

## GIS와 지구통계학을 이용한 충주호 남부지역의 광역적인 사면안정평가

문상기\* · 이영훈\*

### Regional Evaluation of Slope Stability by Using GIS and Geostatistics Around the Southern Area of Chungju Lake

Sangki Moon\* and Younghoon Lee\*

**ABSTRACT:** Regional evaluations of slope stability by the failure criterion and by environmental geological factors were conducted. The failure criterion is the general conditions for plane failure which consider the geometrical conditions between geological discontinuities and topographical slope planes. The factor focused in this condition is dip and dip direction. Geostatistics, named semivariogram was used for establishing structural domains in slope stability evaluation by the failure criterion. The influential range was calculated to 6 km in the case of dip direction of dominant joint set and 7 km in the case of dip of the same dominant joint set. Then applying this failure criterion to the study area produced a slope stability map using the established domains and slopes generated by TIN module of ARC/INFO GIS. This study considered another regional slope stability analysis. 5 failure-driven factors (the unstable slope map, geology, engineering soil, groundwater, and lineament density) were selected and used as data coverages for regional slope stability evaluation by geoenvironmental factors. These factors were weighted and overlaid in GIS. From the graph of cumulative area (%) and instability index, finding critical points classified the instability indices. The most unstable slopes are located in the southern area of Mt. Eorae, Dabul-ri, and the eastern area of Junkok-ri in the first evaluation and around the Joongchichi and the Kyeranchi. The expected type of failure in the latter two area is plane failure. Also, the expected orientations of failure are 59/338 and 86/090 (dip/dip direction).

#### 서 론

자연사면들의 붕괴는 대개 여러개의 환경지질학적 요인들의 복합적인 연계에 의하여 초래된다. 특히 절취사면까지도 포함한 모든 사면붕괴에 있어서 불연속면의 기하학적 형태가 기여하는 정도는 다른 요인들 가운데서 가장 지배적이다. 따라서 사면안정평가에 있어서 불연속면의 중요성에 대한 인식과 함께 이의 정량적인 평가가 필요하다.

다수의 사면불안정요인들의 복합적인 적용과 광역적인 연구지역에 사면안정평가를 실시할 때 GIS (Geo-

scientific Information System) 는 효과적인 기법으로 인정받고 있다. 김윤중 외 (1992)는 서울 근교 지역에서 사면의 모양, 암상, 지하수 상태, 토양 특성, 강우, 식생을 GIS 내에서 통합하여 사용하므로써 광역적인 사면안정평가를 실시하였다. 이사로 (1992)는 청주지역을 대상으로 사면경사, 사면방위, 암질, 토질, 식생분포와 토지이용현황을 사면붕괴 발생요인으로 선정하고 GIS 와 영상처리시스템을 이용하여 광역적인 사면안정평가를 실시하여 재해발생 예상도 (hazard map)과 재해피해 예상도 (risk map)를 작성하였다. 사면붕괴 발생 요인 중 매우 중요한 위치를 차지하는 지질학적 불연속면들을 고려한 연구들로서 신현준 외 (1996)는 원격탐사와 GIS 를 이용하여 충주지역에 대한 사면안정평가를 실시하였는데 LANDSAT 위성의 TM 센서가 포착한 영상에 대

\* 연세대학교 지구시스템학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134 Shinchondong, Seoul 120-749, Korea), Email; skmun@ysgeo.yonsei.ac.kr

하여 몇가지의 영상처리를 수행해서 지질학적 선구조를 추출하였고 이 선구조를 바탕으로 지질학적 구조구를 생성하였다. 원종석 외 (1997)는 다른 방식의 등급체계를 이용하여 원격탐사와 GIS를 이용한 광역적인 사면 안정평가를 이천 분지에 대하여 실시하였다. 문상기 (1996)는 야외에서 직접 조사한 절리자료들의 공간적인 분포로부터 상관성을 고려, 지질학적 구조구를 생성하고 지하수위 및 선구조 밀도분포 등 보다 많은 공학적 도면들을 중첩하여 충주호 북부지역에 대하여 광역적인 사면안정평가를 실시하였다. 사면안정평가지 사면의 안정성을 객관적으로 분류하기 위하여 정량적인 계산값으로서 안전율을 이용할 수 있다. 배현철 (1997)의 연구에서는 절취사면에 대한 절리값들의 공학적인 속성들을 조사하고 한계평형식을 이용한 수식의 입력값으로 사용하여 안전율을 구하고 이로써 사면의 안정성을 분류하였다. 또한 지구통계학적인 기법인 반베리오그램 (semivariogram)을 이용해서 불연속면들의 속성 중 절리압축강도 (Joint Compressive Strength; JCS)의 상관성을 분석하였다. 야외에 무수하게 존재하는 절리들을 분석할 때는 연구지역을 편의상 몇 개의 지질학적 구조구 (structural domain)로 나누어서 분석한다. 또한 절리들은 같은 성인에 의하여 발달한 절리군 (set)들이 존재하며 따라서 절리들 또한 수많은 지질학적 공간 자료들처럼 공간적인 상관관계 (spatial correlation)를 갖는다. 본 연구에서는 불연속면의 방향성 자료에 대하여 이러한 공간적인 상관관계를 규명하고 이를 기초로 하여 지질학적인 구조구를 생성하였다.

이 구조구를 이용하여 평면 파괴 및 썩기형 파괴에 있어서 Hoek와 Bray (Hoek and Bray, 1981) 가 제시한 파괴조건을 따라 사면 안정 평가를 실시하였다. 또한 연구지역에 분포하는 지질의 암상, 지형, 토질, 지하수위, 선구조 및 지질학적 구조구에 의한 공학적인 사면안정도를 복합적으로 연계해서 정성적인 방법에 의한 종합적 사면 안정 평가를 실시하였다.

본 연구의 대상 지역으로는 지질학적으로 변성암과 퇴적암이 함께 나타나고 지질구조가 복잡한 충주호 남부 지역으로 그 범위는 남북방향과 동서 방향 모두 대략 17 km 이다.

### Hoek와 Bray의 파괴 기준에 의한 사면 안정평가

Hoek 와 Bray 는 불연속면을 갖는 암반에서 사면이 평면상으로 혹은 썩기형으로 붕괴하는 조건을 다음과

같이 제시하였다. 즉, 토층이 절리면을 따라서 분리되려면 평면파괴의 경우

① 절리의 주향이 사면과 평행하거나  $\pm 20^\circ$  내외로 거의 평행하여야 한다.

② 절리와 사면의 경사방향이 일치하여야 하며 절리의 경사가 사면의 경사보다 작아야 한다.

③ 절리의 경사가 절리면의 마찰각보다 커야 한다.

썩기형 파괴는 상기의 평면 파괴와 같으며 다만, 한 절리면의 주향과 경사 대신 두 절리면이 만나서 이루는 교차선의 편각 (trend)과 복각 (plunge)을 대입한다.

상기 조건에서 ①, ①+②, ①+②+③으로 될수록 사면을 더욱 불안정하게 만드는 조건이며 조건이 많아짐에 따라 불안정한 사면의 수가 보다 안정한 사면의 수보다 적어진다.

연구지역의 사면은 벡터형 GIS 인 ARC/INFO 에 탑재된 TIN (Triangular Irregular Network) 에 의해서 발생하였다. 또한 마찰각은 야외에서 직접 조사한 절리면의 굴곡도 (roughness)와 변질도 (alteration)로부터 N. Barton 이 암반을 분류하기 위하여 사용한 Rock mass quality (Q)에서 사용한 식에 의하여 계산하였다.

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$$

RQD : Rock Quality Designation

J : Joint set number

$J_r$  : Joint roughness number

$J_a$  : Joint alteration number

$J_w$  : Joint water reduction factor

SRF : Stress Reduction Factor

여기서  $J_r/J_a$  는 interblock shear resistance 또는 마찰계수를 나타낸다 (Farmer, 1982). 즉, 절리면의 마찰각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_r}{J_a} = \tan \phi$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{J_r}{J_a} \right)$$

$\phi$  : friction angle of joint

각 지점에서 구한 마찰각은 그 지점들에 대한 Thiessen polygon 을 발생시킨 후 각 polygon 에 할당되어 대표값으로서 적용하였다 (Fig. 1). 한편, 절리

면의 주향과 경사는 야외에서 조사한 자료에 대하여 지질학적 구조구를 생성하여 각 구조구 안에 포함되는 값들의 평균값으로서 적용하였다. 이상에서 설명한

Hoek 와 Bray 의 파괴기준에 의한 사면안정평가시 불안정등급의 적용은 다음 그림과 같다 (Fig. 2).

**지구통계학**

Einstein 등 (Einstein *et al.*, 1979)이 언급했듯이 대부분의 공간 변수들은 어느 정도의 공간적인 상관 관계를 갖는다. 예를 들어 한 암석 절리면의 방향은 당연히 근처의 다른 것과 유사할 것이다. 이러한 특성을 보통 공간적인 상관관계라고 하는데 이는 확률변수가 공간상에서 자기자신과 상관관계를 갖는 것이다. 이러한 암반의 공간적인 상관관계를 모델링하는데 있어서 지구통계학이 성공적으로 사용되어 왔다 (Yu *et al.*, 1993).

1960년경, 광상 탐사의 최적화를 위하여 지구통계학이라는 새로운 방법이 대두되었다. 이것은 한 광상에

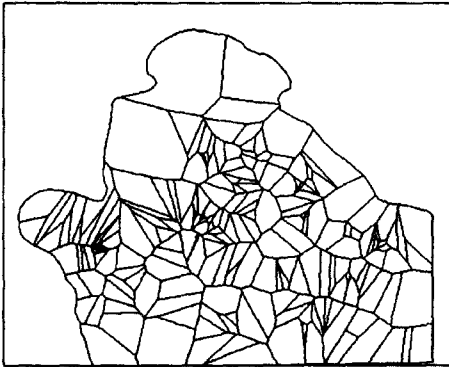


Fig. 1. Thiessen polygons for joint friction angle.

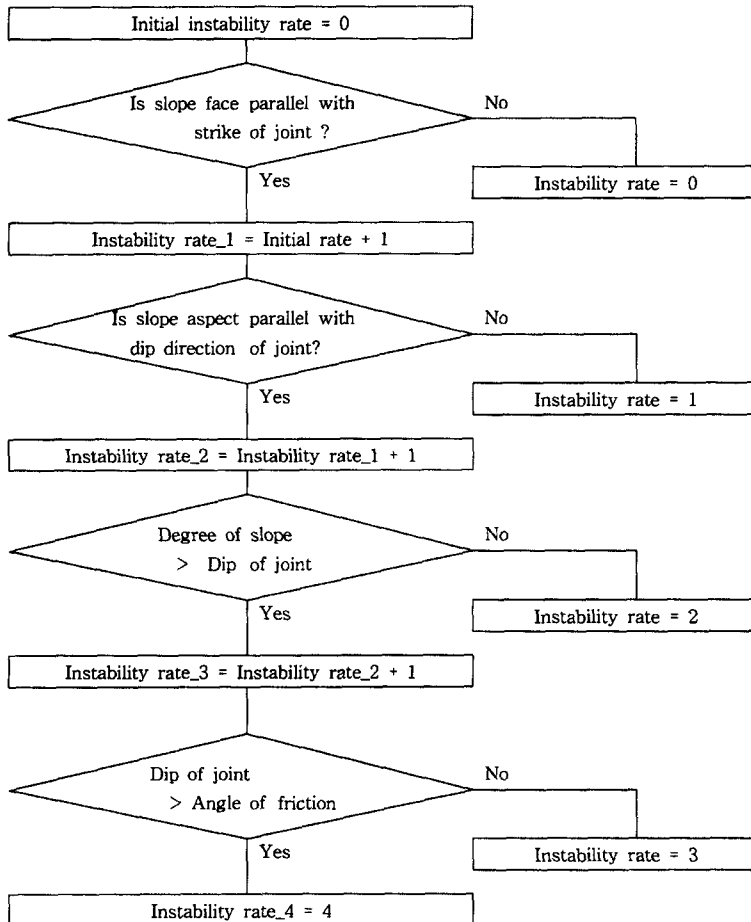


Fig. 2. Rating of unstable slopes by Hoek and Bray's method (1981).

서 광상광물의 등급에 대한 공간적 상관관계를 모델링하기 위한 것으로서 평균적인 등급을 추정하였다. Matheron은 상관관계를 연구하는데 성공적으로 사용되어왔던 광역변수 (regionalized variable)의 개념을 수식화하였다. 그는 semivariogram 함수  $\gamma(h)$ 를 사용하여 공간 자료의 연속성을 모델링하였다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2V} \iiint_V [f(M+h) - f(M)]^2 dV$$

V : geometrical field

h : the distance between the points in a specified direction

f(M) and f(M+h) : the values taken at points M and M+h

실제 계산에서는 위의 적분을 실행하지 않고 Miller (Miller, 1979)가 제안한 다음 식을 이용한다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i+h)]^2$$

$\gamma(h)$  : semivariogram to the distance h

h : the distance in the assumed direction

Z(X<sub>i</sub>) : the sample value at point X<sub>i</sub>

Z(X<sub>i</sub>+h) : the sample value at X<sub>i</sub>+h

N(h) : the number of sample pairs separated by distance h in the same distance

실험적인 semivariogram 을 구한 후에는 이론적인 모델에 의하여 그 자료점들을 근사화시킨다. 이 모델의 매개변수들은 상관관계의 특성을 정의할 것이다. Miller (Miller, 1979)는 거리에 대한 절리 간격의 공간적인 주기성을 보여주기 위해서 hole-effect model 을 사용

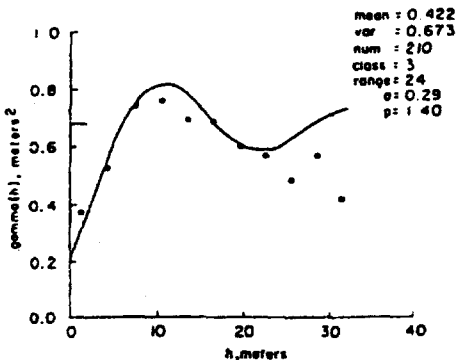


Fig. 3. Variogram of Fracture Spacing (from Miller, 1979).

하였다 (Fig. 3). 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = K \left[ 1 - \frac{\sin(ah+p)}{ah+p} \right]$$

K : sill value which is the average value of the cyclic portion of the semivariogram

a : constant that controls the x-axis shift

h : the distance apart in the computational direction

영향범위 (range)는 주기적인 부분으로부터 명백하게 떨어지는 자료의 h 값이다. 또 다른 모델은 구형모델 (spherical model)이다. Miller 는 이 모델을 절리 밀도, 간격, 그리고 경사 방향에 적용하였다 (Fig. 4~7). Fig. 3 은 절리간격에 대하여 공간적인 상관관계를 갖는 경우이지만 만약 공간적인 상관관계가 전혀 없다면, Fig. 5 와 같이 모든 자료가 한 점을 중심으로 요동할 것이다. 수학적으로 모델은 다음과 같이 표현된다.

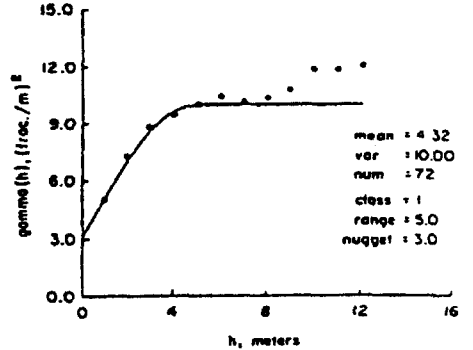


Fig. 4. Variogram of Fracture Density (from Miller, 1979).

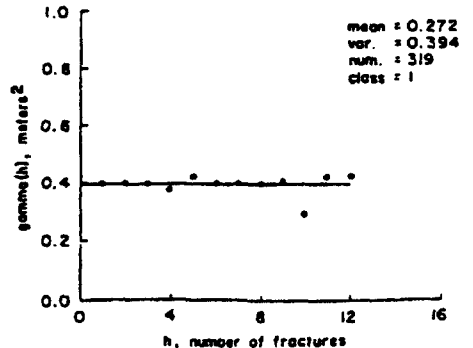


Fig. 5. Variogram of Fracture Spacing In the case of no correlation (from Miller, 1979).

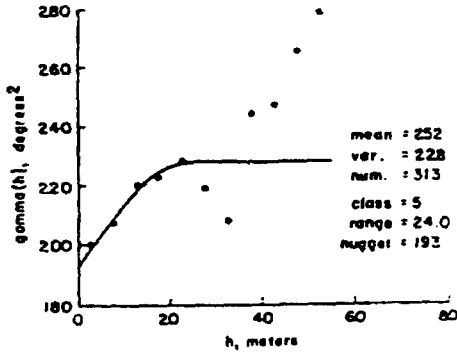


Fig. 6. Variogram of Dip Direction Referenced to Distance (from Miller, 1979).

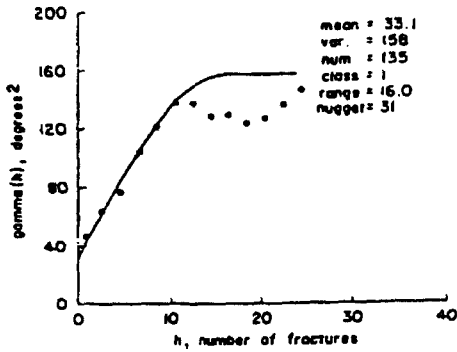


Fig. 7. Variogram of Dip Direction Referenced to Fracture Sequence Number (from Miller, 1979).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left( 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \frac{h^3}{a^3} \right) \text{ for } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ for } h > a$$

- $C_0$ : nugget value showing the randomness of the value at a point
- $C$ : the difference between sill and nugget values
- $h$ : the distance apart in the computational direction
- $a$ : the range showing the influence zone

공간적인 상관관계를 가질 때 만약 두 표본의 거리가 영향범위보다 크면 두 표본은 상관관계를 갖지 않는다. 본 연구에서는 지질학 연구에 가장 많이 사용되는 구형모델을 선택하여 적용하였다.

**지질학적 구조구**

수많은 절리들의 생성순서를 발견하기 위하여 처음

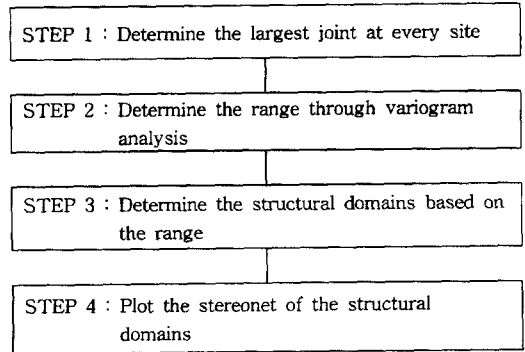


Fig. 8. Procedure of establishing structural domains.

에 광역적인 암석군들을 구조구로 세분하는 것이 중요하다. 여기서 구조구 각각은 자체의 절리계를 가지고 있는 것으로 사료될 수 있다. 절리계라는 용어는 하나의 주어진 구조구 안에 존재하는 모든 절리군들을 지칭한다.

구조구들은 지형적인 경계, 암상의 접촉면, 구조적인 세분 (subdivisions), 암층의 연대, 그리고 이러한 것들이나 다른 것들의 조합에 의하여 정해진다. 그 기준은 조사의 범위에 따라 다양하다. Nickelsen 과 Hough (1967)는 Pennsylvania 와 New York의 Appalachian Plateau 지역에 있는 절리들을 분석할 때 암상에 의하여 구조구를 세분하였다. Rehrig 과 Heidrick (1972)은 남부 Arizona 에 있는 Laramide 심성암체의 절리들을 분석하여 광화대 대 비광화대로 구조구를 만들었다. Jagnow (1979)는 절리의 방향이 터널의 방향 (trend)과 Carlsbad 동굴 안에 있는 작은 방들 (rooms)의 형태에 미치는 영향을 평가하기 위하여 동굴 구조에 기초하여 구조구를 세분하였다 (Davis, 1984).

본 연구에서는 연구지역에 분포하는 절리들 중 총 209 개 site 에서 조사한 절리들에 대하여 공간적인 상관관계를 기초로 지질학적 구조구를 생성하였다. 지질학적 구조구를 생성하기 위한 절차는 아래 그림과 같다 (Fig. 8).

Fig. 8 의 단계 1에서 가장 큰 절리라 함은 야외 조사시 빈도수가 크고 크기 또한 가장 큰 것을 의미하며 Fig. 8 의 단계 2를 위하여 사용한 지구통계학 프로그램은 상용 프로그램인 GEO-EAS 1.2.1 와 Stanford 대학교 응용지구과학과에서 개발한 GSLIB 이고 model fitting을 위하여 사용한 프로그램은 본 연구에서 개발한 SPHERI 라는 FORTRAN 프로그램이다. 단계 2의 분석절차는 Fig. 9 와 같고 연구지역의 절리

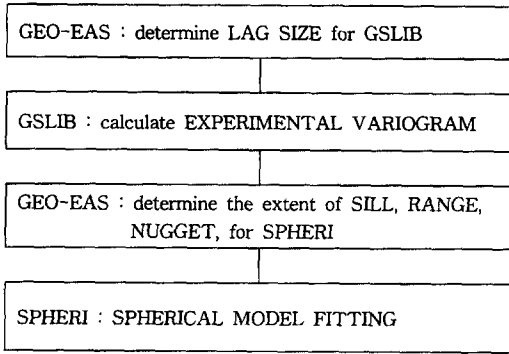


Fig. 9. Procedure of variogram analysis.

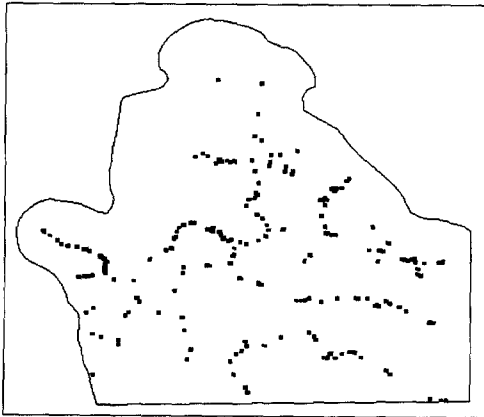


Fig. 10. Site map for getting joint data.

자료를 얻은 site 의 공간적인 분포는 Fig. 10 에 나타나 있다. GEO-EAS를 이용하여 입력 자료사이의 최대 거리에 대해서 lag 의 개수로 나눈 값에 해당하는 lag size를 구한 후 GSLIB 프로그램의 매개변수로 입력하였다 (STEP 1). GSLIB 프로그램으로부터 variogram을 구한 후 (STEP 2), 이 variogram 에 가장 적합한 모델의 근사치들을 알아내기 위하여 GEO-EAS 의 VARIOGRAM PLOT을 참조하였다 (STEP 3). 모델의 근사치들로부터 가장 적합한 모델을 결정하기 위하여 SPHERI 프로그램을 사용하였는데 이것은 experimental semivariogram 에 대한 구형모델을 결정하기 위하여 시행착오법과 적합도 ( $R^2$ ) 를 이용한 것이다. 모델의 근사치들에 대한 적합도를 계산하여서 이 중 1에 가장 가까운 것을 모델로서 선택하는 프로그램이다. 이 프로그램의 흐름도는 다음과 같다 (Fig. 11).

GSLIB 프로그램의 입력자료는 site 의 상대적인 x, y 좌표와 그곳의 속성자료에 해당하는 주절리의 경사와 경사방향을 포함한다. Table 1은 GSLIB 프로그램

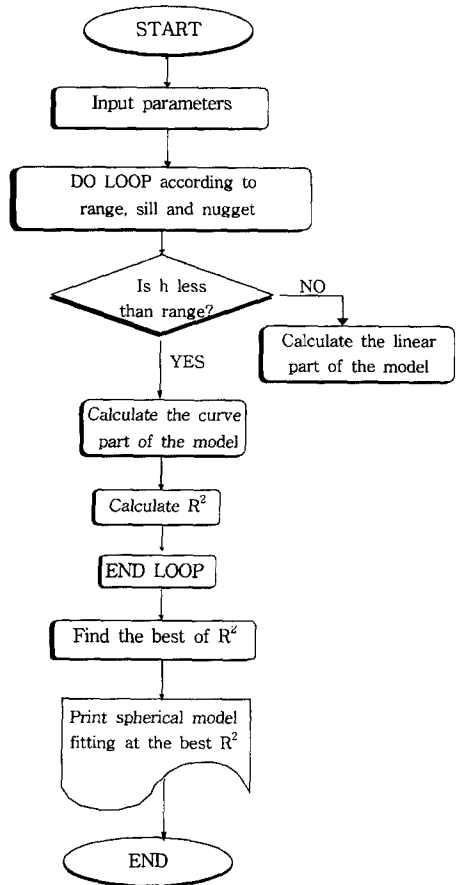


Fig. 11. Flowchart of spherical model fitting.

Table 1. An example of input file for GSLIB (gamv2).

Entire orientation data of joints					
4					//number of column
xco					//x coordinate
yc0					//y coordinate
index					//sample number
Dir1					//dip direction
299561	383088	56	5	50	//data
299405	382890	65	120	85	
299454	382692	77	100	67	
298152	377342	98	300	42	
- continued -					

을 위한 input file 중 경사방향에 대한 것이다.

Fig. 12 는 주절리의 경사방향과 경사각에 대한 각각의 experimental semivariogram (asterisk) 과 theoretical semivariogram (solid line) 이다. 이들의 매개변수들에 대하여 정리한 표가 Table 2 이다. 두 변수에

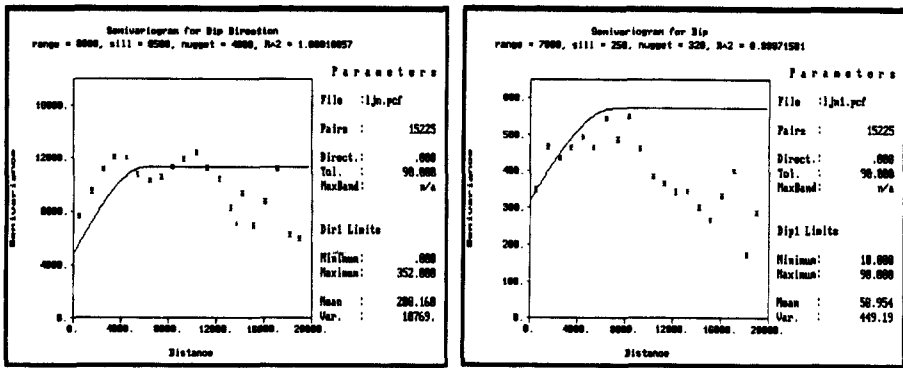


Fig. 12. Experimental semivariogram and spherical model fitting.

Table 2. Results of variogram analysis.

Parameters	Dip Direction	Dip
range	6,000 (m)	7,000 (m)
sill	6,500	250
nugget	4,800	320
R <sup>2</sup>	1.00016057	0.99971581

대하여 range 가 6 km 와 7 km로 얻어지는 것을 알 수 있으며 적합도가 1에 매우 가깝다. 한편, sill 에 대한 nugget 의 크기를 비교해볼 때 경사방향에 대한 nugget 이 경사에 대한 nugget 보다 상대적으로 크게 나타났음을 알 수 있다. nugget 은 일종의 모델의 error 에 해당하는 값이므로 이것의 효과가 더 크게 나타난 경사보다는 경사방향의 range 값을 더 신뢰할만 하다고 할 수 있다. 이들 range 의 값을 기초로 하여

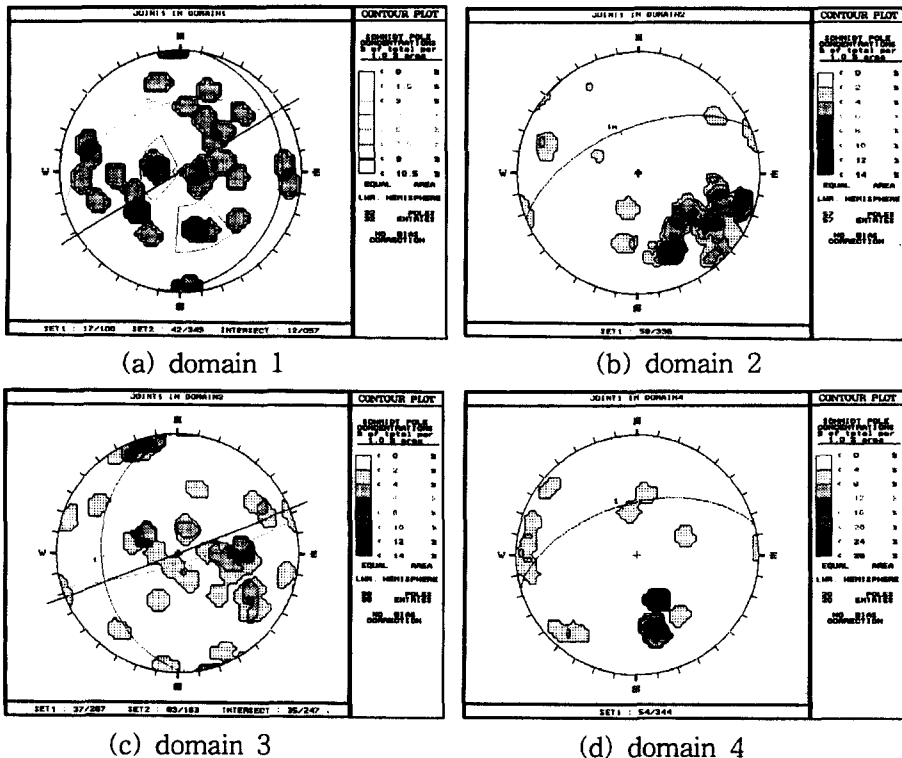


Fig. 13. Stereoplots of Structural domain 1-6.

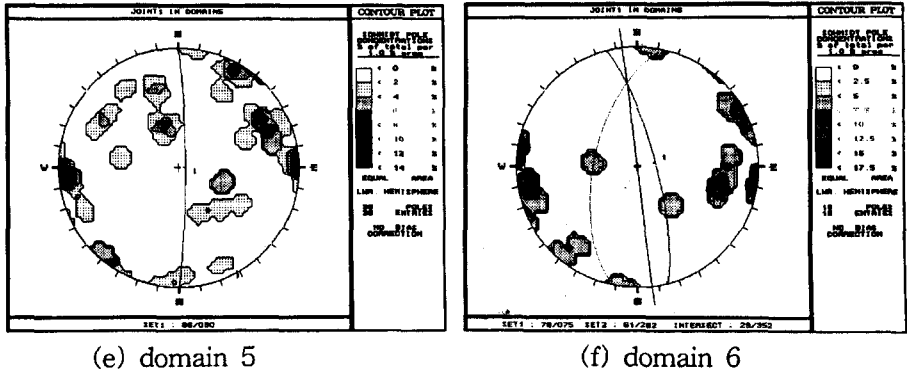


Fig. 13. Continued.

Table 3. Dip/Dip direction of structural domains.

Structural Domains	Dip/Dip direction
1	Set 1 : 17/100 Set 2 : 42/343 Wedge : 12/057
2	Set 1 : 59/338
3	Set 1 : 37/267 Set 2 : 83/163 Wedge : 35/247
4	Set 1 : 54/344
5	Set 1 : 86/090
6	Set 1 : 78/075 Set 2 : 61/282 Wedge : 29/352

연구지역에 분포하는 주절리들의 방향성이 유사한 것들을 모아서 지질학적 구조구를 생성하였다 (Fig. 13). 총 6 개의 구조구가 생성되었으며 구역 1, 3, 6 은 두 개의 우세한 절리군이 존재하고 나머지 3 개의 domain 은 한 개의 절리군만이 존재하는 것을 알 수 있다. 각 구조구의 절리계를 나타내는 절리군들의 방향이 Table 3 에 기록되어 있다.

이상에서 산출한 지질학적 구조구와 마찰각 및 사면들에 대해서 Hoek 와 Bray 의 사면파괴 기준을 적용하였고 이것들에 대한 도면이 Fig. 14 에 나타나 있다.

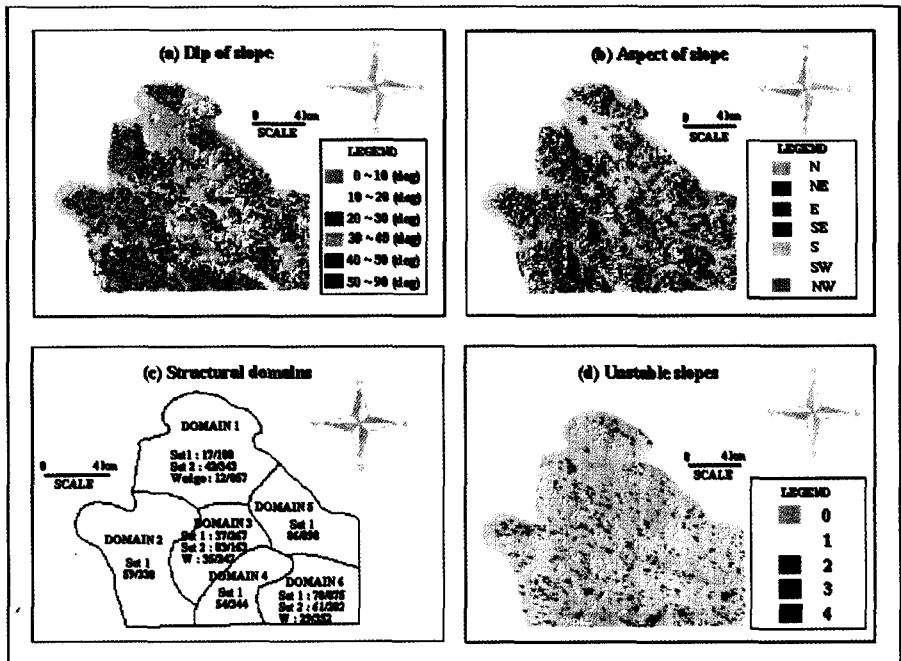


Fig. 14. Unstable slope map



**Table 4.** Instability index vs. number of slopes.

Instability index	Number of slopes	Percentage (%)
SCORE=0	50,297 개	85.76
SCORE=1	3478 개	5.93
SCORE=2	4297 개	7.33
SCORE=3	305 개	0.52
SCORE=4	275 개	0.46
계	58,651 개	100.00

Fig. 14a 에서 사면각은 주로 서편에서 높은 값을 가지며 북편 내지 중앙에 비교적 넓은 저경사대가 분포한다. Fig. 14b 에서 사면방향은 전체적으로 남서쪽 내지 북서쪽이 우세하게 나타난다. 지질학적 구조구의 크기를 보면 Domain 1 과 Domain 2 가 비교적 크고 Domain 4 가 가장 작지만 variogram 분석에 의한 영향거리 (range)인 6 km 내지 7 km 를 크게 벗어나지 않았다 (Fig. 14c). 결과도면을 보면 전체적으로

**Table 5.** Rating of (a) soil, (b) lineament density, (c) lithology, (d) depth to groundwater level (equipotential line) (a)

Instability rating	Soil
1	GP
2	SW
3	SP
4	SM
5	ML

(b)

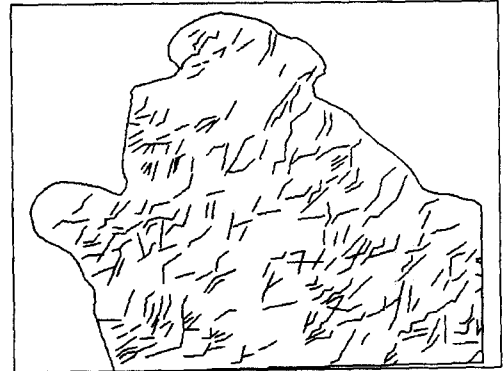
Instability rating	Lineament density
1	0.0~1.0
2	1.0~2.0
3	2.0~3.0
4	3.0~4.0
5	4.0~5.0
6	5.0~

(c)

Instability rating	Lithology
1	Limestone, Dolomite, Limesilicate
2	Slate, Amphibolite, Biotite granite, Sandstone
3	Gneiss
4	Chlorite schist, Phyllite

(d)

Instability rating	Depth to groundwater (mm)
1	914.4~1524.0
2	457.2~914.4

**Fig. 15.** Geological lineaments of this study area.

legend 에 나타난 불안정지수 (instability index)가 0 인 사면들이 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 Hoek 와 Bray 의 기준 중 첫 번째 기준인 절리면의 주향과 사면이  $\pm 20^\circ$  에서 평행하지 않은 것들을 의미한다. 그 밖에 불안정지수가 1과 2인 사면들은 거의 비슷한 수로 나타나며 3과 4인 사면의 수는 급격히 감소하고 있다 (Table 4). 이는 Hoek 와 Bray 의 기준 중 절리면의 경사각에 대해서 사면의 경사각이 크지 않기 때문인 것임을 알 수 있다 (Fig. 2). 불안정지수가 가장 높은 불안정 사면들은 주로 아래산 남부지역과 다불리와 전곡리 동부지역 중 산악지형에 분포하는 것으로 나타나고 있다.

### 환경지질정보에 의한 종합적 사면안정평가

본 연구에서는 환경지질정보에 의한 종합적 사면안정평가를 실시하였다. 본 연구에서 선정한 환경지질정보는 암상, 토질, 지하수위, 선밀도 그리고 위에서 평가한 Hoek 와 Bray 에 의한 불안정사면도이다. 각 환경지질정보에 대한 등급은 Table 5 와 같다. 토질은 정밀토양도 (농업기술연구소, 1978)를 공학적 목적에

**Table 6.** Rates and weights of selected factors in slope stability analysis.

Factors	Rates	Weights
Unstable slopes (from Hoek and Bray method)	0~4	6
Soil	1~5	5
Lineament density	1~6	4
Lithology	1~4	3
Groundwater	1~2	2

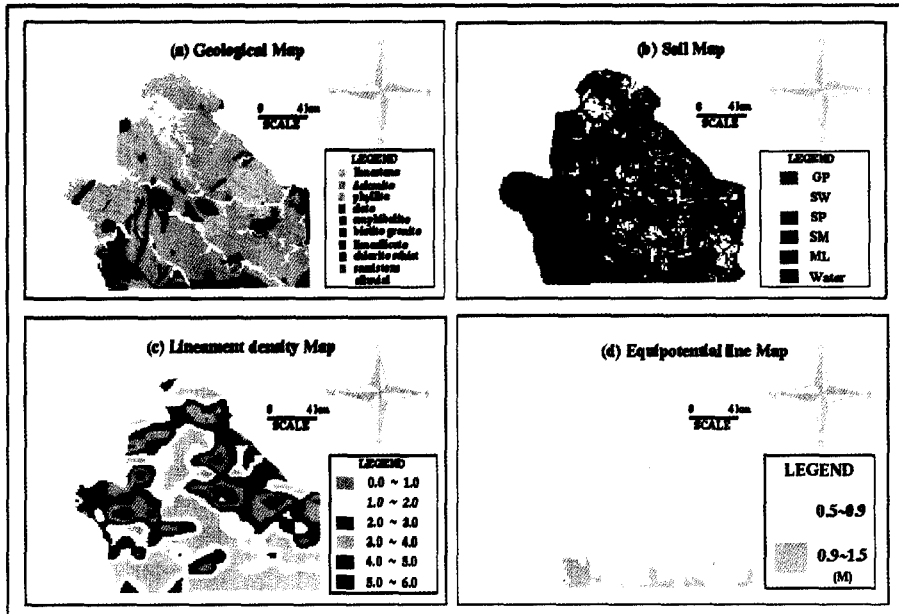


Fig. 16. Data coverages for slope stability analysis.

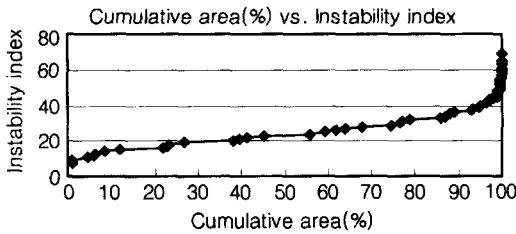


Fig. 17. Cumulative area (%) vs. Instability index.

사용되는 통일분류법 (United Soil Classification System, USCS)으로 재분류한 다음 토양의 silt와 점토의 함량, 투수계수, 기타 물리적 성질 등과 토양의 공학적 특성을 고려하여 사면붕괴에 기여하는 순서로 결정하였다 (Table 5a). 암상에 따른 불안정등급은 국내 지질분포에 따른 사면 붕괴 발생비 (건설부, 1989)를 참조하여 분류하였다. 연구지역의 지하수위에 대한 등급을 결정하기 위하여 수맥도 (농어촌진흥공사, 1983~1991)와 충주댐 관련 시추조사 자료 등을 이용하여 총 229 공에 대해 데이터베이스를 구축한 후 회귀분석법을 이용하여 연구지역의 지하수위를 전체적으로 분석하였다. 관계식은 다음과 같다.

$$wt = 0.9901852 \times s - 3.32505955 \quad \gamma^2 = 0.985$$

(s : 지표면의 고도, wt : 지하수위의 고도)

상관계수 ( $r^2$ )는 거의 1에 가까운 값을 보여주며 이 식

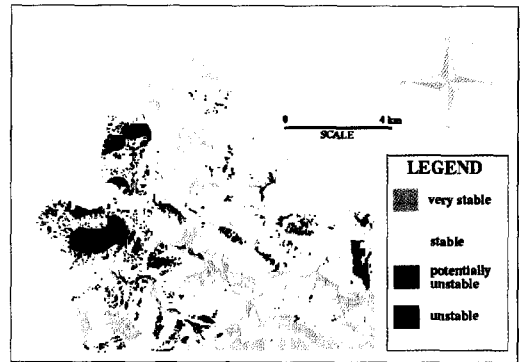


Fig. 18. Regional slope stability map.

을 이용하여 계산된 연구지역의 지하수 깊이 범위와 등급은 지하수위가 사면에 가까울수록 사면의 전단강도를 약화시킨다는 가정하에 Table 5와 같이 결정하였다 (Table 5d; 이사로 외, 1996). 선구조 밀도를 알기 위하여 우선 연구지역에 대한 LANDSAT 위성 TM 센서가 잡은 영상자료에 대하여 주성분분석 (Principal Component Analysis, PCA), 고역통과여과 (High Pass Filtering), 경계선 추출 및 강조 (Edge detection and enhancement)와 같은 영상처리 기법을 실시하여 연구지역에 분포하는 지질학적 선구조를 알아내었다 (Fig. 15). 그 후 연구지역에 1 km×1 km 크기의 격자를 설정하여 다음식에 의하여 선구조 밀도

를 계산하였다.

그리고 선밀도가 높을수록 불안정한 사면들이 존재할 확률이 크다는 가정 하에 선밀도에 대한 불안정등급을 결정하였다 (Table 5b). 사면불안정요인들이 사면 불안정에 미치는 영향은 각기 다르므로 각 요인에 대하여 상대적인 가중치를 결정해야만 한다. 우선 Hoek와 Bray에 의해서 구한 사면불안정도는 사면의 경사와 경사방향, 절리면의 경사와 마찰각 등이 함께 고려되었으므로 가장 높은 등급을 주었다. 암상, 토질 등은 본 지역의 환경지질학적 특성을 고려하고 기존 연구논문 (김윤종 외, 1991)을 참고하여 설정하였다. 선구조 밀도에 대한 가중치는 선구조에 해당하는 것들이 균열대, 연약대와 같이 암석에서 나타나므로 암상과 비슷한 가중치를 설정하였다. 지하수위는 회귀분석에 의해 추출한 것이어서 다른 요인들에 비해 부정확하므로 가장 작은 가중치를 부여하였다. 이상을 고려하여 설정한 요인들의 등급 범위와 가중치는 Table 6과 같다.

Fig. 16은 연구지역의 사면안정평가를 위해서 마련한 환경지질정보의 GIS coverage 들이다. 지질도를 보면 크게 서쪽에는 변성암에 해당하는 천매암류가 분포하고 동쪽에는 넓게 대석회암층과 돌로마이트층, 사암 일부 등 퇴적암이 분포하고 있다. 토층은 주로 통일분류법에서 사용하는 기호인 GP (Poorly graded gravels)가 매우 우세하게 나타나고 있다. 선밀도는 동서쪽 대칭으로 집중하고 있음을 볼 수 있으며 지하수위는 지표면 가까이 분포하여 사면에 보다 많은 영향을 끼치는 것으로 사료된다. 설정된 각 요소에 대한 불안정등급과 가중치로부터 각각의 사면들에 대하여 사면 불안정 지수 (Instability Index)를 다음과 같이 구하여 할당하였다.

$$\text{불안정 지수} = \sum (\text{요인별 불안정 등급} \times \text{가중치})$$

이 식은 불안정 지수가 클수록 그 사면은 더욱 불안정하여 붕괴가능성이 크다는 것을 의미한다. 이러한 불안정 지수를 각 사면에 할당하기 위하여 각각의 coverage의 속성값으로서 불안정지수를 입력하고 전체 coverage를 중첩 (overlay)시킬 때 가중치를 곱하였다. 이와 같은 방법으로 계산된 사면들의 불안정 지수에 대한 사면들의 누적분포면적비는 Fig. 17과 같다. 이 그림에 존재하는 변곡점 (불안정지수 14, 36, 44)은 사면들의 누적분포면적이 급격하게 감소 내지 증가하기 시작하는 불안정지수를 나타내므로 이 값들을 추출하여서 전체 사면들의 불안정도를 분류하는데 기준점으로 이용하였다. 이러한 최종 불안정 등급의 결

Table 7. Slopes in regional slope stability map.

Classified slopes	Number of slopes	Percentage (%)
Very stable slopes	10,451 개	9.13%
Stable slopes	90,058 개	79.47%
Potentially unstable slopes	10,174 개	8.89%
Unstable slopes	2,876 개	2.51%
계	114,462 개	100%

정방법은 기존 연구논문 (김윤종 외, 1990)을 참조하여 이루어졌으며 이들에 의해 전체 지수를 4등급으로 구분하여 최종 사면 안정도를 도출하였다 (Fig. 18).

광역적인 사면 안정도의 대부분은 안정한 사면으로 분류되었는데 이는 Fig. 17에서 변곡점에 따른 분포면적비의 너비가 가장 크기 때문이다. 전체 사면에 대한 각 분류된 사면들의 비율은 Table 7과 같다. 여기서, 파괴기준에 의한 사면안정평가 때보다 사면의 수가 증가된 이유는 여러 개의 환경지질정보를 담은 coverage들이 서로 중첩되었기 때문이다. 잠재적으로 불안정한 (potentially unstable) 사면들과 불안정한 (unstable) 사면들은 주로 천매암이 넓게 분포하는 서쪽 지역에 나타나고 있으며 동곡산 일대와 용곡리에서는 잠재적으로 불안정한 사면들이 집중적으로 분포한다. 한편 중치치 일대와 동부 퇴적암 지대의 계란치 일대에서 불안정한 사면들이 집중적으로 분포한다. 이 두 지역은 지질학적 구조구면에서 보면 각각 domain 2와 domain 5에 속하는 곳으로서 이곳에서 가장 큰 확률로 예상할 수 있는 파괴유형은 평면파괴이다 (Fig. 14). 또 그 파괴방향은 dip/dip direction으로 볼 때 각각 59/338과 86/090이 가장 우세할 것으로 예상된다 (Fig. 14).

## 사 사

본 연구는 1998년도 교육부 기초과학 육성연구비 (과제번호 98-015-D00273)의 지원에 의하여 이루어졌다.

## 토의 및 결론

본 연구에서는 GIS를 이용하여 Hoek와 Bray의 파괴기준에 의한 사면안정평가와 환경지질정보에 의한 종합적인 사면안정평가를 실시하였다. 각각의 평가에서 불안정한 사면은 전체 사면의 수에 대하여 0.46%와 2.51%인 것으로 나타났다. 여기서 전자의 평가 결과

로 나타난 불안정 사면들이 후자의 평가 결과에서 똑 같이 불안정한 사면들에 속하지 않은 이유는 환경지질 정보에 설정된 등급과 가중치에 의한 효과가 불안정 사면도의 가중치를 제일 높게 설정하였음에도 불구하고 그것에 의한 효과보다 더 크기 때문이다. 이는 불안정 등급과 가중치의 산정에 있어서 보다 객관적이고 통계적인 제시가 이루어지지 않아서인데 이는 향후 연구에서 계속 보완하고 발전시켜야 할 연구과제이다.

사면 붕괴를 유발시키는 직접적인 요인들 중에 강우를 빼놓을 수 없다. 특히 우리나라의 경우 우기시에 집중하여 사면 붕괴가 발생하고 있다. 만약 우기시에 clay seam 과 같은 연약면이 존재한다면 clay seam 은 많은 수분을 함유하게 되어 자연히 전단강도가 떨어지면서 사면의 sliding 면으로 작용할 수 있다. 그러므로 보다 더 사면 붕괴 확률이 높은 결과를 도출하기 위해서는 우기와 건기를 구분하여 사면안정성을 해석할 필요가 있으나 본 연구가 향후 더 자세한 연구를 위한 예비적인 연구라는 성격으로 인해 그 제한성을 가진다.

본 연구에서 실시한 충주호 남부 지역에 대한 두 가지 방법의 사면안정평가 결과는 서로 다르게 나타났다. Hoek 와 Bray 의 파괴기준에 의한 사면안정평가 결과 사면불안정도가 제일 높은 지역은 주로 어래산 남부지역과 다블리와 전곡리 동부지역 중 산악지형에 분포하는 것으로 나타났다. 또한 환경지질정보에 의한 종합적 사면 안정 평가 결과 중치치 일대와 동부 퇴적암 지대의 계란치 일대에서 불안정한 사면들이 집중적으로 분포하며 이 두 지역은 지질학적 구조구면에서 보면 각각 domain 2 와 domain 5 에 속하는 곳으로서 이곳에서 가장 큰 확률로 예상할 수 있는 파괴유형은 평면파괴이다. 또 그 파괴방향은 dip/dip direction 으로 볼 때 각각 59/338 과 86/090 이 가장 우세할 것으로 예상된다.

### 참고문헌

농업기술연구소 (1978) 정밀토양도. 농촌진흥청.  
건설부 (1989) 영산강수계 종합정비계획.  
이사로, 김윤중 (1996) DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험분석연구. 한국GIS 학회. v. 4, n. 1, p.1-11.

이사로 (1992) 지리정보시스템 (GIS)을 이용한 청주지역의 광역적 산사태 분석 연구. 석사학위 논문. 연세대학교 지질학과 대학원. p.1-61.  
김윤중, 김원영, 유일현, 박수홍, 백종학, 이현우 (1991) GIS 를 이용한 광역지질재해 (산사태) 분석연구.대한원격탐사학회. v. 7, n. 2, p.165-178.  
농어촌진흥공사 (1983-1991) 수택도 조사보고서.  
김윤중, 김원영, 유일현, 백종학, 이현우, 류중희. (1990) 쓰레기 매립장 부지선정을 위한 GIS 활용 연구. 대한원격탐사학회. v. 6. n. 2. p.135-151.  
이영훈, 김규상. (1996) 충주호 북부지역의 지질공학적 조사와 GIS를 이용한 인위절취 사면의 안정성 평가. 미 발표 논문.  
신현준, 이영훈, 민경덕, 원중선, 김윤중 (1996) 원격탐사와 지구정보시스템을 이용한 충주지역의 사면안정분석. 자원환경지질, 29권, 5호, p.615-622.  
원종석, 이영훈 (1997) 원격탐사와 지구정보시스템 (GIS)을 이용한 이천분지의 사면안정평가. 자원환경지질. 30권, 3호, p.241-248.  
문상기 (1996) 지구정보시스템 (GIS)을 이용한 충주호 북부 지역의 사면 안정 평가. 연세대학교 지질학과 대학원. 석사학위 논문. p.1-61.  
배현철 (1997) 지구정보시스템 (GIS)을 이용한 금수산 일대의 암반사면안정성 평가. 연세대학교 지구시스템과 학과 대학원. 석사학위 논문. p.1-68.  
Hoek, E. and Bray, W.J. (1981) Rock Slope Engineering. p. 37-63.  
Farmer, I. (1982) Engineering Behavior Of Rocks 2nd Ed. p.168-191.  
Einstein, H.H., Baecher G.B. and Veneziano D. (1979) Risk Analysis For Rock Slopes In Open Pit Mines. Final Technical Report for Bureau of Mines.  
Yu, Y.F and Mostyn, G.R. (1993) Spatial Correlation Of Rock Joints. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. p.241-255.  
Miller, S.M. (1979) Geostatistical analysis for evaluation spatial dependence in fracture set characteristics. Proc. 16th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. p.537-545.  
Nickelsen, R.P and Hough, V.D. (1967) Jointing in the Appalachian Plateau of Pennsylvania. Geological Society of America Bulletin. v. 78 p.609-630.  
Rehrig, W.A. and Heidrick, T.L. (1972) Regional fracturing in Laramide stocks of Arizona and its relationship to porphyry copper mineralization. Economic Geology. v. 67. p.198-213.  
Jagnow, D.H. (1979) Cvern development in the Guadalupe Mountains : Adobe Press. Albuquerque. New Mexico. p.55.  
Davis, G.H. (1984) Structural Geology of Rocks and Regions. p.339-340.  
Deutsch, C.V and Journel, A.G. (1992) GSLIB : Geostatistical Software Library and User's Guide.