

## 편마암지역 자연사면 · 절취사면의 안정성 분석 사례

김만일<sup>1\*</sup> · 배두원<sup>2</sup> · 김종태<sup>2</sup> · 채병곤<sup>1</sup> · 정교철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해연구실

<sup>2</sup>안동대학교 지구환경과학과

### Analysis of Rock Slope Stability for Natural Slope and Cut Slope of Gneiss Area in Andong, Korea

Man-Il Kim<sup>1\*</sup>, Du-Won Bae<sup>2</sup>, Jong-Tae Kim<sup>2</sup>, Byung-Gon Chae<sup>1</sup>, and Gyo-Cheol Jeong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Landslide Hazards Research Group, Geological & Environmental Hazards Division, KIGAM, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Earth & Environmental Sciences, Andong National University, Andong, Korea

매년 강우로 인해 발생하는 사면파괴는 많은 재산피해와 인명피해를 발생시키고 있다. 사면재해로부터의 피해저감을 위해 인간의 생활권과 인접한 사면에 대한 지속적인 관리를 통해 이들의 안정성 검토와 보강 대책이 요구된다. 연구지역은 편마암으로 이루어진 암반사면으로써 단층작용으로 인해 대규모 절리군이 형성되어 있는 풍화암 내지 연암의 풍화 특성을 보여준다. 조사사면을 자연사면과 절취사면으로 구분하여 현장자료를 검토한 결과, 자연사면에서는 주 절리군이 형성된 4개 지점에서 평면파괴와 썩기파괴 가능성이 우세하였으며, 절취사면의 경우 8개 지점에서 썩기파괴 발생 가능성이 높게 나타났다. 또한 SLIDE 2D에 적용해 이들 사면의 최소안전율에 대한 수치해석 결과에서는 자연사면보다 절취사면의 안정성이 비교적 취약한 것으로 분석되었다.

**주요어** : 자연사면, 절취사면, 절리군, 최소안전율, SLIDE 2D

Slope failure that is occurred by rainfall generates a lot of property damages and loss of lives. Slope stability management and reinforcement countermeasure can be attained through continuous monitoring about various slope types that adjoin in human's life for reducing slope failure from natural and artificial cut slope hazards. The study area is rock slope that is consisted of gneiss, and large scale joint set is ranging by fault activity. This rock mass is exposed during long period and has lithological weathering property of weathered rock or soft rock. In-situ investigation carried out after divide by natural slope and cut slope. As a result, the natural slope appeared to high possibility of planar failure and wedge failure in four joint points that main joint set is formed. On the other hand, slope failure conformation in cut slope was superior only wedge failure occurrence possibility in eight joint points. In result of numerical analysis using SLIDE 2D, the minimum safety factor was analyzed slope stability for cut slope relatively low than natural slope in this study.

**Key words** : natural slope, cut slope, joint set, minimum safety factor, SLIDE 2D

## 서 언

우리나라의 지형적 특성상 주거지, 산업시설, 도로 등의 국가 기반시설 등이 자연사면 내지 절취사면 부근에 주로 위치해 있다. 특히, 자연 경관과 경제성을 고려하

여 시설물들의 건설을 추진하지만 정작 고려해야할 안정성 문제는 등한시 해온 것이 사실이다. 매년 강우로 인해 일어나는 산사태 등으로 많은 재산피해와 인명피해를 야기 시키고 있는 현 상황에서 이와 같은 재해를 막기 위해서도 국민의 생활권과 인접해 있는 다양한 형

\*Corresponding author: mikim@kis.kigam.re.kr

태의 위험성이 잠재된 사면에 대한 안정성 검토가 필요하다. 사면 붕괴는 강우, 지형, 지질, 토질 등의 자연적 요인과 국토개발에 따른 절개지 생성, 성토사면 형성 등 인위적 요인에 기인하여 발생된다. 일반적으로 사면 붕괴는 토사층과 암반층의 경계부 및 암반 불연속면에서의 풍화 특성에 기인하여 주로 발생하고 있으며, 이는 사면을 구성하는 지반의 이방성, 강도 특성의 차이 및 암반 경계부에 지하수 유입 등으로 경계부가 활동면으로 작용하여 붕괴가 발생하는 수리지질공학적 매커니즘을 가지고 있다(김종은과 이민성, 2006; Abramson *et al.*, 1996).

사면안정 조사 및 처리시 절취사면의 지반 특성을 고려하여야만 한다. 암종별로 구분해 보면, 화강암 지역의 경우 다수 분포하는 절리군(joint set)에 대해 충분한 검토가 이루어져야 하며, 경사도를 제외하고 전국적으로 분포하는 변성암 지역은 암체 내에 연장성을 갖는 소규모의 절리군에 의한 국부적인 암석의 낙반(rock fall)과 연장성이 매우 긴 단층에 의한 대규모 암반 붕괴(rock failure) 가능성을 가지고 있다. 따라서 불연속면의 발달 상태와 특성을 민감하게 고려할 필요성이 대두된다. 또한 경상도, 강원도 동부와 충청도 옥천 일부 지역에 분포하는 퇴적암은 암석의 종류에 따른 절리 발달 특성과 풍화 정도가 다르므로 우세하게 발달된 암석 및 구조지질학적 특성을 현장 지질조사시 반드시 고려할 필요가 있다(이수근, 2002; 최영근, 2003). 일반적으로 암반 절취사면에서의 외력 변화로는 상재하중의 변화로만 나타나지만 사면내 응력변화 측면에서는 일방적인 재하과정이 아니라 사면의 절개장소 및 암반재료의 조도 특성에 따라 사면 내에 형성된 블록에 작용하는 응력은 증가하기도 하고 감소하기도 한다(정교철 등, 2001; Hudson and Harrison, 2000). 또한 이 차이는 사면의 절개방법에 의해서도 크게 좌우된다. 따라서 사면 내 응력의 증가 또는 감소에 대하여 사면을 구성하고 있는 지질매질들은 일반적으로 비선형의 변화거동을 한다(한국지질자원연구원, 2006; 2003). 이 때문에 암반사면에 대한 인위적 절개시점에서 암괴의 변화 예측과 안정성 평가를 위하여, 절개에 따른 사면 내 응력 변화와 그 변화에 의한 암반재료 각각의 역학적 특성을 파악하고 검토하여야 한다. 이로 인한 이들 암반사면의 파괴형태는 원형파괴(circular failure), 평면파괴(plane failure), 쐐기파괴(wedge failure), 전도파괴(toppling failure)등의 4가지 형태로 대별할 수 있으며, 각 파괴형태의 특징은 사면과 불연속면의 상대적인 방향성에 따라 결정된다(Lisle

and Leyshon, 2004; 한국지반공학회, 1997; 윤지선, 1996; Hoek and Bray, 1981).

단열구조는 절리 암반사면의 안정성을 평가하는데 사용되는 가장 중요한 요소 중 하나으로써, 본 연구에서는 단열구조의 분포 특성을 사면 안정성 해석에 효과적으로 활용할 수 있는 기법을 연구하여 절리군(joint set)이 분포하는 기하학적 특성에 대한 암반사면의 안정성 해석 체계를 단열 분포 특성을 중심으로 해석하였다. 또한 이 과정에서 수정 보완된 해석 기법을 통하여 단열구조의 분포 특성이 사면 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서는 도로변에 분포하는 암반 노두에 대해 조사범위를 설정한 후 단층 및 절리의 방향성을 Clino-compass를 이용하여 현장에서 측정하였다. 이러한 현장조사 자료를 바탕으로 Dips 5.0 (Rocscience, Inc.)을 적용해 대상 암반사면의 잠재 파괴형태를 분석하였으며, SLIDE 2D(Rocscience, Inc.)에서는 Bishop 간편법(1955)과 Janbu 간편법(1954)에 따른 전기와 우기시의 사면 안정성 평가를 수행하였다.

## 연구지역

연구지역은 경상북도 안동시 용상동 소재 선어대 남쪽방향에 위치한 절개 도로사면을 대상으로 하여 절취 암반사면의 안정성 분석을 수행하였다. 이를 위해 현장 암반사면을 붕괴되지 않은 자연사면과 붕괴 후 보강공사된 절취사면으로 나누었으며, 암반사면 해석프로그램(Dips 5.0)을 이용하여 다시 각각 2개의 사면으로 나누어 조사를 수행하였다. 본 연구지역 도로변 절개사면은 평균 높이 15m이며 연장된 길이는 100m 정도로 도로와 인접해 있으며, 차량 운행이 매우 밀집된 지역이다. 현장조사에서 암반사면 상단부에서 심도 30-40cm의 표토층이 강우 등 침투수와 표층류로 인해 무너져 나간 흔적을 볼 수 있었으며, 낙석 방지용 철망펜스에 암괴들이 걸려있는 것과 주절리 방향을 따라 암괴들이 매우 불안하게 위치해 있는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 지방 2급수 반변천 주변 아래로 발달된 단층의 영향에 의해 주변 암반사면 내 파쇄대가 형성되어 있어 사면 전체가 절리군을 형성하고 있는 구조지질학적 특징을 잘 보여주고 있다. 본 연구지역의 남쪽으로 3km 떨어진 곳에 북동-남서 방향으로 안동단층이 지나가고 있어 이 단층에 수반되는 대규모 절리들이 연구지역까지 영향을 미치고 있어 많은 절리들이 사면에 분포하고 있다. 노출된 암석을 보면 괴상 화강암질 편마암과 흑

운모 화강암으로서 관입관계를 가지고 있다(황상구, 2000; 김봉균 등, 1998; 김남장 등, 1970). 화강암질 편마암은 거의 과상이며 우백질인 흑운모 화강암화 되어 나타나 있다(Fig. 1). 대체적으로 흑운모 화강암은 육안관찰에 의하면 국부적으로 홍색장석이 함유된 암석이 발달되어 있는 지역이 있으며 유색광물은 주로 흑운모이나 소량의 각섬석이 관찰된다. 흑운모는 육안으로 볼 때 녹회색을 띠는 것과 흑운모 고유의 흑색을 띠는 것으로 나누어지는데 본 조사지역에서도 이와 같은 광물학적 특징을 잘 파악할 수 있다.

**현장조사**

암반사면을 대상으로 절개시 응력의 해방과 단층의 영향으로 생성된 절리면에 대해 사면의 방향과 경사를 자연사면과 절취사면으로 나누어 총 37개 지점에 대해 각기 측정하였다(Table 1). Fig. 2에서와 같이 자연사면은 사면 중심부가 되는 식생대를 기준으로 하여 A-a 사면(좌측부), A-b 사면(우측부)로 구분하였으며, 절취사면의 경우 단층선을 경계로하여 단층선 상단부를 B-a 사면, 하단부를 B-b 사면으로 각기 구분하여 조사를 수행하였다. 또한 본 연구지역은 전반적으로 편마암이 넓게 분포하는 지역으로써, 국내 기후특성을 고려하여 건

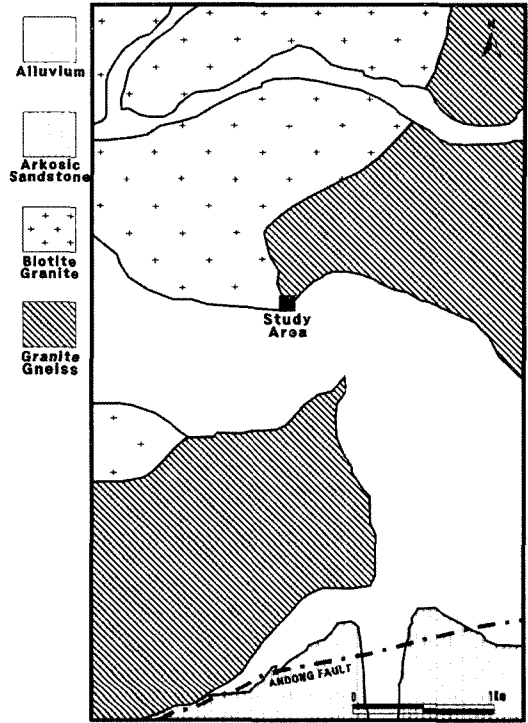


Fig. 1. Geological and topographical map of the study area.

Table 1. Verifications of dip and dip direction of rock slopes.

Feature	Natural slope			Cut slope			
	ID	Dip	Dip direction	ID	Dip	Dip Direction	
Slope	A-a	40	50	B-a	45	158	
	1	25	150	1	65	154	
	2	30	30	2	60	134	
	3	30	140	3	75	146	
	4	35	175	4	84	170	
	Joint	5	45	154	5	45	174
		6	49	147	6	46	176
		7	41	168	7	53	170
		8	31	335	8	53	189
		9	65	230	9	55	204
10		25	314	-	-	-	
Slope	A-b	54	154	B-b	67	158	
	1	50	200	1	60	189	
	2	50	142	2	55	184	
	3	58	162	3	69	138	
	4	25	201	4	47	140	
	Joint	5	35	220	5	56	186
		6	74	184	6	80	152
		7	29	100	7	71	162
		8	42	110	8	82	193
		9	54	148	9	49	140

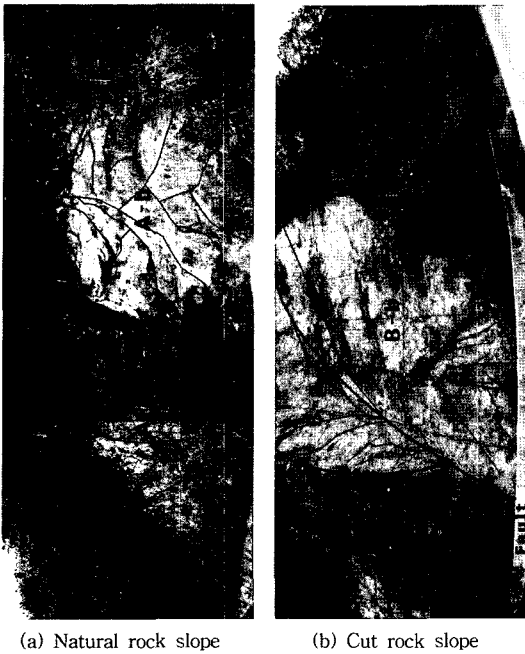


Fig. 2. View of rock slope in the study area.

기(dry season)와 우기(rainy season)로 나누어 암반사면의 내부마찰각을 설정하였다. 일반적으로 편마암에 대한 내부마찰각은 건기시 26°~29°, 우기시 23°~26°로 알려져 있으나(이인모, 2001), 본 연구에서는 현장조건을 고려하여 건기시 30°, 우기시 25°로 각기 설정하여 사면해석을 수행하였다.

### 암반사면의 안정성 평가

#### 자연사면 안정성 분석

A-a 사면에서는 우려되는 사면파괴 형태는 썩기파괴로써 Fig. 3에서 보는 바와 같이 바깥쪽 원에 해당하는 건기일 경우에 절리 번호 2, 3, 4번이 평면파괴 가능성을 내포하는 것으로 파악되었으며, 안쪽 원에 해당하는 우기일 경우에는 절리 번호 1, 2, 3, 4번이 평면파괴 가능성이 잠재되어 있는 것으로 분석되었다. 반면 전도파괴 가능성은 본 조사에서 나타나지는 않았다. 또한 Fig. 3과 4에서 나타난 것과 같이 A-a 암반사면의 경우 전도파괴의 발생 가능성은 희박한 것으로 나타났다. 반면에 하절기인 우기일 경우 썩기파괴가 예상되는 절리 번호는 2-3, 2-4, 2-7, 3-4, 3-7로 나타났다. Dips에서는 절리간의 거리가 무시된 상태에서의 상관관계를 해석하므로 실제와는 차이가 나타날 수 있다. 이에 현장

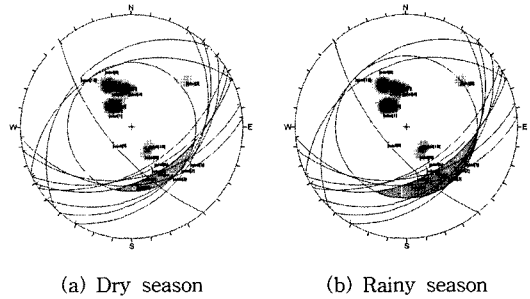


Fig. 3. Wedge failure at the A-a slope.

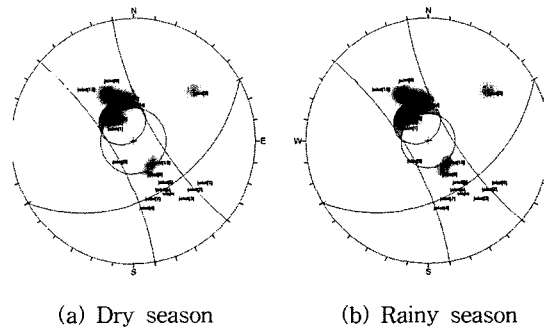


Fig. 4. Planar failure at the A-a slope.

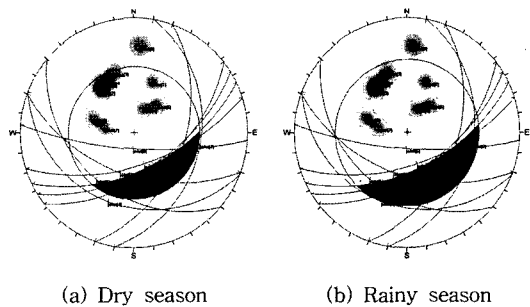


Fig. 5. Wedge failure at the A-b slope.

암반사면에서 블록 형성이 예상되는 절리를 선정하여 이에 대한 파괴가능성을 결정하는 것이 바람직할 것이다. 그리고 건조할 경우에도 사면의 경사방향과 연계되어 썩기파괴의 가능성이 존재할 것으로 판단된다.

A-b 사면에서 측정된 주 사면과 절리군에 대한 사면 안정성 분석결과에서는 Fig. 5에서와 같이 썩기파괴의 발생 가능성이 지배적으로 나타났다. 특히 바깥쪽 원에 해당하는 건기시에 2번 절리 지점에서 평면파괴의 경향을 보이고 있으며, 안쪽 원에 해당하는 우기의 경우에는 2, 4번에서 평면파괴 가능성을 내포하고 있다. 하지만 A-

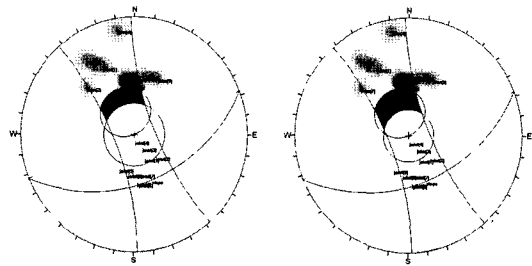
a 사면 분석결과에서와 같이 본 사면에서의 전도파괴 가능성은 매우 희박한 것으로 나타났다. 여기서, 우기 일 경우와 건기 일 경우 쉼기파괴의 정도가 다르게 나타난다. Fig. 6의 왼쪽 원은 건기 일 경우로 내부마찰각 30°일 경우에 해당되며, 바깥쪽 원은 우기 일 경우로서 내부마찰각 25°일 경우에 해당한다. 건기 일 경우 쉼기파괴를 일으킬 것으로 예상되는 절리번호는 1-2, 1-3, 1-8, 1-9, 2-5, 3-8, 6-8이며, 우기 일 경우 쉼기파괴를 일으킬 것으로 예상되는 절리번호는 1-2, 1-3, 1-8, 1-9, 2-5, 3-8, 6-8, 6-7로 나타났다. A-b 사면의 절리들이 연관하여 쉼기파괴를 일으킬 경우 그 예상방향은 약 58/320으로써 대표적으로 1번 절리 방향에 의해 파괴상이 구속되어 있음을 알 수 있다.

**절취사면 안정성 분석**

B-a 사면은 Fig. 7에서와 같이 전반적인 기하학적 정보 분석결과에서와 같이 전도파괴 및 평면파괴의 위험성에는 노출되지 않았지만 쉼기파괴 가능성(Fig. 8)을 내포하고 있는 것으로 판단된다. 본 사면의 경우 우기(내부마찰각 25°)와 건기(내부마찰각 30°) 일 경우에도 쉼기파괴의 발생가능성이 높은 것으로 분석되었다. 쉼

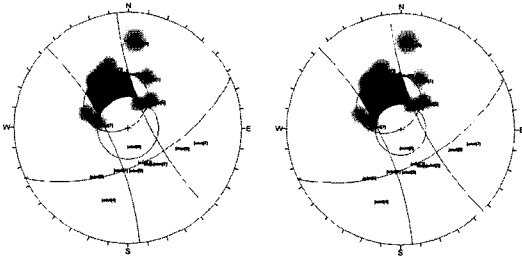
기파괴의 예상되는 절리번호는 5-6, 5-8, 5-9, 6-8, 6-9로 일정한 방향성을 갖는 것으로 나타났다.

B-b 사면의 경우 대표적으로 발생가능한 사면파괴 형태는 쉼기파괴 가능성을 가지고 있으며, Fig. 9와 같이 건기 일 경우와 우기 일 경우 모두 4, 9번 절리지점에서 평면파괴 발생 가능성도 함께 내포하고 있다. 여기서 Fig. 10의 분석결과와 같이, 건기에 해당하는 내부마찰각 30° 범위 내에서 쉼기파괴를 일으킬 수 있는 절리군은 전반적으로 1번, 2번, 4번 절리면의 구속에 의



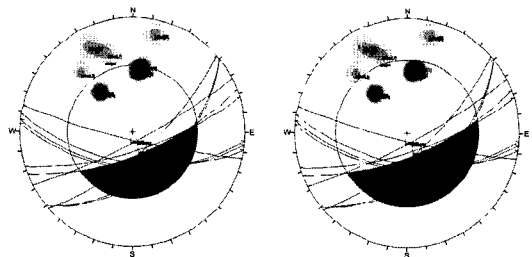
(a) Dry season (b) Rainy season

Fig. 8. Planar failure at the B-a slope.



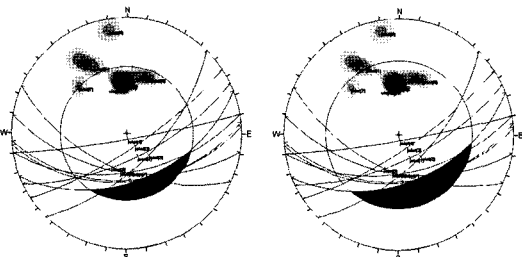
(a) Dry season (b) Rainy season

Fig. 6. Planar failure at the A-b slope.



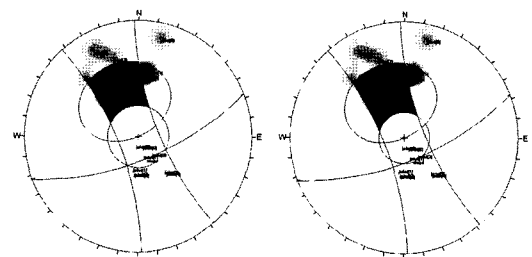
(a) Dry season (b) Rainy season

Fig. 9. Wedge failure at the B-b slope.



(a) Dry season (b) Rainy season

Fig. 7. Wedge failure at the B-a slope.



(a) Dry season (b) Rainy season

Fig. 10. Planar failure at the B-a slope.

해 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-9, 2-3, 2-5, 2-9, 3-5, 3-8, 4-5, 4-7, 4-8, 4-9, 5-9, 8-9로써 다소 넓게 분포하고 있다. 또한 우기시 건기의 파괴 형상과 비슷한 절리면의 영향으로 인해 쉼기파괴 예상 절리군은 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-9, 2-3, 2-4, 2-5, 2-9, 3-5, 3-8, 4-5, 4-7, 4-8, 4-9, 5-9, 7-9, 8-9로 나타났다. 이러한 절리군의 경향성을 토대로 볼 때 B-b 사면의 절리들이 연관하여 쉼기파괴를 일으킬 경우 그 예상방향은 70/341 방향으로 추정된다.

### 사면 수치해석을 통한 안정성 분석

본 암반사면에 대한 모델링은 SLIDE 2D(Rocscience Inc.)를 적용해 대상 암반사면의 수치해석을 수행하였다. SLIDE 2D는 토사 및 암반사면에 대해 원호 내지 비원 호파괴의 안전율을 평가 분석할 수 있는 2차원 수치해석 프로그램으로 Bishop 간편법(1955)과 Janbu 간편법(1954)을 적용하여 전단강도  $\tau$ 에 대한 사면 안전율을 산정하였다. SLIDE 2D를 적용할 때 입력변수로서는 사면을 구성하는 암석의 단위중량, 사면의 높이와 넓이,  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$  공식에 속하는 점착력( $c$ )과 응력( $\sigma_n$ ), 그리고 사면의 각도( $\phi$ )가 있다. 본 암반사면을 이루고 있는 편마암의 단위중량은 다음 식으로 구했다.

$$\gamma = \rho \cdot g \tag{1}$$

여기서 편마암의 평균 밀도( $\rho$ )는  $2.8 \text{ g/cm}^3$ 이며,  $g$ 는 중력가속도로  $9.8 \text{ m/sec}^2$ 로 식 (1)에 의해 편마암의 단위중량은  $2.7 \text{ kN/m}^3$ 로 산정하였다.

사면의 높이는 자연사면 13m, 절취사면 17m이며, 점착력은 편마암의 경우 식 (1)에서 계산된 단위중량  $2.7 \text{ kN/m}^2$ 로 설정하여 입력하였다. 실질적으로 점착력은 실내전단시험을 통하여 산정하여야 하지만, 본 연구에서는 계산된 편마암의 단위중량을 적용하였으며, 내부 마찰각은 Dips에서 입력변수로 사용한 건기  $30^\circ$ 와 우기  $25^\circ$ 를 적용하였다. 또한 사면의 각도는 현장에서 자연

사면의 경우  $47^\circ$ , 절취사면의 경우  $56^\circ$ 로 측정되었다.

사면의 활동에 대한 안전율은 해석방법에 따라 각각 다를 수 있으며, 또 안전율은 안정성을 나타내는 지표이기도 하지만 현재로서는 오히려 설계에서의 여러 가지 불명확한 점을 보상하는 계수로서의 뜻이 강하다. 안전율의 크기에 의해서 안정성을 정량적으로 비교할 수 있는 것은 엄밀하게는 동일 조건의 구조물에서만 가능한 것이며, 조건이 다른 구조물에서는 안정성의 비교가 곤란하다. 절취사면의 원 지반은 매우 복잡하고 불균일하며, 또한 절취 후 시간의 경과에 따라 응력 이완, 대기 노출로 인한 풍화 등으로 인해 원지반의 공학적 특성이 사면안정에 불리한 쪽으로 진행되는 점을 충분히 감안해야만 한다(윤지선, 1996; 산업기지개발공사, 1985). 본 연구에서는 상기와 같은 내용을 고려하여 Table 2와 같이 최소안전율(minimum safety factor) 개념을 적용하였으며, 암반층에서 우기시 수압을  $1/2H$ 로 가정하여 수치모의를 수행하였다.

### 사면 수치해석

본 연구지역의 사면 모델링 수치해석을 통해 자연사면에 대한 안전율은 건조할 경우를 예상하여 최대 이상적인 값으로 모델링한 결과, Bishop 간편법을 적용하였을 경우 1.366, Janbu 교정법을 적용하였을 경우 1.380, Janbu 간편법을 적용하였을 경우 1.303으로 나타났다(Fig. 11(a)). 그리고 우기시 최대 이상적인 값으로 모델링한 결과에서는 Bishop 간편법을 적용하였을 경우 1.211, Janbu 교정법을 적용하였을 경우 1.229, Janbu 간편법을 적용하였을 경우 1.160으로 나타났다(Fig. 11(b)). 이러한 결과는 한국도로공사(1996)에서 제시한 건기시의 최소안전율과 비교해 다소 미흡하게 나타났으나 우기시에는 최소안전율과 비슷한 경향을 보여준다.

절취사면에 대한 안전율은 자연사면 해석방법과 동일한 수법으로 건조할 경우 최대 이상적인 값으로 모델링한 결과, Bishop 간편법에서는 1.088, Janbu 교정법을 적용하였을 경우 1.115, Janbu 간편법을 적용하였을 때는 1.063의 결과를 도출하였다(Fig. 12(a)). 또한 우기시

**Table 2.** Minimum safety factor for analysing rock slope using SLIDE 2D ( 한국도로공사 , 1996).

Mass condition	Minimum safety factor	Remarks
Dry season	$F_s \geq 1.5$	· Rock mass: Dry season (No domination of the water pressure due to the activity face or extension crack), Rainy season (Application of $H_w = 1/2H$ that dominate to the activity face or extension crack)
Rainy season	$F_s \geq 1.2$	· Soil and weathered rock: Dry season (No consideration of the groundwater table), Rainy season (Consideration of groundwater table GL-3.0 m)

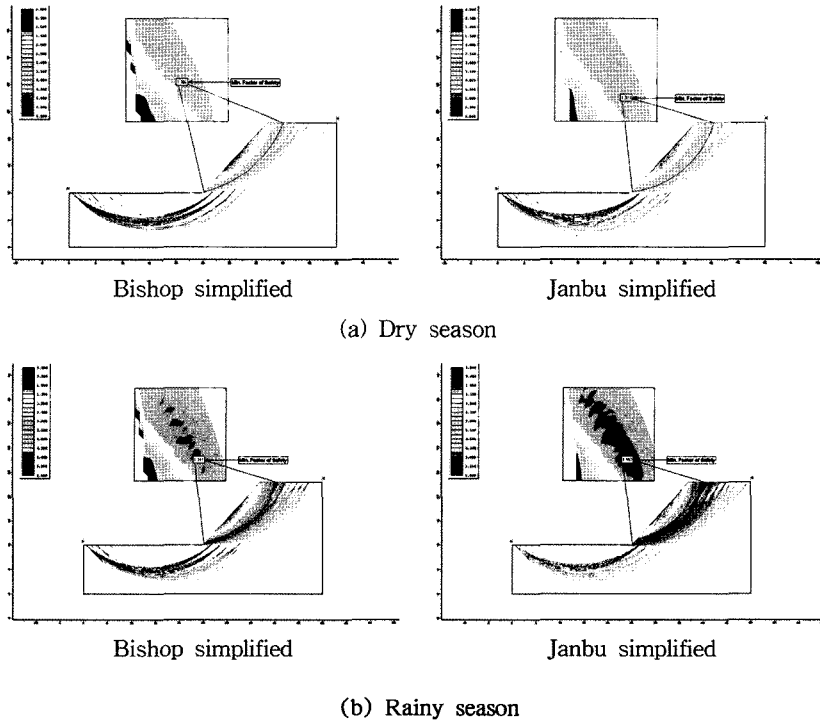


Fig. 11. Results of numerical analysis using SLIDE 2D at the natural slope.

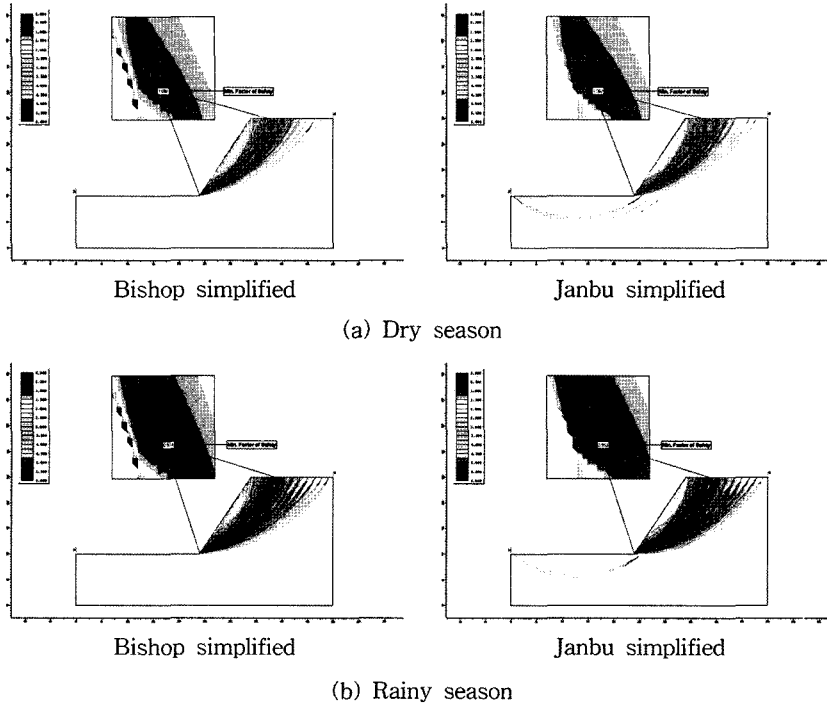


Fig. 12. Results of numerical analysis using SLIDE 2D at the cut slope.

최대 이상적인 값으로 모델링한 결과에서는 Bishop 간편법을 적용하였을 경우 0.974, Janbu 교정법을 적용시 1.001, Janbu 간편법을 적용하였을 경우 0.953으로 나타났다(Fig. 12(b)). 건기와 우기시의 최소안전율이 낮게 나타났으며 특히 우기시에는 최소 안전율이 1이하로 분석되었다. 자연사면에서의 해석결과보다 절취사면에서의 최소안전율 범위가 매우 낮게 분석되어 건기와 우기시 모두 사면 안정성에 취약성을 가지고 있는 것으로 생각된다. 이는 현장에서 측정된 대상 사면의 평균 각도와 비교해서도 약 10° 이상 차이를 갖고 있기 때문에 이에 대한 대책이 요구된다. 현재 이 지역은 도로 확장 공사로 인해 사면을 절취한 상태이지만 2006년 집중호우 당시 공사 중 붕괴가 발생되어 대상 암반사면에 대한 조사 및 보강대책이 이루어져야 할 것이다.

## 결 론

연구지역 일대에 분포하는 암석은 단층에 의한 대규모 절리군이 형성되어 있어 대상 암반사면에 걸쳐 비교적 풍화암 내지 연암의 암석학적 풍화특성을 잘 보여주고 있는 편마암지역이다. 특히 절취사면의 경우 사면 상부에 형성된 표토층이 집중 강우로 붕괴된 흔적을 볼 수 있으며, 현재도 돌출된 암괴군이 철망에 걸려있는 것을 확인할 수 있다. 자연사면은 절취사면과의 기하학적 절리 분포특성과 비교해 상대적으로 위험 요소가 적어 보이지만, 이 역시 사면 안정성 분석 결과에서는 사면의 붕괴가능성이 높은 것으로 나타났다.

자연사면의 경우는 Dips에 의한 해석 결과, 4개 지점의 주 사면부에서 대부분 쉐기파괴가 우세한 것으로 해석되었다. 또한 일부 사면에서 평면파괴가 인지되었지만 이 해석은 실제 현장 상황과는 다소 차이를 가지고 있다. 이와 같은 분석결과는 현장조사에서 주 사면과 절리군의 방향이 거리상으로 안정한 상태를 유지하고 있는 것으로 관찰되나 Dips 상에서 구현되는 분석 결과는 절리군의 거리 자료를 포함하고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이는 다수의 절리들이 서로 얽혀있어 사면 경사 방향으로 순수한 평면파괴만 일어날 것이라고 기대하기 어렵기 때문이다. 또한 본 사면에서의 전도파괴의 발생 가능성은 파악되지 않았다. 절취사면 역시 쉐기파괴가 우세하고, 평면파괴가 약하게 추측되지만 전도파괴의 가능성은 보이지 않는다. 실제 절취사면에서는 2003년도 집중 강우로 인해 쉐기파괴 형태의 사면 붕괴가 발생되었다.

본 연구에서 자연사면 및 절취사면에 대해 건기와 우기조건으로 구분하여 수치 해석한 결과에서도 절취사면의 경우, 최소안전율 대비 건기조건일 경우 약 70.8~74.3%, 우기조건일 경우 약 79.4~83.4%로 낮은 안전율을 분포를 보이고 있다. 현재는 보호공법으로 단지 낙석방지용 철망펜스를 이용하였지만 이러한 방지대책만으로 사면 붕괴 가능성이 축적된 압괴를 안정화하기엔 역부족이다. 또한 이들은 그 자체의 하중에 의해 때때로 불안정 사면의 사면 붕괴 가능성을 증가시키는 요인으로 작용하기도 한다. 예를 들어 거대하게 형성된 압괴군에 철망펜스를 고정시켰을 경우 오히려 작은 규모의 슬라이딩이 일어날 것을 대규모화 시키는 원인이 되기도 한다는 것이다. 또한 현재도 암반사면의 붕괴가 일어나고 있는 시점에서 철망에 걸려있는 암괴군의 붕괴 가능성을 내재하고 있는 실정이다. 이러한 암반사면의 안정성 평가 연구결과로 볼 때 자연사면과 절취사면 지점에 대한 사면안정화 대책방안의 수립이 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태재해 예측 및 저감기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김남장, 강필중, 이흥규, 1970, 한국지질도 1:50,000, 중평동도폭 설명서, 국립 지질 조사소.
- 김봉균, 이하영, 김수진, 정지곤, 1998, 한국지질도 1:50,000, 안동도폭 지질보고서. 한국동력자원연구소.
- 김중은, 이민성, 2006, 암반상의 대형구조물기초, 일본토목학회·대한토목학회, KSCE-SC-100-06-01-B, (주)시그마프레스, 309p.
- 산업기지개발공사, 1985, 암반사면안정분석에 관한 연구(보고서).
- 이수곤, 2002, 2002지질공학 단기 실무강좌-지질공학과 시추공 탐사, 대한지질공학·농업기반공사, pp.243-274.
- 이인모, 2001, 암반역학의 원리, 도서출판 새롬, 169p.
- 윤지선, 1996, 암반역학, 구미서관.
- 정교철, 손호웅, 김상환, 서용석, 2001, 사면안정해석, 엔지니어즈.
- 최영근, 2003, 2003지질공학 단기 실무강좌-지반개량 및 보강공법, 대한지질공학회·농업기반공사, pp.1-60.
- 한국지반공학회, 1997, 사면안정, 구미서관.
- 한국지질자원연구원, 2006, 대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역) 연구보고서, 과학기술부.
- 한국지질자원연구원, 2003, 자연재해방재기술개발사업(산사태 예측 및 방지기술 연구) 연구보고서, 과학기술부.



한국도로공사, 1996, 도로설계실무편람 -토질 및 기초-.  
 황상구, 2000, 안동저반, 한국암석학회·한국광물학회.  
 Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M., 1996, Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, Inc., 629p.  
 Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, Vol. 5, pp.7-17.  
 Hoek, E. and Bray, J., 1981, Rock slope engineering: 3rd edition, The institution of mining and metallurgy, London, 358p.  
 Hudson, J. A. and Harrison, J. P., 2000, Engineering rock mechanics: an introduction to the principles, Pergamon, 444p.  
 Janbu, N., 1954, Application of composite slip surface for stability analysis, Proceeding of European Conference on Stability of Earth Slopes, 3, pp.43-49.  
 Lisle, R. J. and Leyshon, P. R., 2004, Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers: 2nd edition, Cambridge University Press, 120p.  
 Slide 2D, Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes: Verification manual, Rocscience INC.

**김종태**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 Tel: 054-820-5182  
 Fax: 054-822-5467  
 E-mail: jongtae98@empal.com

**채병곤**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해 연구실  
 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지  
 Tel: 042-868-3052  
 Fax: 042-861-9723  
 E-mail: bgchae@kigam.re.kr

**정교철**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 Tel: 054-820-5753  
 Fax: 054-822-5467  
 E-mail: jeong@andong.ac.kr

---

2007년 5월 10일 원고접수, 2007년 6월 15일 게재승인

**김만일**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해 연구실  
 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지  
 Tel: 042-868-3117  
 Fax: 042-861-9723  
 E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

**배두원**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 Tel: 054-820-5182  
 Fax: 054-822-5467  
 E-mail: baedw00@nate.com