

## 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 사면붕괴 위험도 평가를 위한 퍼지 이론과 계층분석절차 기법의 적용

최요순<sup>1)</sup> · 박형동<sup>1)\*</sup> · 선우춘<sup>2)</sup> · 정용복<sup>2)</sup>

### Application of Fuzzy Theory and AHP to Evaluate the Slope Instability at Pasir Open Pit Coal Mine, Indonesia

Yosoon Choi, Hyeong-Dong Park\*, Choon Sunwoo and Yong-Bok Jung

**Abstract** : A GIS model that combines fuzzy theory and Analytical Hierarchy Process (AHP) was developed to assess the slope instability in open pit coal mines. The model logic can consider 7 factors simultaneously (i.e., overall slope gradient, slope height, surface flows, excavation plan, tension crack, fault, waterbody) that influence the instability processes of open pit slopes. Using fuzzy membership functions, the normalized factor scores (0-1) which represent adverse affects of factors on slope stability can be assigned. The weight of each factor can be determined through the Saaty's pairwise comparisons, a part of AHP. Finally, the slope instability index (0-1) can be calculated by the weighted linear combination of normalized factor scores. The application at the Roto South in the Pasir open pit coal mine, Indonesia showed that the proposed model could make rational solutions to effectively manage the risk of slope failures.

**Key words** : Slope stability, GIS, Fuzzy theory, AHP, Open pit coal mine

**요약** : 본 연구에서는 퍼지 이론과 계층분석절차 기법을 접목하여 대규모 석탄 노천광산의 상대적 사면붕괴 위험도를 평가할 수 있는 GIS 분석모델을 제시하였다. 분석모델은 7개의 영향인자들(사면의 각도, 사면높이, 지표수 영향, 굴착계획, 인장균열, 단층, 배후 저수지)을 동시에 고려하여 채굴적 연약사면의 상대적 붕괴 위험도를 평가할 수 있다. 퍼지 소속함수의 정의와 계층분석절차 기법을 이용한 가중치 결정을 통해 전문가의 판단이 모델의 인자들을 정량화하는데 반영될 수 있으며, GIS 데이터베이스를 모델과 연계하여 활용함으로써 채굴적 전체 사면들에 대한 공간적 분포 개념의 사면붕괴 위험도 평가를 가능하게 하였다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 적용결과, 제시된 분석모델이 사면관리 대책수립을 위한 예비 사면붕괴 위험도 분석 도구로서 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 사면안정, 지리정보시스템, 퍼지 이론, 계층분석절차기법, 석탄 노천광산

## 서론

효율적인 노천채광을 위해서는 채굴적에 형성되는 사면의 높이와 각도를 경제적이고 안정성을 가지도록 설계하는 것이 중요하다. 경제성 측면에서는 가능한 채굴적의 최종 사면각을 가파르게 설계하여 폐석의 발생량을 최소화하는 것이 유리하지만, 가파른 최종 사면각이 가

져다주는 생산단가의 절감효과는 필연적으로 사면붕괴의 위험성을 동반하게 된다(Bye and Bell, 2001). 노천광산의 운영 단계에서도 주어진 사면 및 채광작업 조건에서 주기적인 모니터링과 사면관리를 통해 대규모 사면붕괴의 위험을 최소화하는 것이 중요하다. 이를 위해, 다양한 수치해석 프로그램들을 이용하여 노천광산 사면의 안정성을 평가하려는 연구들이 최근까지 다수 수행되었다(정소걸 등, 2000; 선우춘 등, 2004; Singh et al., 1995; Stead and Eberhardt, 1997; Merrien-Soukatchoff and Hadadou, 1997; Singh and Singh, 1999; Obara et al., 2000; Wang et al., 2000; Patnayak et al., 2002; Tosney et al., 2004; Singh et al., 2005; Kasmer and Ulusay, 2006). 그러나 수치해석을 통한 안정성 평가방법은 채굴

2008년 10월 10일 접수, 2009년 1월 19일 채택

1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

2) 한국지질자원연구원 지반환경연구본부

\*Corresponding Author(박형동)

E-mail: hpark@snu.ac.kr

Address: Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

적 사면의 일부 수직단면에 제한적으로 적용될 수 있어, 채굴적 전체 영역의 사면붕괴 위험도를 체계적으로 평가하기 어려운 한계가 있다(Jibson and Keefer, 1989). 수치해석 프로그램에는 대상지역 사면의 지반 물성 값이 입력되어야 하는데, 표본추출을 통해 획득한 일부 시료들의 암석역학 실험결과만으로는 채굴적 전체 사면에 대한 지반 물성 값의 공간적 분포를 결정하는 것이 어렵기 때문이다. 3차원 수치해석을 통해 채굴적 전체 영역에 대한 사면 안정성 평가를 수행한 사례가 있었으나(Cai et al., 2007), 일부 구간을 제외한 대부분의 영역에서 입력된 지반 물성 값들의 불확실성이 높아 평가 결과를 신뢰하기 어려운 한계가 있었다.

본 연구에서는 노천광산 채굴적 전체 영역에 적용 가능한 예비 사면붕괴 위험도 평가 방법으로서 상대적 사면붕괴 위험도라는 개념을 도입하고자 한다. 상대적 사면붕괴 위험도는 사면 불안정에 영향을 미치는 지형·지질학적 요인들의 공간적 분포를 고려하여 평가되며, 이때 집중호우, 지진 등 일시적으로 작용할 수 있는 외부요인들의 영향은 고려하지 않는다(Brabb, 1984). 현재 전 세계적으로 광역적인 산사태 재해관리를 위한 도구로서 널리 활용되고 있다(Hartlen and Viberg, 1988; Chacon et al., 2006). 상대적 사면붕괴 위험도 평가 방법은 크게 (1)통계학적 접근방법, (2)물리적 모델에 의한 접근방법, (3)정성적 접근방법으로 구분할 수 있으며(Xie et al., 2007), 분석 영역의 규모와 이용 가능한 자료의 종류, 개수, 품질 등에 따라 적절한 접근방법을 선택하는 것이 중요하다(Yalcin, 2008).

통계학적 접근방법은 과거 사면붕괴가 발생한 지점과 유사한 환경조건을 가진 곳에서는 사면붕괴가 발생할 확률이 더 높다는 가정을 기반으로 사면붕괴와 지형, 지질, 식생 등 영향인자들의 상호 연관성을 통계학적 기법을 이용하여 정량적으로 분석한다(Varnes, 1984). 빈번하게 활용되는 통계학적 기법으로는 빈도비(frequency ratio)(Lee and Talib, 2005; Lee and Pradhan, 2007), 로지스틱 회귀분석(Ohlmacher and Davis, 2003; Lee, 2005; Lee, 2007a), 인공신경망(Gomez and Kavzoglu, 2005; Ermini et al., 2005; Lee, 2007b), weights of evidence(Lee et al., 2002; Lee and Choi, 2004; Sharma and Kumar, 2008), 매트릭스 기법(matrix method)(Irigaray et al., 2007) 등이 있다. 그러나 분석결과가 통계학적으로 의미를 갖기 위해서는 충분한 개수의 자료를 필요로 하기 때문에, 사면붕괴 이력이 많지 않는 지역에는 적용하기 어려운 한계가 있다.

물리적 모델에 의한 접근방법은 질량, 에너지, 운동량 등의 보존법칙에 기초하여 모델을 구성한 후, 현장 또는

실내실험을 통해 획득한 지반의 물성 값을 입력하여 사면의 안전율을 산정하는 방법이다(Xie et al., 2007). 수치해석에 의한 사면 안정성 평가 방법도 물리적 모델에 의한 접근방법의 한 형태라고 볼 수 있다. 이러한 접근방법은 사면붕괴 위험도 평가 결과로 안전율 개념의 절대적인 수치를 제시할 수 있으나, 입력되는 지반 물성 값의 불확실성으로 인해 채굴적 전체 영역을 대상으로 적용하기 어려운 한계가 있다.

정성적 접근방법은 과거 사면붕괴가 일어난 지점의 지질·지형학적 특성을 전문가가 정성적으로 분석하여 사면붕괴의 요인을 추정하고, 이를 기반으로 붕괴가 발생하지 않은 다른 사면들에 대한 상대적 붕괴 위험도를 평가하는 방법이다(Yalcin, 2008). 이 방법은 사면붕괴 이력이 체계적으로 정리되어 있지 않은 노천광산 현장에 대해서도 적용할 수 있으며, 평가과정에서 지표지질조사를 통해 쉽게 관찰 가능한 현상들을 주로 고려하기 때문에, 비교적 저렴한 비용으로 신속하게 사면붕괴 위험도를 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 사면붕괴 위험도를 평가하는 과정에서 분석자의 주관적인 판단이 지나치게 개입될 수 있으므로, 대상지역 지질·지형과 사면붕괴 특성에 대한 지식과 경험이 많은 전문가가 평가를 수행하는 것이 바람직하다. 최근에는 다중인자 의사결정기법을 응용하여 전문가 판단의 주관적 요소를 객관적으로 정량화하는 반정성적 접근방법이 상대적 사면붕괴 위험도 평가시 활용되고 있다(Ayalew et al., 2005; Yalcin and Bulut, 2007; Akgun et al., 2008; Yalcin, 2008).

상대적 사면붕괴 위험도 평가는 주로 산악지형과 도로변의 토목사면을 대상으로 수행되어 다수의 적용사례들이 문헌상에 소개되었으나(Guzzetti et al., 1999; Chacon et al., 2006), 노천광산의 사면에 대해서는 그 활용도가 아직까지 높지 못한 실정이다. 노천광산 대상의 적용사례로서, Haneberg et al.(2005)는 정성적 접근방법을 적용해서 파푸아뉴기니(Papua New Guinea)의 Lihir 금광에 대한 상대적 사면붕괴 위험도 평가를 수행하였고, Nelson et al.(2007)은 로지스틱 회귀분석과 weights of evidence 기법을 이용한 통계학적 접근을 통해 칠레 Chuquicamata 동광의 사면 안정성을 분석하였다. Cai et al.(2007)은 중국 Shuichang 철광의 채굴적 일부 사면에 대한 안정성 평가를 위해 물리적 모델에 의한 접근방법을 적용하였다.

본 연구에서는 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로프 강남(Roth South) 채굴적에 대한 상대적 사면붕괴 위험도를 평가하기 위하여, 퍼지 소속함수(fuzzy membership function)와 계층분석절차(Analytic Hierarchy Process) 기법을 결합한 GIS 분석모델과 그 적용사례를 제시하고자 한다.

### 연구지역의 지질조건

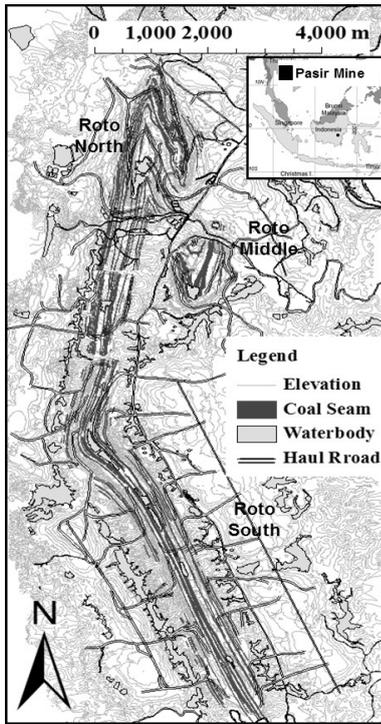


Fig. 1. Pasir open pit coal mine, Indonesia.

파시르 석탄 노천광산은 인도네시아 동칼리만탄(East Kalimantan) 발릭파판(Balikpapan) 서측 130 km 지점에 위치하고 있다(Fig. 1). 전체 광구 면적은 50,400 Ha로 서울시와 비슷한 크기이며, 약 11억톤의 유연탄이 매장되어 있는 것으로 추정된다. 현재 연간 생산량은 2050만톤 정도이다(Samtan, 2007).

Fig. 1은 파시르 노천광산 로토 광구의 광체 분포와 채굴적 개발 현황을 보여준다. 채굴적은 남북방향 16 km, 동서방향 7 km 범위로 분포하고 있다. 초기 지표수준을 170 ML로 보았을 때, 2008년 4월 현재 -100 ML까지 개발이 진행되었으며, 채탄은 스트립 방식으로 이루어지고 있다. 로토 광구의 강우량은 연평균 2500 mm이며, 우기인 11월부터 4월 사이의 강우량이 비교적 더 많다.

지질학적으로 로토 광구는 Warukin층에 위치하며 하상퇴적으로 생성된 신생대 제3기의 퇴적암류들이 유연탄 층을 포함하고 있다(Fig. 2). 현재까지 지질연대를 확정할 정도의 화석이 발견되지 않아 정확한 연대는 알 수 없지만, 중기 내지 후기 마이오세에 생성된 것으로 알려져 있다. 구조지질학적 측면에서는 남북방향 습곡축을 가지는 대규모 향사구조의 영향을 가장 크게 받았으며,

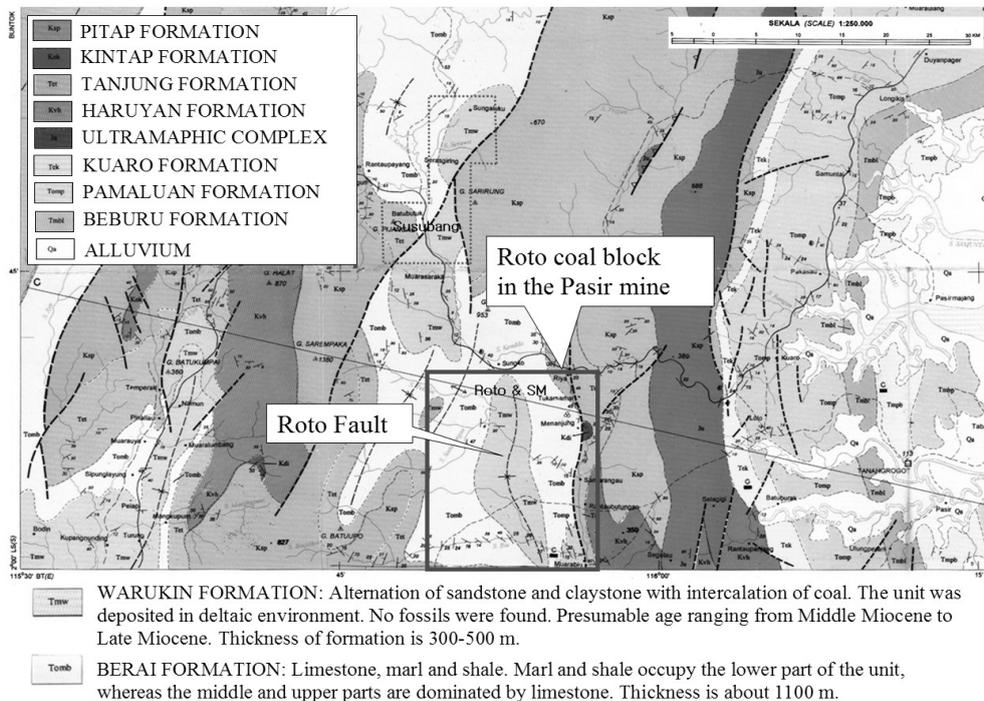


Fig. 2. Regional geological map of the Roto coal block.

로토 단층을 중심으로 동부와 서부가 서로 다른 퇴적암의 구성비를 보인다(이병주 등, 2001).

로토 광구는 남북방향의 상대적인 위치를 기준으로 로토 강북(Roto North), 로토 중부(Roto Middle), 로토 강남지역으로 구분된다. 본 연구에서는 로토 강남지역 채굴적을 연구대상지역으로 선정하였다(Fig. 3). 대상지역은 로토 강북지역 탄층의 서익부 연장선상에 위치하며,

채굴적은 남북방향으로 길게 연결된 S자 형태를 보인다. 퇴적암 층리의 주향은 북북서 방향으로 경사는 80°이상의 고각을 이루며, 서쪽으로 경사진 것과 동쪽으로 경사진 것이 있다.

### 사면현황 및 붕괴사례 분석

#### 사면현황

로토 강남지역은 효과적인 채광작업을 위하여 폐석장과 운반로의 분포에 따라 채굴적을 C-F 구간으로 구분하여 운영하고 있다(Fig. 3). Table 1은 연구대상지역의 구간별 암상의 구성비와 층리면의 발달 상황을 보여준다. C-4 구역 서측사면은 동측사면에 비해 석탄의 함량이 높은 편이며, 지층의 경사와 사면의 경사가 서로 방향을 달리하고 있다. 반면, D-2, E-1 구역은 동측사면에서 석탄의 함량이 높으며 사면과 층리의 경사가 서로 반대 방향을 향한다.

채광작업은 수직에 가까운 탄층들은 채탄하기 위해 탄층과 탄층사이의 암반을 제거하고, 노출된 석탄을 굴착기로 채탄하여 바로 트럭에 적재하는 순서로 진행된다. 발파로 탄층 주변의 암반을 이완시켜 암반 제거시 굴착 효율을 높이고 있으며, 이때 발생하는 발파진동은 대상지역의 연약사면 안정성에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 추정된다(선우춘 등, 2004).

채굴적의 사면은 대체적으로 소단폭 6 m, 소단높이 8 m, 소단각도 45°, 운반로의 폭 35 m, 최종 사면각 27°로 설계되었다(Fig. 4). 그러나 시공오차와 사면의 전체적 변형으로 인해 채굴적의 사면각은 구역에 따라 20-30° 범위로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 대상지역에는 연약한 지질조건, 채광작업으로 발생하는 주기적인 발파진동, 강우와 지표수의 영향에 의한 미고결 암석의 강도저하 등 사면 안정성에 불리한 조건들이 다수 존재한다. 특히 연약사면의 법면으로 흐르는 지표수는 협곡 생성의

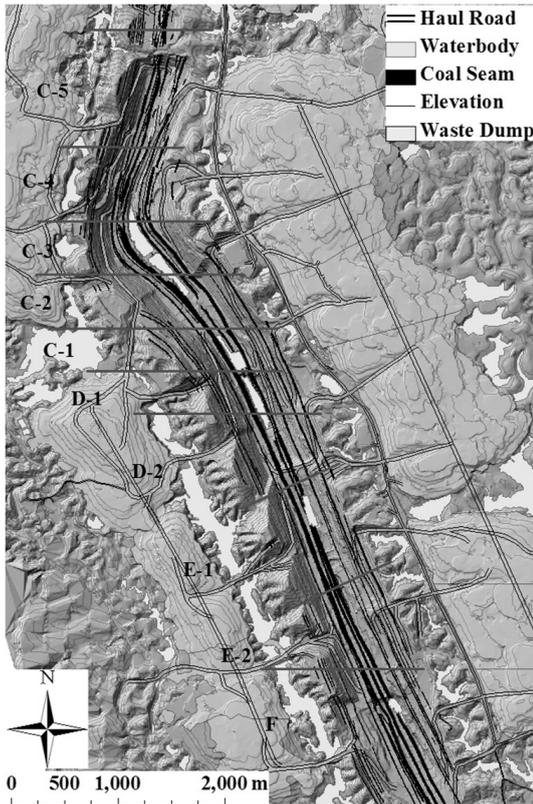


Fig. 3. Study area.

Table 1. Coverage area of sedimentary rocks and major bedding planes at several slope sections in the study area (after KIGAM, 2003)

Slope section		Mudstone	Sandstone	Coal	Dip/Dip direction of bedding
C-4	East	83.2%	14.9%	1.9%	87/255, 79/265
	West	76.0%	17.6%	6.4%	85/258, 84/270
D-2	East	81.1%	8.0%	10.9%	77/059, 70/068
	West	80.2%	14.5%	5.3%	81/063, 75/060
E-1	East	74.7%	17.1%	8.2%	85/080, 75/075
	West	55.0%	41.0%	4.0%	80/085, 75/075
E-2	East	87.7%	6.2%	6.1%	83/085, 75/075

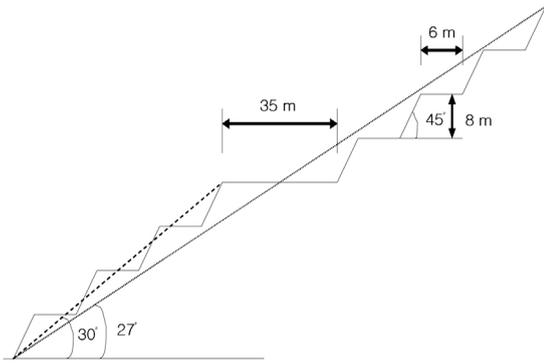


Fig. 4. Design of open pit slopes in the study area.

원인이 되어 사면의 불안정성을 가속시키고 있다(선우준 등, 2007). 사면 상부의 저수지, 침전조 등도 지하수 공급원으로 작용하여 사면의 안정성에 영향을 미치는 것으로 추정되며, 일부 지역에서는 사면의 전체적인 변형에 의해 다수의 인장균열들이 지층의 주향방향으로 발달하여 사면 안정성에 영향을 미치고 있다.

**사면 붕괴사례 분석**

대상지역에서는 2006년 10월, 2007년 5월, 2007년 6월에 각각 C-4 구역 서측사면, C-1,2 구역 서측사면, E-2 구역 동측사면에서 사면의 붕괴가 발생하였다. C-4 구역 서측사면의 경우 상대적으로 강우량이 적은 건기시 붕괴가 발생하였으며, 규모는 폭 30 m, 높이 20 m로 벤치 소단 2-3개 규모에 해당한다(Fig. 5(a)). 붕괴발생시 사면 하부에서 누수가 관찰되었으며, 상부 운반로에 천공한 발파공에서도 지하수가 확인되는 것을 볼 때 지하수면이 지표 근처에 형성되고 있는 것으로 추정된다. C-1,2 구역 서측사면은 발파굴착에 의해 사면하부의 집중강하가 진행된 후, 폭 300 m, 높이 70 m 규모의 대규모 붕괴가 발생하였다(Fig. 5(b)). 붕괴 발생 전 사면 상부에서 다수의 인장균열이 발생하는 붕괴조짐을 나타내어 C-1,2 구역에 대한 발파작업을 중단하였으나, 540 mm 누적량을 기록한 집중강우로 인해 붕괴가 발생했던 것으로 판단된다. E-2 구역의 동측사면은 하부굴착 진행 중 2-3개 소단 규모로 붕괴가 발생하였다(Fig. 5(c)). 느슨한 사암층에서 미끄러짐이 발생한 것으로 추정되며, 배후 저수지가 가까이 위치하여 사면의 지하수 공급원으로 작용했을 가능성이 높다.

**상대적 붕괴 위험도 평가모델 개발**

대상지역에서 이용 가능한 사면붕괴 이력 자료는 2006

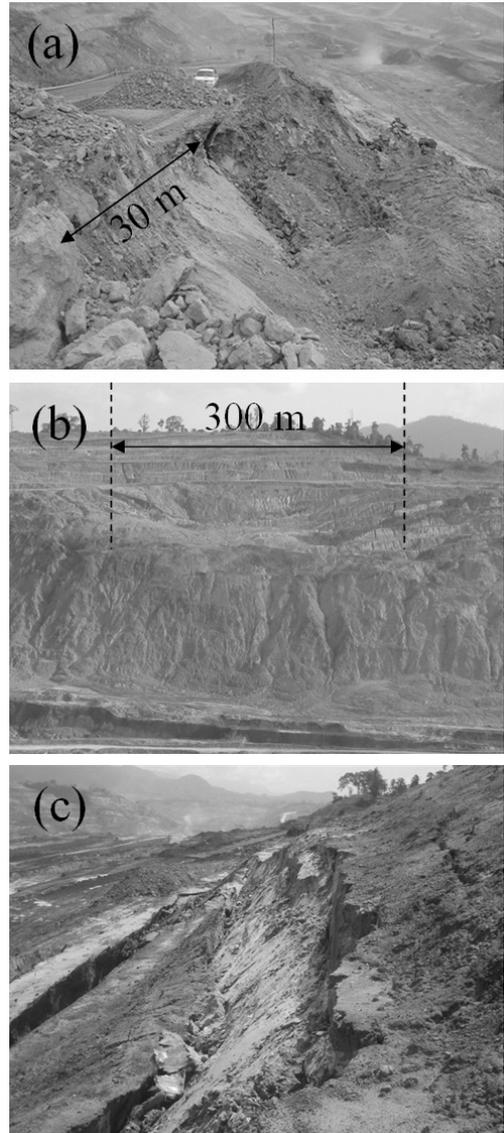


Fig. 5. Slope failures in the study area. (a) C-4 west slope (Oct. 2006). (b) C-1,2 west slope (May 2007). (c) E-2 east slope (Jun. 2007).

년 이후 기록된 3건이 전부이기 때문에 상대적 붕괴 위험도 평가를 위하여 통계학적 접근법을 채택하는 것은 어렵다. 또한 현장 여건상 채굴적의 모든 사면들에 대해 정밀 지반조사를 수행하는 것이 현실적으로 불가능했기 때문에, 본 연구에서는 최근까지 수행되었던 연구들(정소걸 등, 2000; 이병주 등, 2001; KIGAM, 2003; 선우준 등, 2004; 최요순 등, 2006; 최병희 등, 2006; 선우준 등, 2007)의 결과와 전문가의 지식과 현장조사 경험을 기반

으로 대상지역에 대한 상대적 사면붕괴 위험도 평가를 수행하고자 하였다. 평가모델의 구성에 있어서는 지표지질조사만으로도 비교적 쉽게 수집할 수 있고, 채굴적 전체적으로 정보의 불확실성이 낮은 자료들을 모델의 인자들로 우선 고려하였다.

### 영향인자 추출

대규모 노천광산의 상대적 사면붕괴 위험도를 평가하기 위해서는 사면재원뿐만 아니라 지질조건, 채광작업 등 다양한 요인들을 복합적으로 고려해야 한다. 예를 들어, 사면경사가 비교적 완만하다고 하더라도 사면 직하부에서 집중적인 굴착작업이 진행된다면 사면붕괴의 위험이 상대적으로 높아질 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 다음 7개의 요인들을 복합적으로 고려할 수 있는 사면붕괴 위험도 평가모델을 개발하였다.

- 사면경사: 일반적으로 사면경사가 급할수록 사면붕괴의 발생빈도는 높아진다(McDermid and Franklin, 1995). 사면경사는 지표수 및 지하수의 흐름 속도에 큰 영향을 미치며, 토양의 수분함수율, 표면침식, 토사류의 흐름 등 지형학적 환경변화에도 큰 영향을 미치기 때문이다.
- 사면높이: 사면높이와 사면붕괴 발생빈도간의 상관관계는 현재까지 명확히 규명되지는 않았다(Gomez and Kavzoglu, 2005). 그러나 사면높이가 증가할수록 사면길이도 근사적으로 함께 증가하며, 사면길이의 증가는 지표수에 의한 표면침식의 가능성을 높인다(Carrara et al., 1995). 노천광산의 경우 채굴적의 하부굴착이 진행되면서 사면의 높이가 증가하기 때문에, 사면의 높이 증가는 채굴적 하부의 발파·굴착 작업의 누적양과 관련된다고 볼 수 있다.
- 지표수 유출: 강우시 유출된 지표수는 연약사면의 법면을 따라 흘러내리면서 발파진동으로 이완된 연약암반의 변위를 일으키는 촉매로 작용하거나, 좁은 지역으로 집중되어 흐르면서 침식 및 세굴에 의한 협곡을 형성시킬 수 있다. 특히 약 80%가 이암인 대상지역은 물과 접촉시 팽창 현상과 습윤의 반복으로 건열이 발생하여 사면을 구성하는 암석의 강도저하가 나타날 수 있다. 경우에 따라서는 토석류를 발생시켜 사면의 붕괴를 일으키는 직접적인 원인이 되기도 한다(선우춘 등, 2007).
- 하부굴착: 하부굴착 작업시 발생하는 발파진동은 주변의 임시사면이나 영구적으로 유지해야 하는 최종 사면의 안정성에 영향을 준다. 특히, 대상지역에서 시행되는 일자유면 발파는 사면의 큰 변위를 발생시킬 수 있으며, 발파시 발생하는 지반진동도 사면의 안정성을

위협하는 주요 요인으로 볼 수 있다. 연약한 이암과 사암층으로 이루어진 연구대상지역의 지질특성상 채굴적 사면들은 대규모 발파로 인한 저주파 진동에 취약할 수 밖에 없기 때문이다(최병희 등, 2006).

- 인장균열: 사면상부에 발생된 인장균열에 지표수가 침투하면 수압으로 인해 하중이 증가하거나 균열 내에 작용하는 부력으로 인해 사면이 불안정하게 된다. 대상지역에서는 사면의 전체적인 변위로 인해 사면상부에서 다수의 인장균열들이 관측되고 있으며, 사면상단의 배수로를 따라서도 인장균열이 발생하고 있다.
- 단층: 사면의 위치가 단층과 같은 지질선 구조와 근접할수록 사면붕괴 발생확률은 두드러지게 증가한다(Gomez and Kavzoglu, 2005). 단층대에서는 지반의 공학적 강도가 약해질 뿐만 아니라, 강우시 지표수의 침투에 의해 함수비가 증가함으로써 암반의 단위중량 또한 증가할 수 있기 때문이다. 암반의 단위중량의 증가는 사면 내부의 전단응력의 증가와도 관련될 수 있다.
- 배후 저수지: 대상지역에서는 채굴적의 심도가 깊어짐에 따라 사면중간 또는 채굴적 상부에 배수처리를 위한 임시 저수지와 침전지를 설치하여 운영하고 있다. 채굴적 경계선에 근접하여 존재하는 배후 저수지는 사면의 지하수 공급원으로 작용하여 사면 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

위에 제시된 7개의 인자 이외에도 사면을 구성하는 암종과 지하수의 유동도 대상지역의 사면 안정성에 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구에서는 이들 요인들은 고려하지 않았다. 대상지역의 경우 복잡한 지층구조와 편차가 큰 암종으로 인해 일부 사면의 측선에 대한 암종 매핑 결과만으로 채굴적 전체 영역의 암종 경계를 구분하는 것이 어렵기 때문이다. 또한, 같은 암종이라 하더라도 공학적 강도가 큰 차이를 보이고 있어, 상대적 사면붕괴 위험도 산정시 미치는 영향을 암종별로 일관되게 적용하기 어려운 문제가 있다(선우춘 등, 2007). 지하수의 경우에는 수직에 가까운 지층경사와 이암 층의 불투수성으로 인해 지하수 유동 해석결과의 불확실성이 매우 높다고 판단되어 평가모델의 입력인자에서 제외하였다.

### 평가모델 개발

Fig. 6은 대상지역의 상대적 붕괴 위험도 평가를 위해 설계한 분석모델을 보여준다. 분석 절차의 첫 번째 단계에서는 관심지역을 균일한 크기의 격자들로 분할한 후, 퍼지 소속함수를 정의하여 개별 격자마다 0-1 사이의 정량화된 점수를 할당한다. 이것은 영향인자들의 공간적 분포에 따라 사면이 붕괴에 취약한 정도를 나타내는 값

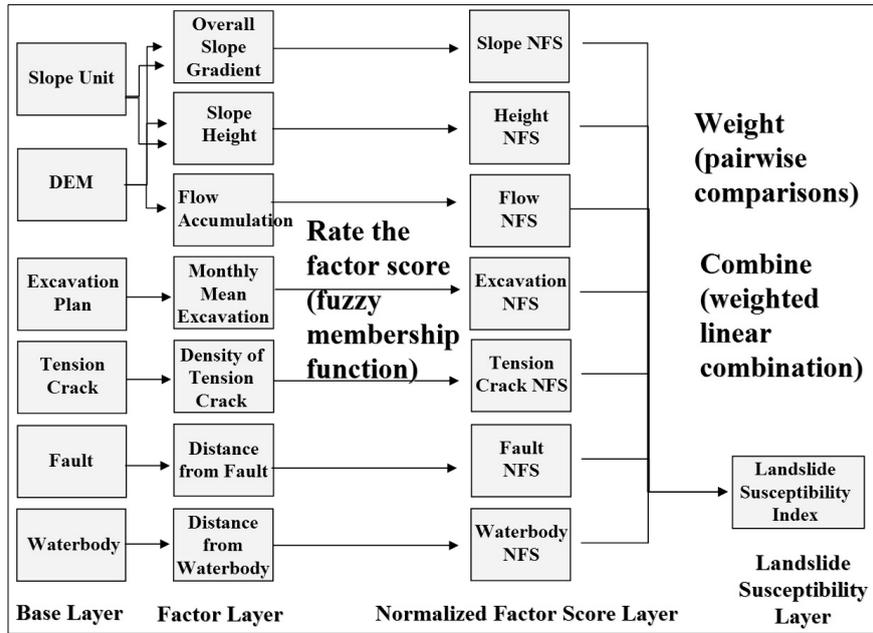


Fig. 6. Procedures for slope instability assessment in the developed model.

으로서, 해당 격자에 사면안정성을 저해하는 요인들이 다수 작용하는 경우 상대적으로 높은 점수가 할당된다. 예를 들어, 사면상부에 인장균열이 다수 발견된 경우 사면의 붕괴위험이 높다고 볼 수 있으므로, 이 지점에는 상대적으로 높은 점수를 할당할 수 있다. 반면, 사면의 경사가 완만하고 단층대로부터 비교적 멀리 떨어진 지점에 대해서는 사면경사와 단층대의 영향인자들에 대한 점수를 상대적으로 낮게 부여할 수 있다.

퍼지 소속함수는 다양한 수학적 모델을 활용하여 정의할 수 있으나 현재까지 모델의 선택과 관련한 명확한 지침서가 제시된 것은 없다(Atkinson, et. al., 2005). 본 연구에서는 퍼지 이론에서 일반적으로 활용되고 있는 Sigmoidal (s-shaped) 모델을 퍼지 소속함수로 채택하였다(Fig. 7).

$$\mu_i = \begin{cases} \cos^2\left(\left(1 - \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right) \times \frac{\pi}{2}\right) & \text{when } \alpha \leq x < \beta \\ 0 & \text{when } x < \alpha \\ 1 & \text{when } x \geq \beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_d = \begin{cases} \cos^2\left(\left(\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right) \times \frac{\pi}{2}\right) & \text{when } \alpha \leq x < \beta \\ 1 & \text{when } x < \alpha \\ 0 & \text{when } x \geq \beta \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $\mu_i$ 는 점진적으로 증가하는 퍼지집합에 대한 소속값,  $\mu_d$ 는 점진적으로 감소하는 퍼지집합에 대한 소속값,  $x$ 는 영향인자의 입력치,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 영향인자별로 정의되

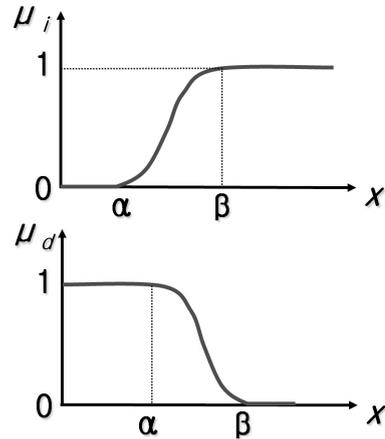


Fig. 7. Fuzzy membership functions for rating the factor scores.

는 퍼지 소속함수의 임계값을 의미한다( $\alpha \leq \beta$ ). Sigmoidal 모델은 영향인자의 입력 값들이 퍼지 소속함수의 임계값에 근접할수록 반환되는 값들의 증감정도가 더욱 커지는 특성이 있기 때문에(Eastman, 2006), 각각의 인자들이 사면안정에 미치는 영향 정도의 차이를 상대적 붕괴 위험도가 높은 지점과 낮은 지점에서 보다 분명하게 반영할 수 있는 장점이 있다.

분석절차의 두 번째 단계에서는 개별 인자들이 사면에

미치는 영향을 통합하여 상대적 붕괴 위험도 레이어를 생성한다. 이때 상대적 사면붕괴 위험도는 각 요인들에 부여된 퍼지 소속 값들을 단순히 합산하여 계산할 수도 있으나, 이 경우 대상지역에 따라 다르게 나타나는 인자들의 상대적인 중요도를 반영하기 어려운 한계가 있다. 본 연구에서는 Saaty(1977)가 제안한 계층분석절차 기법의 세부절차인 쌍대비교(pairwise comparisons)를 수행하여 각 인자들의 가중치를 결정하였다.

Saaty(1977)가 제안한 쌍대비교는 복잡한 문제를 단순화하여 다중인자들의 가중치를 합리적으로 결정할 수 있는 기법이다. n개의 영향인자들에 대한 가중치 결정을 위해서는 식 (3)과 같은 n×n 크기의 2차원 비교행렬을 생성해야 한다. 비교행렬에서 (i,j)에 위치한 원소는 j번째 영향인자에 대한 i번째 영향인자의 상대적인 중요도 값을 의미하며, Table 2에 제시된 기준에 따라 그 값을 결정할 수 있다. 예를 들어, 첫 번째 영향인자와 두 번째 영향인자를 비교할 때 첫 번째 영향인자가 매우 중요하다고(strongly favored) 판단되는 경우 비교행렬의 (1,2)에 위치한 원소 c<sub>12</sub>의 값에는 7을 할당할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

비교행렬을 구성하는 모든 원소들의 값이 할당되면, 식 (4)와 같은 우선순위 행렬(P)을 생성한다. 우선순위 행렬에서 i번째 행의 원소는 i번째 영향인자에 대한 가중치 값을 의미하며, 모든 원소의 합은 1을 만족한다.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_{1j}}{c_{0j}} \right) \\ \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_{2j}}{c_{0j}} \right) \\ \dots \\ \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_{nj}}{c_{0j}} \right) \end{bmatrix} \quad \text{where } c_{0j} = \sum_{i=1}^n c_{ij} \quad (4)$$

마지막 단계에서는 쌍대비교 과정이 일관성 있게 진행되었는지 평가한다. 비교행렬을 생성하는 과정에서 응답자의 판단에 일관성이 결여된다면, 산출된 가중치 값들도 신뢰하기 어렵기 때문이다(Saaty, 1977). 쌍대비교 과정에 대한 일관성 정도는 다음의 식들을 이용하여 평가할 수 있다.

$$K = C \times P = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \dots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{where } \lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{k_i}{P_i} \right)}{n} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

여기서 CI(Consistency Index)는 앞서 생성된 비교행렬과 우선순위 행렬의 값을 이용하여 계산하며, RI(Random Index)는 Table 3에서 영향인자의 개수(n)에 대응하는 값을 찾아 대입한다. 일반적으로 CR(Consistency Ratio) 값이 0.10보다 작거나 같게 계산되는 경우에는 전체 인

**Table 2.** Scale for pairwise comparisons (Bascetin, 2007)

Relative Intensity	Definition	Explanation
1	Of equal value	Two requirements are of equal value
3	Slightly more value	Experience slightly favors one requirement over another
5	Essential or strong value	Experience strongly favors one requirement over another
7	Very strong value	A requirement is strongly favored and its dominance is demonstrated in practice
9	Extreme value	The evidence favoring one over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between two adjacent judgments	When compromise is needed

**Table 3.** Random Index (RI) values versus “n” (Bascetin, 2007)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

자들에 대한 쌍대비교가 일관성 있게 진행된 것으로 볼 수 있다.

가중치가 결정되면 개별 인자들의 퍼지 소속 값을 다음의 식과 같이 통합하여 상대적 붕괴 위험도 레이어를 생성한다.

$$LSI = \sum_{i=1}^n (\omega_i \times NFS_i) \quad (8)$$

여기서 *LSI*는 각 격자에 할당되는 상대적 붕괴 위험도 (0-1),  $\omega_i$ 는 *i*번째 영향인자의 가중치 값, *NFS<sub>i</sub>*는 *i*번째 영향인자가 사면붕괴에 미치는 영향을 정규화하여 각 격자에 할당된 퍼지 소속 값을 의미한다.

### 현장적용 및 결과해석

노천광산의 경우 채광작업으로 인한 사면의 변화가 자연사면과 비교하여 상대적으로 빠르다. 따라서 주기적인 사면붕괴 위험도 평가를 통해 사면 주위의 지형변화를 사면관리 계획 수립시 반영할 필요가 있다. 본 연구에서는 한 달 주기로 대상지역의 상대적 사면붕괴 위험도를 평가하고자 하였다. 대상지역에서는 지형도를 포함한 광산도면들이 한 달 주기로 갱신되며, 발파·굴착 작업을 포함한 생산계획도 매월 새롭게 수립되고 있기 때문이다. 예를 들어, 2008년 5월의 상대적 사면붕괴 위험도 평가시에는 2008년 4월말 갱신된 광산도면과 5월의 월간 생산계획을 평가모델의 입력자료로 활용함으로써 시간에 따른 현장조건의 변화를 사면붕괴 위험도 평가에 반영하고자 하였다.

본 논문에서는 대상지역에서 사면붕괴가 발생했던 (1) 2006년 10월, (2) 2007년 5월, (3) 2007년 6월의 세 개의 시기를 중심으로 개발된 상대적 사면붕괴 위험도 평가모델의 적용결과를 제시하고자 한다.

#### 입력자료의 전처리

Fig. 8은 대상지역에서 2006년 9월말 갱신된 광산도면과 2006년 10월의 월간 굴착계획을 보여준다. 평가 대상은 채굴적의 전체사면으로 설정하였고, 벡터 형식으로 작성된 광산도면을 격자 단위의 공간분석에 용이한 래스터 형식으로 변환하였다. 래스터 변환시 격자의 크기는 5 m × 5 m로 설정하였다. 대상지역의 지형 특징을 정확히 반영할 수 있는 수치표고모델(Digital Elevation Model)을 생성하기 위하여 2 m 고도 간격의 등고선을 갖는 광산 지형도를 이용하였다. 대상지역의 광산 지형도는 토털 스테이션(Total Station)과 DGPS(Differential Global Positioning System)을 이용한 정밀 지형측량을 통해 매

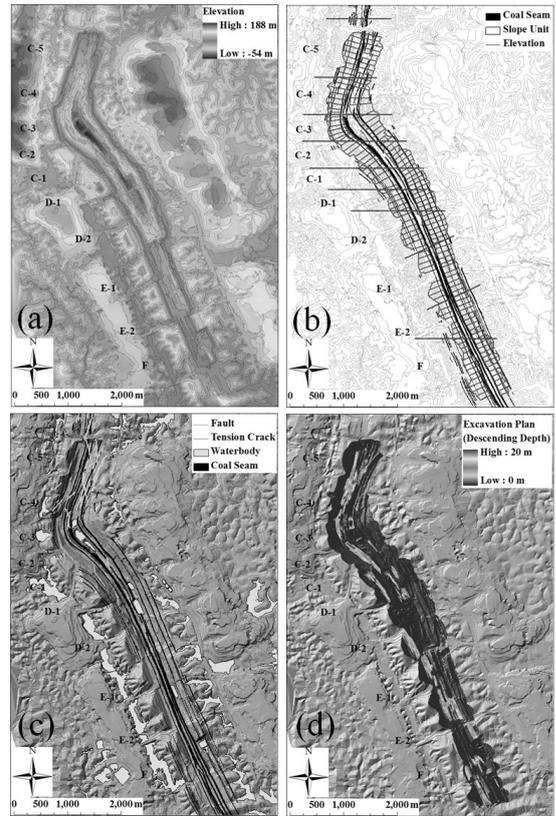
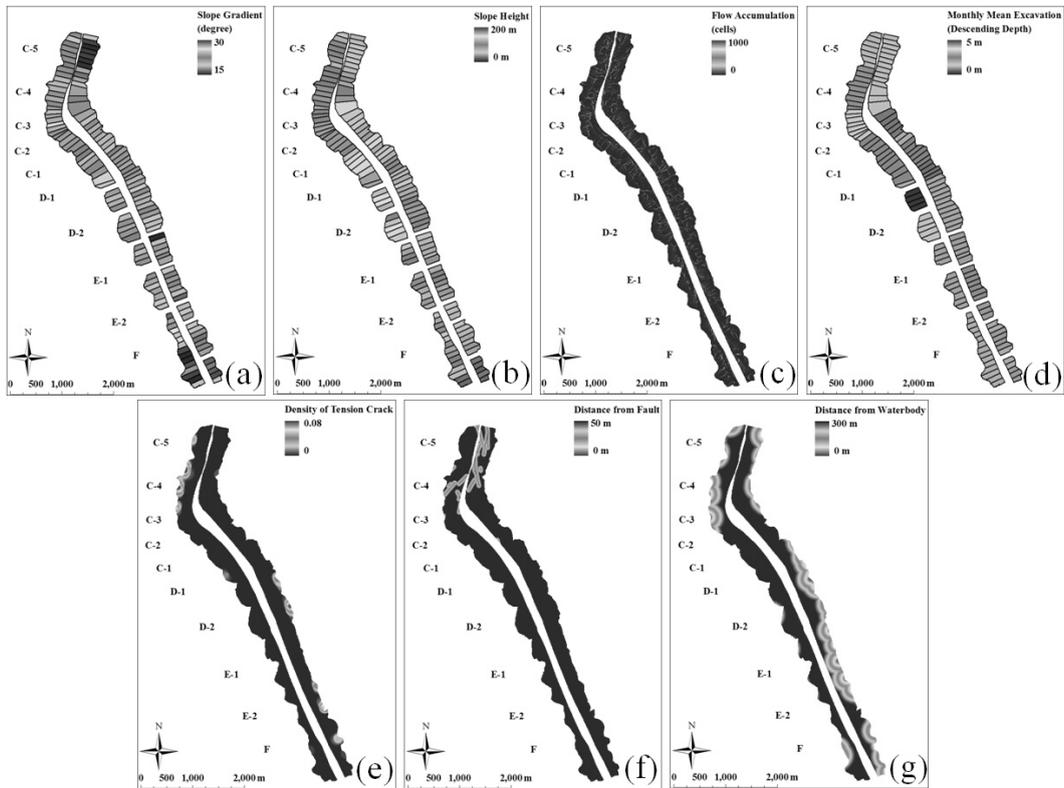


Fig. 8. Thematic layers in the study area. (a) Elevation. (b) Slope unit. (c) Geological features. (d) Monthly excavation plan.

월 갱신되고 있다. ArcGIS 소프트웨어를 이용하여 등고선 자료를 TIN(Triangulated Irregular Network) 모델로 변환하였고, 이를 다시 래스터 형식으로 변환하여 5 m 격자 간격으로 이루어진 수치표고모델을 생성하였다.

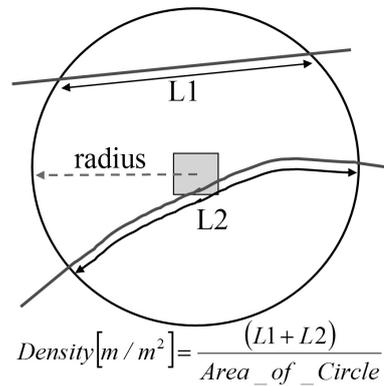
- 사면경사와 사면높이: 대상지역 채굴적 내부의 전체 사면경사와 사면높이 정보를 일정한 기준으로 측정하기 위하여, 주 탄층의 동측과 서측경계의 주향선을 따라 100 m 간격으로 직교 조사선을 그어 측정구역을 설정하였다(Fig. 8(b)). 다음으로 ArcGIS 소프트웨어가 제공하는 지형분석 도구를 이용하여 사면경사(Fig. 9(a))와 사면높이(Fig. 9(b)) 정보를 추출하였다.
- 지표수 유출량 산정: ArcGIS의 수계분석 도구를 이용하여 강수시 지표수의 공간적 흐름 패턴과 유출량을 산정하였다(Fig. 9(c)). 노천광산 지역의 지표수 유출량 산정을 위한 수계분석 도구의 적용방법에 대한 보다 자세한 설명은 최요순 등(2006)을 참고할 수 있다.
- 하부굴착 심도: 하부굴착 작업이 사면에 미치는 영향



**Fig. 9.** Seven factor layers for inputting to the developed model. (a) Slope gradient. (b) Slope height. (c) Flow accumulation. (d) Depth of monthly mean excavation. (e) Density of tension cracks. (f) Distance from fault. (g) Distance from waterbody.

을 근사적으로 정량화하여 표현하기 위하여 작업구간 단위로 평균 하강심도를 계산하였다. 대상지역에서 굴착작업시 발생하는 발파진동 및 지반진동은 작업구간과 근접한 사면들에 대해 상대적으로 보다 큰 영향을 미칠 것이라 가정했기 때문이다. Fig. 9(d)는 채굴적의 작업구간(C-F)단위로 구간별 월간 계획 굴착량을 구간면적으로 나누어 산정한 평균 하강심도의 공간적 분포를 보여준다.

- 인장균열의 밀도: Fig. 10은 본 연구에서 적용한 인장균열 밀도의 계산 원리를 설명한다. 임의의 관심격자 중심으로부터 100 m 반경의 원을 그리고 원 내부에 포함되는 인장균열의 길이를 모두 합산한 후, 합산 결과를 원의 면적으로 나눈 값을 해당 관심격자에서의 인장균열 밀도로 산정하였다. 원의 반경은 사면경사와 사면높이 추출시 구분한 사면단위의 길이와 동일한 기준을 적용하여 100 m로 설정하였다. Fig. 9(e)는 대상 지역에서 관찰된 인장균열의 분포 밀도를 보여준다.
- 단층 및 배후 저수지로부터의 거리: 입력자료 전처리의 마지막 단계로서 단층과 사면상부 배후 저수지로부터



**Fig. 10.** Principle for calculating the density of tension cracks.

의 거리를 나타내는 레이어들을 ArcGIS 소프트웨어의 거리분석 도구를 이용하여 자동 추출하였다(Figs. 9(f) & 9(g)).

**퍼지 소속함수의 정의**

앞서 생성된 평가모델의 입력자료들이 대상지역의 사면붕괴에 미치는 영향 정도를 정량적으로 표현하기 위하여 Table 4와 같이 퍼지 소속함수를 정의하였다. 개발된 평가모델이 고려하는 7개의 인자 중 사면경사, 사면높이, 지표수 유출량과 같이 값이 커질수록 사면의 안정성을 저해하는 것들에 대해서는 식 (1)의 퍼지 소속함수( $\mu$ )를 적용하였고, 단층으로부터의 거리와 같이 값이 커질수록 사면의 안정에 기여하는 것들에 대해서는 식 (2)을 적용하였다( $\mu_i$ ). 각 인자들의 임계값( $\alpha, \beta$ )은 대상지역의 지질·지형 특성에 대한 공간분석결과와 사면붕괴 특성에

대한 현장조사 결과, 광산규정 및 현장 기술자의 판단 결과에 근거하여 설정하였다.

**계층분석절차 기법의 적용**

다중 영향인자들의 가중치를 결정하기 위하여 개발공학 전문가 2명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문 에 응답한 전문가들을 대상지역에서 3년 이상의 현장조사 경험이 있으며 사면안정 문제에 대한 기술자문을 수행 해오고 있다. 쌍대비교 항목에 대하여 평가자 2명의 견해 가 일치하지 않는 경우에는 Saaty(1977)가 제안한 방법 에 따라 2명의 응답결과를 기하평균한 후, 소수점 이하를

**Table 4.** Parameters for defining the fuzzy membership functions of 7 factors

Factor	Type of fuzzy set	$\alpha$	$\beta$	Remarks for setting $\alpha$ and $\beta$
Overall slope gradient (degree)	$\mu_i$	15	30	min, max
Slope height (m)	$\mu_i$	0	200	min, max
Surface flow accumulation (cells)	$\mu_i$	0	1000	Expert decision
Distance from waterbodies at the upper parts of pit (m)	$\mu_d$	0	300	Mine regulation
Distance from faults (m)	$\mu_d$	0	50	Mine regulation
Density of tension cracks (m/m <sup>2</sup> )	$\mu_i$	0	0.08	min, max
Monthly average depth descended by excavation (m)	$\mu_i$	0	5	min, max

**Table 5.** Pairwise comparison judgement matrix on 7 factors

	Slope gradient	Slope height	Flow accumulation	Monthly mean excavation	Density of tension crack	Distance from fault	Distance from waterbody
Slope gradient	1.00	3.00	5.00	3.00	1.00	3.00	1.00
Slope height	0.33	1.00	1.00	0.25	0.20	0.50	0.50
Flow accumulation	0.20	1.00	1.00	0.50	0.20	0.33	0.33
Monthly mean excavation	0.33	4.00	2.00	1.00	0.50	2.00	1.00
Density of tension crack	1.00	5.00	5.00	2.00	1.00	2.00	2.00
Distance from fault	0.33	2.00	3.00	0.50	0.50	1.00	0.50
Distance from waterbody	1.00	2.00	3.00	1.00	0.50	2.00	1.00

**Table 6.** Priority weights for 7 factors and consistency ratio

Weights							Consistency ratio
Slope gradient	Slope height	Flow accumulation	Monthly mean excavation	Density of tension crack	Distance from fault	Distance from waterbody	
0.24	0.06	0.05	0.14	0.25	0.10	0.16	0.03

보정하는 방법으로 쌍대비교 행렬의 상대적인 중요도 값을 결정하였다(Table 5). Table 6은 식 (4)를 이용하여 각 영향인자들의 가중치를 산정한 결과를 보여준다. 산정된 CR 값을 고려할 때, 설문조사를 통한 계층분석절차 기법이 일관성 있게 적용된 것으로 판단된다. 7개의 인자 중 인장균열과 사면경사가 대상지역의 사면붕괴에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었으며, 사면높이와 지표수 유출의 영향은 상대적으로 낮게 평가되었다.

**결과해석**

Fig. 11(a)는 2006년 10월에 대한 상대적 붕괴위험도 평가 결과를 보여준다. Table 4에 정의된 퍼지 소속함수를 이용하여 7개 인자들에 대한 사면붕괴 위험도 평가한 결과와, Table 6의 가중치 산정결과를 식 (8)과 같이 통합하여 대상지역의 상대적 사면붕괴 위험도 레이어를 생성하였다. 평가결과를 구역별로 살펴보면 사면경사가 완만한 C-5 동측사면은 사면붕괴 위험이 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다. C-5 서측사면의 경우에는 사면경사는 가파르지만 굴착계획에 따른 평균 하강심도가 비교적 작고, 사면 안정성을 저해하는 다른 인자들의 영향도 상대적으로 높지 않았기 때문에 사면붕괴 위험도가 낮게 평가된 것으로 판단된다. C-4 구역 서측사면에는 사면안정에 불리한 조건의 인자들이 대부분 분포하고 있으며, 인장균열, 하부굴착, 상부 저수지의 영향들이 모두 높게 작용하여 상대적 사면붕괴 위험도가 대상지역에서 가장 높게 평가되었다. 2006년 10월에 발생한 사면붕괴 사례

(Fig. 5(a))는 C-4 서측사면이 실제로 불안정한 상태였으며, 대상지역의 상대적 사면붕괴 위험도 평가가 합리적이었음을 보여준다. C-2, C-1, D-1, D-2, E-1, E-2, F 구역의 서측사면들은 사면상부에 인장균열이 발견되지 않았고, 단층대로부터도 충분한 거리를 두고 있으며, 배후 저수지의 영향도 거의 받지 않았기 때문에 비교적 안정한 상태로 평가된 것을 볼 수 있다. 배후 저수지와 근접한 D-1, D-2, E-1, E-2, F 동측사면들은 상대적 사면붕괴 위험도가 상대적으로 높게 산정되었으며, D-1, D-2 동측사면들도 인장균열의 영향으로 붕괴 위험도가 상대적으로 높게 평가되었다.

Fig. 11(b)는 2007년 4월말에 갱신된 광산도면과 2007년 5월의 월간 굴착계획을 입력자료로 사용하여 2007년 5월 대상지역의 상대적 사면붕괴 위험도를 평가한 결과이다. Table 4의 퍼지 소속함수와 Table 6의 계층분석절차 기법의 적용결과를 반영하였다. 2006년 10월의 분석결과와 유사하게 C 구역에서는 서측사면이 동측사면에 비해 상대적 사면붕괴 위험도가 높게 나타났다. 구조지질학 측면에서 볼 때 C 구역의 서측사면은 습곡 형성시 작용한 인장력으로 인해 암반의 강도가 약화되었을 가능성이 높으며, 사면상부의 배후 저수지로부터의 거리도 가까이 지하수 등에 의한 수리학적 영향도 더 크게 받고 있음을 추정할 수 있다. 특히, C-1,2 서측사면에서는 가파른 사면경사와 고밀도의 인장균열 분포의 영향까지 함께 반영되어 사면붕괴 위험도가 상대적으로 높게 나타났으며, 이곳의 위치는 대상지역에서 실제 발생한 붕괴사

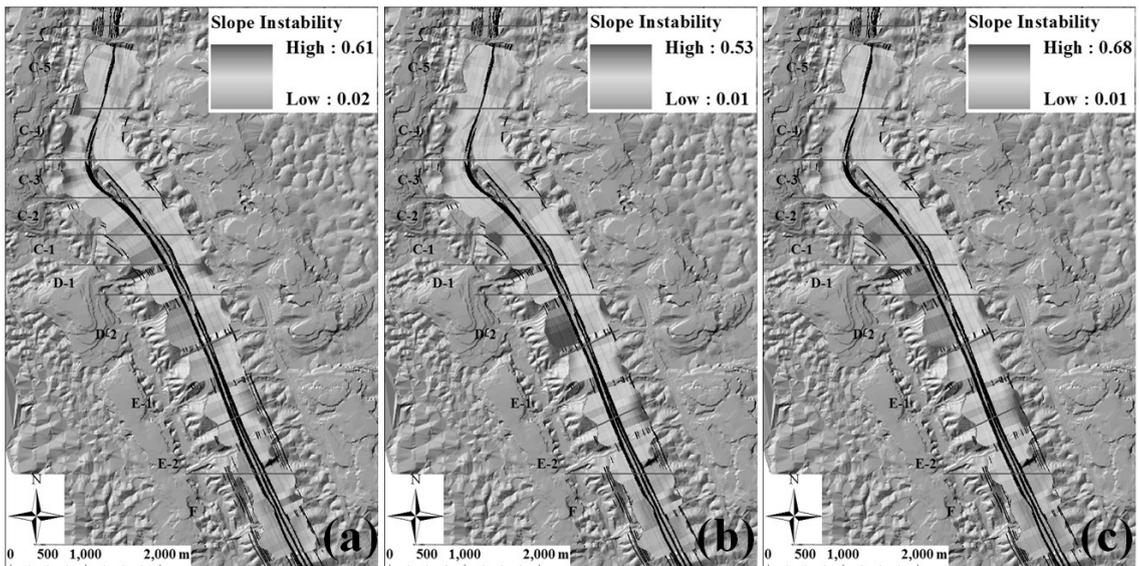


Fig. 11. Results from slope instability assessment. (a) Oct. 2006. (b) May 2007. (c) Jun. 2007.

면(Fig. 5(b))의 위치와 정확히 일치한 것을 볼 수 있다. D, E, F 구역에서는 전반적으로 동측사면이 서측사면보다 상대적으로 불안정한 것으로 평가되었다. 이들 구역의 동측사면은 상부에서 다수의 인장균열들이 발견되고 있으며, 배후 저수지와도 근접하게 위치하여 사면붕괴 위험도가 높게 평가된 것으로 판단된다. 예외적으로 D-2 서측사면의 경우 상대적 사면붕괴 위험도가 다소 높게 평가되었는데 이는 집중된 하부굴착으로 인한 심도강하와 발파진동의 영향이 평가 모델에 반영되었기 때문이다.

2007년 6월의 상대적 사면붕괴 위험도 평가 결과는 Fig. 11(c)와 같다. 2007년 6월에는 D-1 서측사면과 E-2 동측사면에서 굴착에 의한 집중강하가 진행되었다. 특히, 배후 저수지와 인접한 E-2 동측사면에서는 사면붕괴 위험도가 상대적으로 높게 평가되었으며, 2007년 6월, 이 구역에서 사면붕괴가 발생하였다(Fig. 5(c)). 반면, D-1 구역 서측사면의 경우 인장균열을 발견할 수 없었고, 배후 저수지의 영향도 거의 받지 않았기 때문에 채굴적 하단의 집중강하에도 불구하고 상대적 사면붕괴 위험도가 낮게 평가된 것으로 판단된다. 2007년 5월과 비교하여 2007년 6월의 평가결과에서는 C-1,2 서측사면의 상대적 사면붕괴 위험도 값이 낮아진 것을 발견할 수 있다. 이는 2007년 5월에 발생한 C-1,2 사면의 대규모 붕괴의 영향으로 사면상부에 존재했던 인장균열의 수가 줄어들었기 때문이다.

## 결 론

본 연구에서는 대규모 석탄 노천광산에 대하여 상대적 사면붕괴 위험도를 평가할 수 있는 GIS 분석모델을 제시하였다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 현장적용 결과, 평가모델은 채굴활동에 따른 채굴적의 변화와 월간 생산계획을 효과적으로 반영하여 대상지역의 상대적인 사면붕괴 위험도를 합리적으로 평가할 수 있었다. 특히, 2006년 10월, 2007년 5월, 2007년 6월의 평가결과에서는 상대적 사면붕괴 위험도가 높게 평가된 지점에서 실제 사면붕괴가 발생하여, 평가모델이 제시하는 결과가 사면붕괴 예측 및 예비조사를 위해 실질적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 대상지역의 현장적용시 고려된 인자들 중, 인장균열과 사면경사는 각각 0.25와 0.24의 높은 가중치를 가지므로 상대적 사면붕괴 위험도 평가 결과에 큰 영향을 미친다. 따라서 대상지역 사면붕괴 위험도 평가의 신뢰도를 높이기 위해서는 인장균열의 발달상황과 사면의 전체적인 변형 정도에 대한 주기적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

개발된 평가모델은 퍼지 소속함수의 정의와 계층분석

절차 기법의 적용과정에서 분석자의 주관적 판단이 개입될 수 있다. 이는 본 연구에서 채택한 반정성적 접근방법이 가지는 근본적인 한계이다. 그러나 대상지역의 여건상 통계적 접근방법이나 물리적 모델에 의한 접근방법을 적용하는 것이 불가능하기 때문에, 현 시점에서는 본 연구에서 제시한 평가방법이 현장의 사면관리를 위해 활용될 수 있는 대안 중의 하나라고 판단된다. 향후, 사면붕괴에 대한 기록이 축적되어 통계학적 접근방법의 적용이 가능해질 경우 퍼지 소속함수를 보다 객관적으로 정의할 수 있으며, 사면붕괴 빈도수에 근거한 인자들의 가중치 결정도 가능할 것으로 기대한다.

본 연구에서 제시한 노천광산의 상대적 붕괴위험도 평가모델은 불확실성이 낮고, 지표지질조사사안으로도 쉽게 획득할 수 있는 정보요소들을 입력인자로 고려했기 때문에, 대규모 석탄 노천광산의 예비 사면붕괴 위험도 평가를 신속하고 저렴하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한, 적용현장에 따라 영향인자들의 가중치, 퍼지 소속함수의 설정 등을 쉽게 변경할 수 있으므로, 소프트웨어로 개발하여 현장에 공급할 경우 채굴적 사면 계측 및 정밀 조사 계획 수립을 위해 효과적으로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

본 연구에서는 계층분석절차 기법으로 결정된 가중치를 퍼지 소속함수 값에 곱한 후 합산하는 방법으로 다중 인자들이 사면붕괴에 미치는 영향을 통합하였으나, 퍼지 결합 연산자(MAX, MIN, Product, etc)를 활용하는 방법도 적용이 가능하다. 이와 관련한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연연구사업(대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구), 한국학술진흥재단의 문제해결형인력양성지원사업(KRF-2007-511-D00299)과 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 수행되었으며, 또한 논문 작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌다.

## 참고문헌

- 선우춘, 정소걸, 최성용, 송원경, 박의섭, 2004, “탄전에서의 암반 이완발파와 사면안정에 관한연구,” *KIGAM Bulletin*, Vol. 8, pp. 15-27.
- 선우춘, 최요순, 박형동, 정용복, 2007, “GIS에 의한 대규모 노천광에서의 배수처리 및 사면안정 예측,” *터널과 지하공간(한국암반공학회지)*, Vol. 17, pp. 430-440.
- 이병주, 선우춘, 정소걸, 2001, “인도네시아 파시르탄전지

- 역의 변형과정 및 사면내 불연속면 분석,” *KIGAM Bulletin*, Vol. 5, pp. 45-55.
- 정소걸, 선우춘, 한공창, 신희순, 박연준, 2000, “인도네시아 Pasir 탄전에서 노천채탄장 사면의 안정성 해석,” *터널과 지하공간(한국암반공학회지)*, Vol. 10, pp. 430-440.
- 최병희, 류동우, 선우춘, 2006, “파시르 탄광에서의 채탄발파공법에 대한 문제점 분석 및 개선방향 연구,” *화약·발파(대한화약발파공학회지)*, Vol. 24, pp. 57-62.
- 최요순, 선우춘, 박형동, 2006, “광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화,” *한국지구시스템공학회지*, Vol. 43, pp. 429-438.
- Akgun, A., Dag, S. and Bulut, F., 2008, “Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models,” *Environmental Geology*, Vol. 54, pp. 1127-1143.
- Atkinson, D. M., Deadman, P., Dudycha, D. and Traynor, S., 2005, “Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road,” *Applied Geography*, Vol. 25, pp. 287-307.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. and Kanno, T., 2005, “Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications,” *Engineering Geology*, Vol. 81, pp. 432-445.
- Bascetin, A., 2007, “A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine,” *Environmental Geology*, Vol. 52, pp. 663-672.
- Brabb, E. E., 1984, “Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping,” Proceedings of the 4th International Symposium of Landslides, Vol. 2, Toronto, Canada, pp. 1037-1057.
- Bye, A. R. and Bell, F. G., 2001, “Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa,” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 38, pp. 449-466.
- Cai, M., Xie, M. and Li, C., 2007, “GIS-based 3D limit equilibrium analysis for design optimization and of a 600 m high slope in an open pit mine,” *Journal of University of Science and Technology Beijing*, Vol. 14, pp. 1-5.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 1995, “GIS technology in mapping landslide hazard,” In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 135-175.
- Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T. and El Hamdouni, R., 2006, “Engineering geology maps: landslides and geographical information systems,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65, pp. 341-411.
- Eastman, J. R., 2006, “Decision support: uncertainty management,” In: *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*, Clark University, Worcester, USA, pp. 155-172.
- Ermini, L., Catani, F. and Casagli, N., 2005, “Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment,” *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 327-343.
- Gomez, H. and Kavzoglu, T., 2005, “Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basic, Venezuela,” *Engineering Geology*, Vol. 25, pp. 11-27.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999, “Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy,” *Geomorphology*, Vol. 31, pp. 181-216.
- Haneberg, W. C., Creighton, A. L., Medley, E. W. and Jonas, D. A., 2005, “Use of LiDAR to assess slope hazards at Lihir gold mine, Papua New Guinea,” Proceedings of International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, <[http://www.haneberg.com/Vancouver\\_Paper\\_LoRes.pdf](http://www.haneberg.com/Vancouver_Paper_LoRes.pdf)>, Cited 29 Sep 2008.
- Hartlen, J. and Viberg, L., 1988, “General report: evaluation of landslide hazard,” Proceedings of the 5th International Symposium of Landslide, Vol. 2, Lausanne, Switzerland, pp. 1037-1057.
- Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R. and Chacon, J., 2007, “Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain),” *Natural Hazards*, Vol. 4, pp. 61-79.
- Jibson, R. W. and Keefer, D. K., 1989, “Statistical analysis of factors affecting landslide distribution in the New Madrid seismic zone, Tennessee and Kentucky,” *Engineering Geology*, Vol. 27, pp. 509-542.
- Kasmer, O. and Ulusay, R., 2006, “Stability of spoil piles at two coal mines in Turkey: Geotechnical characterization and design considerations,” *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 12, pp. 337-352.
- KIGAM, 2003, *Geotechnical study on the stabilization for the slopes of the Pasir coal mine*, KIGAM Report No. KJA/02P/XII/01, Daejeon, Korea, 167p.
- Lee, S., 2005, “Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data,” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, pp. 1477-1491.
- Lee, S., 2007a, “Comparison of landslide susceptibility maps generated through multiple logistic regressions for three test areas in Korea,” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 32, pp. 2133-2148.

- Lee, S., 2007b, "Landslide susceptibility mapping using an artificial neural network in the Gangneung area, Korea," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 4763-4783.
- Lee, S. and Choi, J., 2004, "Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 18, pp. 789-814.
- Lee, S., Choi, J. and Min, K., 2002, "Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model," *Environmental Geology*, Vol. 43, pp. 120-131.
- Lee, S. and Pradhan, B., 2007, "Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression model," *Landslides*, Vol. 4, pp. 33-41.
- Lee, S. and Talib, J. A., 2005, "Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis," *Environmental Geology*, Vol. 47, pp. 982-990.
- McDermid, G. and Franklin, S., 1995, "Remote sensing and geomorphometric discrimination of slope processes," *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Vol. 101, pp. 165-185.
- Merrien-Soukatchoff, V. and Hadadou, R., 1997, "Monitoring and modelling by the distinct element method of a slope slipping," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 11, pp. 1-6.
- Nelson, E. P., Connors, K. A. and Suárez S., C., 2007, "GIS-Based Slope Stability Analysis, Chuquicamata Open Pit Copper Mine, Chile," *Natural Resources Research*, Vol. 16, pp. 171-190.
- Obara, Y., Nakamura, N., Kang, S.S. and Kaneko, K., 2000, "Measurement of local stress and estimation of regional stress associated with stability assessment of an open-pit rock slope," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 1211-1221.
- Ohlmacher, G. C. and Davis, J. C., 2003, "Using multiple logistic regression and GIS technology to predic landslide hazard in northeast Kansas, USA," *Engineering Geology*, Vol. 69, pp. 331-343.
- Patnayak, S., Reddy, K.N. and Gupta, R.N., 2002, "Slope stability analysis of a lead-zinc open pit mine using limit equilibrium and numerical methods," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 16, pp. 196-216.
- Saaty, T. L., 1977, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, pp. 234-281.
- Samtan, 2007, "Annual Report," <[http://www.samtan.co.kr/files/annual/2007\\_SAMTAN.pdf](http://www.samtan.co.kr/files/annual/2007_SAMTAN.pdf)>, Cited 29 Sep 2008.
- Sharma, M. and Kumar, R., 2008, "GIS-based landslide hazard zonation: a case study from the Parwanoo area, Lesser and Outer Himalaya, H.P., India," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, pp. 129-137.
- Singh, V.K., Prasad, M., Singh, S.K., Rao, D.G. and Singh, U.K., 1995, "Slope design based on geotechnical study and numerical modelling of a deep open pit mine in India," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 9, pp. 105-111.
- Singh, V.K. and Singh, T.N., 1999, "Geotechnical study of the optimum design of the Chandmari coppermine, Rajasthan, India," *Engineering Geology*, Vol. 53, pp. 47-55.
- Singh, V. K., Singh, J. K. and Kumar, A., 2005, "Geotechnical study for optimizing the slope design of a deep open-pit mine, India," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 64, pp. 303-309.
- Stead, D. and Eberhardt, E., 1997, "Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining," *Engineering Geology*, Vol. 46, pp. 41-61.
- Tosney, J.R., Milne, D., Chance, A.V. and Amon, F., 2004, "Verification of a large scale slope instability mechanism at Highland Valley Copper," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 18, pp. 273-288.
- Varnes, D. J., 1984, *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, Natural Hazard No. 3, Commission on landslides and other mass movements on Slopes of the IAEG, UNESCO, Paris. 61p.
- Wang, J., Tan, W., Feng, S. and Zhou, R., 2000, "Reliability analysis of an open pit coal mine slope," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 37, pp. 715-721.
- Wei, Z., Yin, G., Wan, L. and Shen, L., 2008, "Case history of controlling a landslide at Panluo open-pit mine in China," *Environmental Geology*, Vol. 54, pp. 699-709.
- Xie, M., Esaki, T., Qiu, C. and Jia, L., 2007, "Spatial three-dimensional landslide susceptibility mapping tool and its application," *Earth Science Frontiers*, Vol. 14, pp. 73-84.
- Yalcin, A., 2008, "GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations," *CATENA*, Vol. 72, pp. 1-12.
- Yalcin, A. and Bulut, F., 2007, "Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey)," *Natural Hazards*, Vol. 41, pp. 201-226.

---

**최 요 순**

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정  
(本 學會誌 第45卷 第3号 參照)

---

---

**선 우 춘**

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원  
(本 學會誌 第45卷 第3号 參照)

---

---

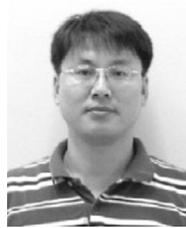
**박 형 동**

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수  
(本 學會誌 第45卷 第3号 參照)

---

---

**정 용 복**



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사  
2000년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학박사

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원  
(E-mail; ybjung@kigam.re.kr)

---