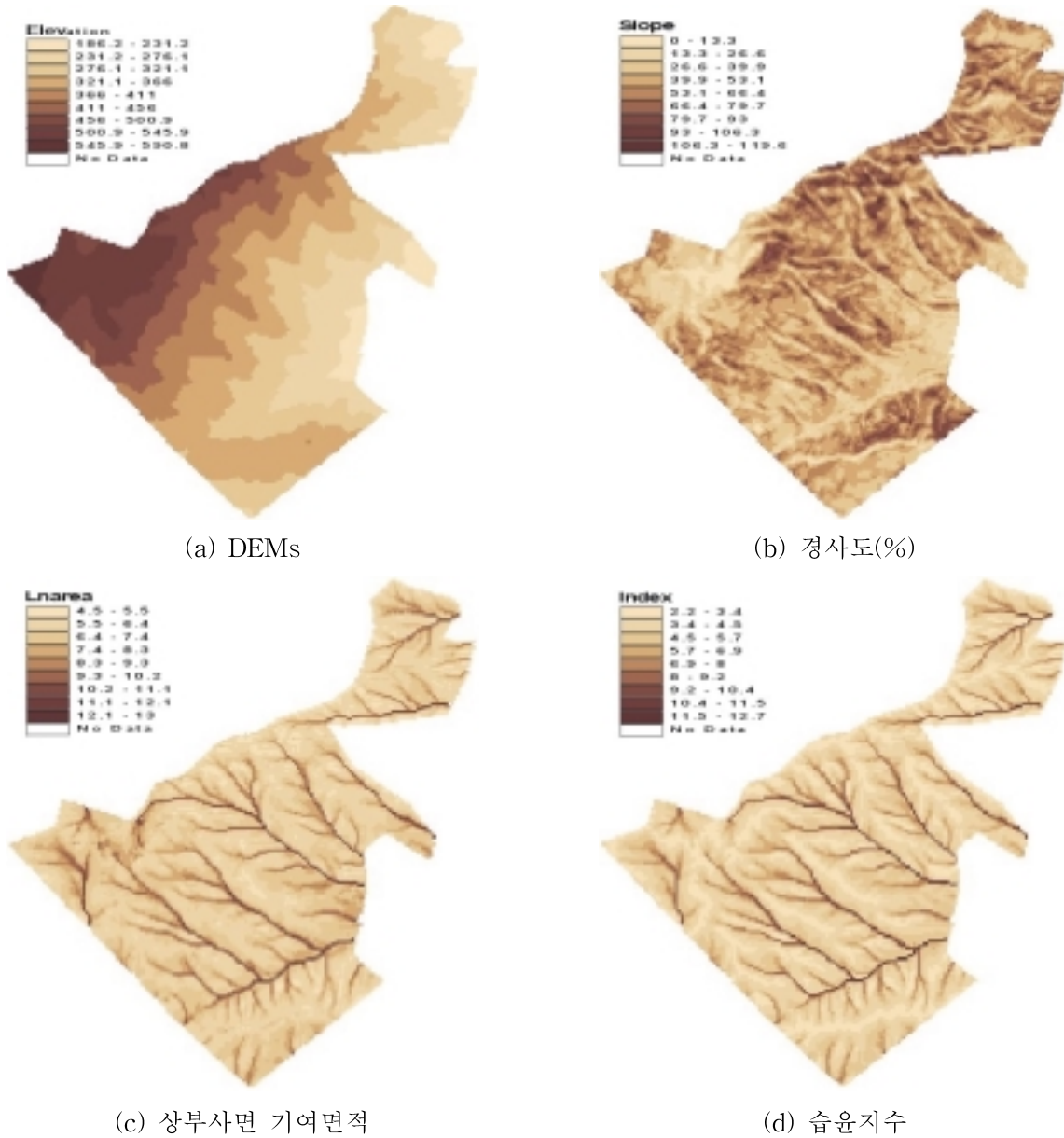


그림 4. 연구지역의 경사도, 상부사면 기여면적, 습윤지수

그림 5와 그림 6은 연구지역에서 남서-북동 방향과 남-북 방향으로 전개한 축선의 전기비저항분포를 나타낸 것이다. 그림 5는 포화대를 교차하는 축선의 결과로 150m, 380m, 600m, 700m 지점에서 보이는 저비저항 이상대의 위치는 선형의 높은 습윤지수가 관찰되는 지점과 일치한다. 그림 6은 포화대와 평행한 축선의 전기비저항을 나타낸 것으로 상부지층은 낮은 전기비저항을 지시한다. 암석의 낮은 전기비저항은 높은 함수량에 의한 것으로, 암석의 단열대 및 화학적 풍화 정도가 높은 지역을 반영한다.

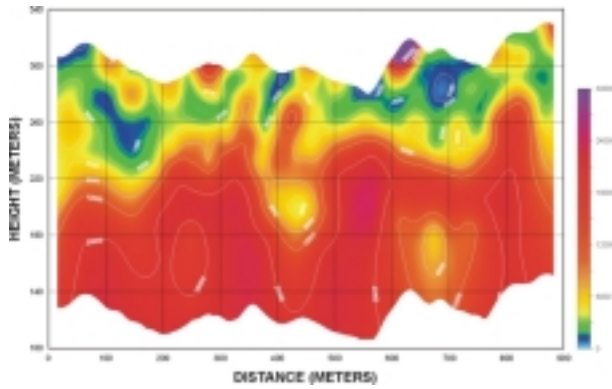


그림 5. 암석시료의 CIA 분포

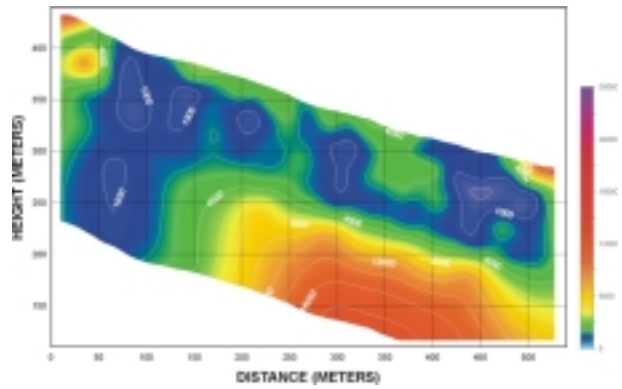


그림 6. 암석시료의 X-선회절분석 결과

## 5. 결론

대규모의 단층 주변에서 국소지역을 선정하여 습윤지수를 산정하고 그 분포를 고찰하였다. 습윤지수가 높은 부분은 선형으로 발달하며 방향성은 대규모 단열의 방향과 상이하하며, 단층운동에 수반된 전단 단열의 방향과 일치한다. 이러한 결과는 국소지역의 경우 국지적인 지질이나 지형 등의 조건에 따라 상세한 단열의 분포가 달라지는 것으로 해석된다. 국지적인 지역에서 습윤지수는 암석의 안정성을 저감하는 단열대의 구분과 재해가 발생 가능 지역을 예측하는 방법이 될 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

- 1 이학수, 김경현, 한지영, 김상현(2001) “수치 지형인자를 활용한 토양수분분포 예측” 한국구수자원학회논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 391-401.
- 2 한지영(2003) “토양수분 예측을 위한 수치지형 분석과 동역학적 습윤지수의 개발” 부산대학교 공학석사 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. Um, S. H. and Reedman, A. J. (1975) Geology of Korea. Geology and Mineral Institute of Korea, 139p
7. 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.