

## 편마암 풍화사면에서의 지구물리탐사 및 안정성 해석 사례연구

김만일<sup>1</sup> · 김종태<sup>2</sup> · 김재홍<sup>3</sup> · 노병돈<sup>4</sup> · 정교철<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부, <sup>2</sup>안동대학교 지구환경과학과  
<sup>3</sup>한국수자원공사 수자원연구원, <sup>4</sup>삼성물산 건설부문 TA팀

### Case Study of Assessment of Slope Stability and Geophysical Survey in Weathered Gneiss

Man-Il Kim<sup>1</sup>, Jong-Tae Kim<sup>2</sup>, Jae-Hong Kim<sup>3</sup>, Byung-Don Ro<sup>4</sup>, and Gyo-Cheol Jeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

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

<sup>3</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

<sup>4</sup>Technical Advice Team, Samsung Corp.

암반사면은 다수의 불규칙한 패틴의 불연속면들이 내재되어 있는 불연속체로써 암반 내에 존재하는 절리는 암반의 수리적, 역학적 거동을 좌우하는 중요한 요소이다. 이러한 절리들의 수리적, 역학적인 특성은 각각 다르게 나타날 수 있으며, 이러한 특성은 사면 설계에 중요한 요소이다. 다수의 절리패틴을 가진 암반의 구조적 특성을 사면안정해석과 물리탐사 결과로부터 분석하여 지반의 구조적 문제점을 분석하였다. 본 연구지역은 5개 구간을 설정하여 총 5개 축선에 대해 전기비저항 쌍극자탐사를 실시하였으며, 20개 사면에 대해 SWEDGE 및 SLIDE 프로그램을 이용해 사면 안정성 해석을 함께 수행하였다.

**주요어** : 전기비저항탐사, 사면안정해석, SWEDGE, SLIDE

Rock slope has a variety of irregular discontinuities and represents a discontinuous mass. Rock joint plays an important role of control hydraulic and mechanic movements in the rock mass. These characteristics between hydraulic and mechanic movements at the rock joints could be represent difference. Therefore they are quiet important factor for slope design. In this study the weathered rock slopes were carried out to analysis of slope stability and geophysical survey. The electrical resistivity survey with dipole-dipole array conducted five profiling sites, and SWEDGE and SLIDE for slope stability analysis were applied on 20 rock slopes for assessment of slope stability and understand to geological situations due to the weathering.

**Key words** : electrical resistivity survey, slope stability analysis, SWEDGE, SLIDE

## 서 론

풍화사면의 경우 붕괴현상은 산사태와 같은 완만한 변동에 비해서 전조현상이 잘 나타나지 않으며 움직임이 급한 것이 특징이다. 풍화의 속도로서는 치밀하고 굳은 암석보다 다공질이고 연약한 암석이 빠르나 기후조건 등에 의해서 현저히 달라진다. 기온의 교차가 심한 곳에서는 암석의 팽창·수축의 반복, 강우가 많은 곳에서는 화학적 풍화작용이 빨리 진행된다(대한토목학회, 2004). 자

연사면의 경우 자연적으로 이루어져 있거나 깎아서 만든 것으로 흙과 암석이 불규칙하게 뒤섞인 불균질한 지층을 이루기도 하며 때로는 암석이 풍화되어 있거나 단층, 절리 등이 잘 발달되어 있어서 상당히 복잡하다. 이에 사면에 관한 안정 문제의 해결은 토질 공학적인 접근과 더불어 지질학적, 지형학적 그리고 암반 공학적인 이론 등을 조합한 접근 방법이 요구된다(이송 등, 2002).

사면활동에 대한 안전율은 해석방법에 따라 각각 다를 수 있다. 안전율의 크기에 의해서 안정성을 정량적으

\*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

로 비교할 수 있는 것은 엄밀하게는 동일 조건의 구조물에서만 가능한 것이며, 조건이 다른 구조물에서는 안정성의 비교가 곤란하다. 원지반은 아주 복잡하고 불균일하며, 사면시공 후 시간의 경과에 따라 응력 이완, 대기노출로 인한 풍화 등으로 원지반의 공학적 특성이 사면안정에 불리한 쪽으로 진행되는 점을 충분히 감안하여야 한다. 암반의 역학적 거동에 영향을 미치는 여러 요소 중 하나는 암반에 발달되어 있는 절리의 상태이다(정교철 외, 2001; Hoek and Brown, 1980). 암반은 수많은 불연속면들이 내재되어 있는 불연속체로써 암반 내에 존재하는 절리는 암반의 수리적, 역학적 거동을 좌우하는 중요한 요소이다. 이러한 절리들의 수리적, 역학적인 특성은 각각 다르게 나타날 수 있으며, 이러한 특성은 사면 설계에 중요한 요소로 작용한다. 현재 암반 구조물 해석 시 대상 절리 암반의 구조적 특성을 심도있게 표현하지 못하는 경향이 있다(엄정기, 2007).

이에 본 연구의 목적은 안동시 임하면에 위치한 임하댐 진입로 절개사면의 안정성 조사를 위해 실시되었으며, 이를 위해 지구물리탐사, 현장조사, 맵핑 및 사면 안정성 해석 등을 실시하여 대상 사면에 대해 전반적인 검토가 이루어졌다. 특히, 다수의 절리패턴을 가진 암반의 구조적 특성을 물리탐사 결과로부터 분석하여 지반의 구조적 문제점을 면밀히 분석하였다. 연구지역의 경우 5개 구간을 설정하여 총 5개 축선에 대해 전기비저항 쌍극자탐사를 실시하였으며 5개 구간에 대해 20개 사면으로 나누어 사면 조사 및 SWEDGE 및 SLIDE 프로그램을 이용해 사면 안정성 해석을 함께 수행하였다.

**연구방법**

**지형 및 지질**

연구지역은 행정구역상 안동시 임하면에 위치하고 있

**Table 1.** Classification of survey area.

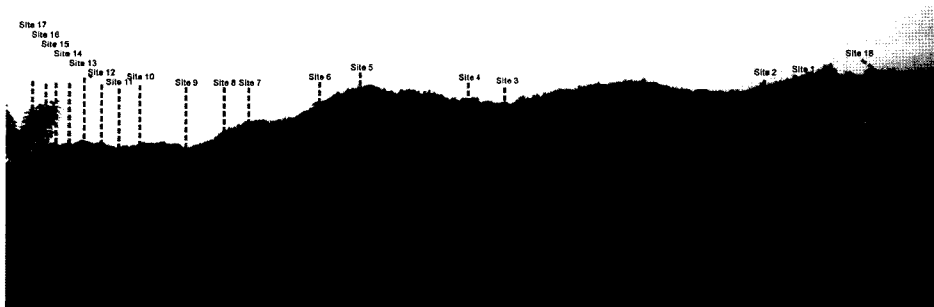
Location	Site
A area	S1, S2
B area	S3, S4, S5, S6, S7, S8
C area	S9, S10, S11, S12
D area	S13, S14, S15, S16, S17
E area	S18, S19, S20

으며, 산계는 동쪽으로 해발 591m의 아기산이 남쪽으로 해발 542.2m의 기용산이 서쪽으로 해발 450m의 둔지산이 최고봉으로 위치해 있다. 수계는 백일천과 이천천, 길안천이 합류하는 반변천이 발달하고 있으며 북쪽에는 안동댐이 동쪽에는 임하댐이 위치해 있다. 본 지역의 지질은 전반적으로 선캄브리아기의 호상편마암, 화강암질편마암, 석회암 및 주라기의 화강암, 백악기의 일직층, 후평동층, 집곡층, 기송동층 그리고 제 4기 충적층으로 구분된다. 연구지역에 분포하는 주요 암석은 주라기 화강암이 대부분으로 중립질이며 사면 하부에는 신선한 암이 소수 노출되어 있지만, 조사 구간에 따라 다양한 양상을 보인다. 대상 사면에 노출된 암반의 절리 상태는 대부분 충전물질은 없거나 5mm 미만의 단단한 충전물이 있는 것으로 확인되었으며, 풍화상태는 대체로 MW~HW 상태인 것으로 조사되었다.

**연구지역**

연구지역은 전체 사면을 대상으로 계곡이 발달한 지점을 경계로 5개 지역으로 나눈 후, 상세 조사지역을 총 20개 구간으로 다시 구분하였다(Table 1). Fig. 1은 연구지역에 위치한 각 조사구간의 위치를 개략적으로 나타낸 것이다.

20개의 사면을 분석하여 사면붕괴 가능성이 가장 높은 Site 7과 Site 13 사면에 대해 현장조사를 수행하였



**Fig. 1.** Location of the study area.

다. Site 7의 사면은 사면 높이 10m에 70°의 사면 경사를 가지고 있으며, 단층은 관찰되지 않았다. 사면 상부에 교차하는 절리로 인해 썩기파괴 가능성이 있을 것으로 판단되며, 이로 인해 과거 썩기파괴가 발생한 것으로 조사되었다. 본 사면의 경우 크게 두 법면으로 구분하여 좌측사면에서 불안정 블록이 다수 분포하고 있는 것으로 관찰되었다. 이에 반해 우측사면의 경우 절리수는 적지만 다수의 식생과 풍화로 인해 사면붕괴 가능성이 존재해 있어 이에 대한 사면해석이 필요하다. Site 13 사면은 사면 높이 15m, 경사 70°로 다수의 절리를 포함하고 있어 낙석 방지망과 낙석 방지벽이 설치되어 있지만 key 블록의 낙하로 인해 붕괴가능성이 있을 것으로 판단되는 사면이다. 전반적으로 사면 가장 자리에 다수의 작은 블록이 분포하며 중심부에 큰 블록이 위치하고 있다. 또한, 과거 사면붕괴로 인해 토사가 많이 흘러내렸으며 수직절리와 수평절리의 형성 패턴에 의해 사면붕괴 발생 가능성이 있는 것으로 판단된다.

**지구물리탐사 및 결과**

본 조사지역에서의 전기비저항 쌍극자탐사는 총 5개 측선(5개 구간에 대해 전극 간격을 10m로 설정하여 수행하였다. 탐사장비는 미국 AGI사 제품인 MINI STING Earth Resistivity/IP meter 모델의 전기비저항 탐사기를 사용하였다. 측선설치 현황은 Table 2 및 Fig. 2와 같이 임하대교에서 비상여수로 건설현장 굴착사면까지 진행하였으며 가탐심도는 50m로 표고차에 따른 보정을 함께 실시하였다.

**1 구간**

임하대교에서 시작하는 1 구간에 대한 비저항탐사 결과에서 고비저항대(적·황색부) 상부는 단속적, 하부는 측점 20까지 하부에 광범위하게 분포해 있다. 상부는 차별 풍화작용에 의한 핵석 발달 구간이며, 하부는 기반암에 해당되는 것으로 판단되었다.

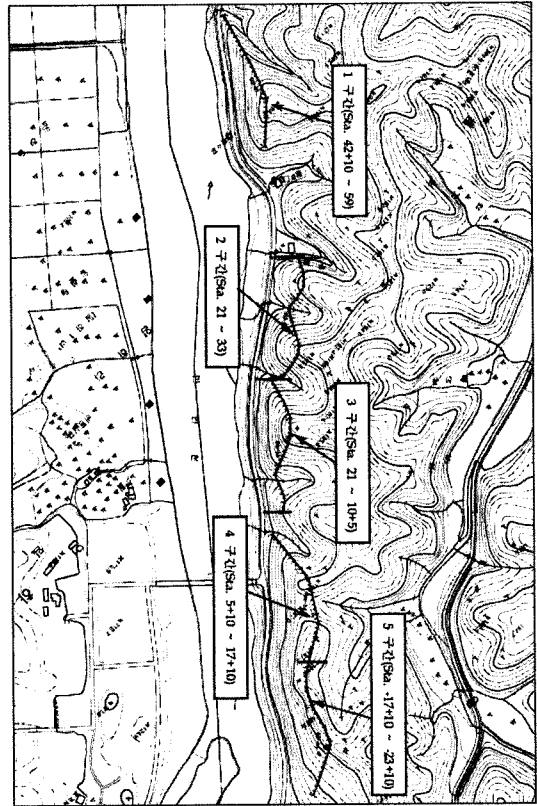


Fig. 2. Location of survey sections for electrical resistivity along the river.

Fig. 3에서 청색과 녹색부에 해당하는 저·중비저항대는 상부에 두껍게 분포하고 있으며, 특히, 청색부는 함수비가 높은 메질로 예측된다. 측점 22-26 사이의 상부에 저비저항대가 하부로 연장되어 발달되어 있다. 고비저항대와 저비저항대의 경계부분은 대체적으로 취약한 지반으로 구성되어 있을 것으로 판단되며, 상부 고립된 형태의 고비저항대는 차별풍화에 의한 핵석 발달 구간인 것으로 평가된다. 낮은 비저항대는 함수대 발달구간, 종점부에서는 저비저항대가 하부로 연장되어 발달하는 특징을 보여, 기반암 내에 풍화대 또는 취약부가 발달할 것으로 예상되는 구간이다.

Table 2. Profiling of dipole-dipole array based on electrical resistivity method for tested sites.

Section	Distance (m)	No. electrode	Electrode length (m)
Section 1 (Sta. 42+10~59)	290	30	10
Section 2 (Sta. 33~41+10)	290	30	10
Section 3 (Sta. 10+5~21)	290	30	10
Section 4 (Sta. 5+10~17+10)	290	30	10
Section 5 (Sta. -17+10~23+10)	290	30	10

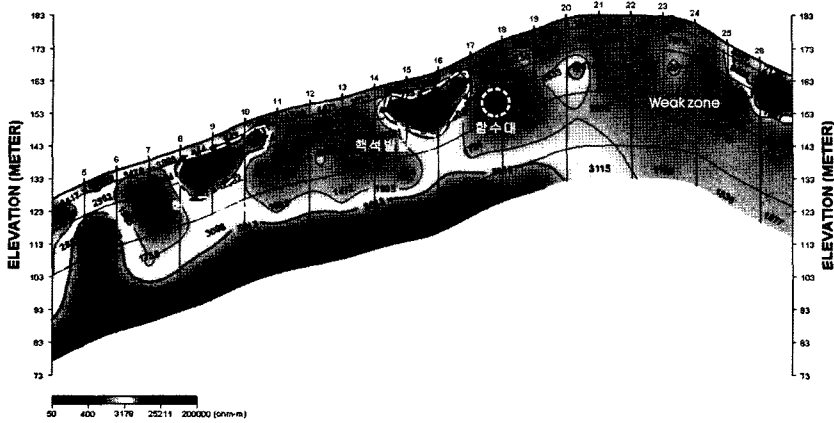


Fig. 3. Cross-section view at the section 1.

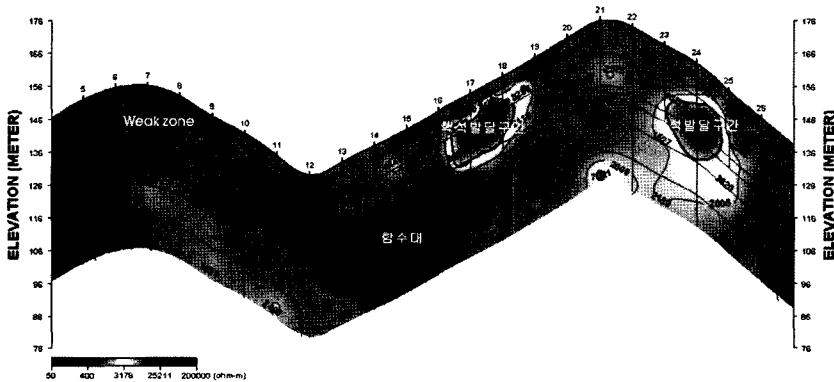


Fig. 4. Cross-section view at the section 2.

2 구간

2구간의 경우, 고비저항대(적·황색부) 상부는 단속적, 하부는 축점 21 부근의 하부에 부분적으로 분포해 있다. 상부는 차별풍화 작용에 의한 핵석발달 구간에 해당된다. 저·중비저항대(청색 및 녹색부)는 전구간에 광범위하게 분포하고 있으며, 청색부는 함수비가 높은 매질로 예측된다(Fig. 4). 특히, 축점 10~19 사이의 상부에 저비저항대가 지형과 거의 평행하게 발달하고 있어 지하수에 의한 영향일 것으로 판단된다.

핵석으로 예상되는 고비저항대가 상부 일부에서 발달되어 있으며, 낮은 비저항대는 조사구간 전반에 걸쳐 광범위하게 나타난다. Fig. 4에서 축점 7~8 구간에 해당하는 지점에 나타나는 저비저항대는 사면 정상 붕괴부 영역에 해당하며, 축점 10~19구간은 저비저항대가 지형과 거의 평행하게 발달하고 있어 지하수에 의한 영향일 것으로 예상된다. 그 외의 저비저항대는 풍화대 또는 취약부가 발달할 것으로 판단된다.

3 구간

3구간은 고비저항대는 상부·하부에서 단속적으로 분포하며, 상부는 차별풍화작용에 의한 핵석 발달 구간과 하부는 기반암에 해당된다(Fig. 5). 저·중비저항대는 전구간에 광범위하게 분포(특히 청색부는 함수비가 높은 매질로 예측됨)해 있다. 핵석으로 예상되는 고비저항대가 상부 일부에서 발달해 전체적으로 낮은 비저항대가 광범위하게 발달되어 있으며, 축점 5~6 구간의 저비저항대는 풍화대 또는 파쇄대에 의한 취약지반이 발달할 것으로 예상되는 구간이다. 축점 13과 21 구간의 하부는 함수대에 의한 영향인 것으로 분석된다.

4 구간

임하교를 지나서 절개사면 전까지가 4 구간에 해당하는 구간으로 고비저항대(적·황색부)의 상부는 단속적이며, 하부는 축점 18까지 고비저항대가 광범위하게 분포해 있다. 상부는 차별풍화작용에 의한 핵석이 발

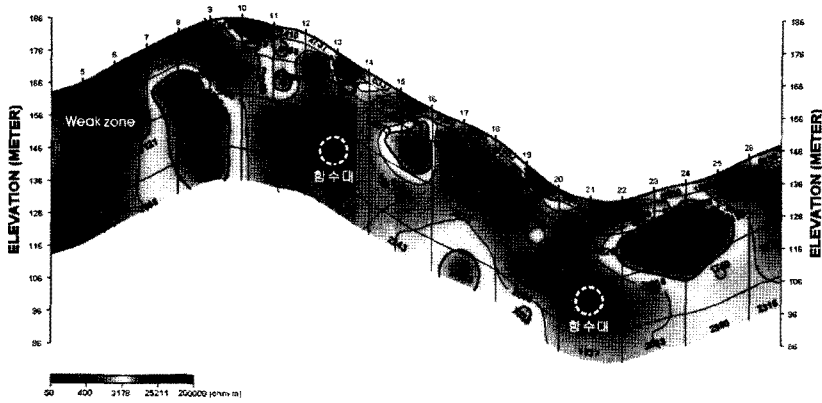


Fig. 5. Cross-section view at the section 3.

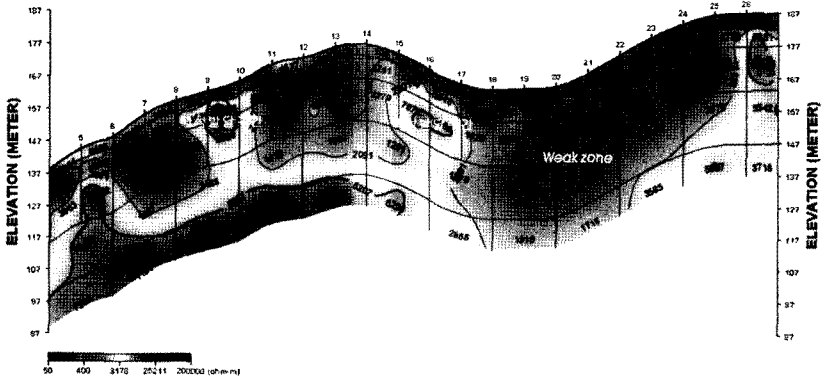


Fig. 6. Cross-section view at the section 4.

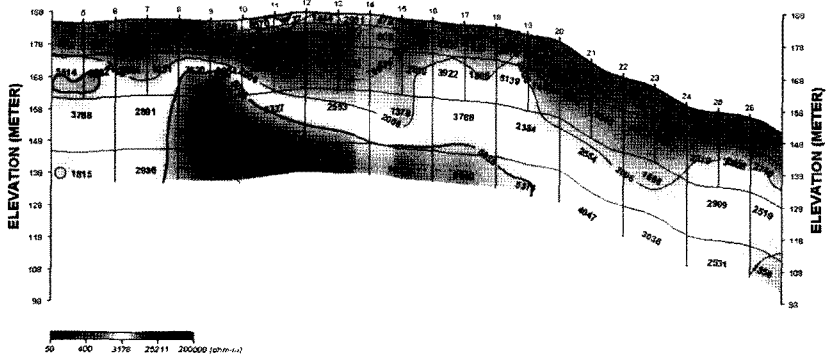


Fig. 7. Cross-section view at the section 5.

달한 구간으로 판단된다.

Fig. 6에서와 같이 청색과 녹색부의 저·중비저항대는 상부에 두껍게 분포해 있으며, 여기서 청색부는 함수비가 높은 메질로 예측되는 지점이다. 특히, 축점 19~23 사이의 상부에 저비저항대가 하부로 연장되어

발달되었다. 고비저항대와 저비저항대의 경계부분은 대체적으로 취약한 지반으로 구성되어 있을 것으로 판단되며, 상부 고립된 형태의 고비저항대는 차별풍화에 의한 핵석발달 구간, 낮은 비저항대는 함수대 발달구간, 중점부에서는 저비저항대가 하부로 연장되어 발달하는

특징을 보여줌으로써 기반암 내에 풍화대 또는 취약부가 발달할 것으로 예상된다.

5 구간

임하교와 비상여수로 공사구간 사이의 절개사면 구간에 해당하는 지점으로 고비저항대(적·황색부)의 상부는 단속적, 하부 전구간에 광범위하게 분포하며, 상부는 차별풍화작용에 의한 핵석 발달 구간, 하부는 기반암에 해당된다(Fig. 7).

함수비가 높은 매질로 예측되는 저·중비저항대(청색 및 녹색부)는 상부에 두껍게 분포하고 있으며, 시·중점 하부에서 단속적으로 발달하였다. 고비저항대와 저비저항대의 경계부분은 대체적으로 취약한 지반으로 구성되어 있을 것으로 판단되며, 경계는 지형의 기복과 거의 평행하게 발달된 것을 알 수 있다. 상대적으로 상부 풍화대가 두껍게 발달할 것으로 예상되며, 부분적으로 차별풍화에 의한 핵석발달 구간이 분포할 것으로 판단된다.

사면안정 해석

SWEDGE

사면 안정해석 프로그램인 SWEDGE를 사용하여 분

조사지역의 썩기파괴에 대한 한계평형해석을 실시하였다. SWEDGE는 암반의 파괴형상 중 불연속면으로 인한 썩기파괴 해석을 한계평형론으로 해석하여 암반의 불연속면에 의해 형성되는 썩기의 기하학적 특성 및 안정성을 분석하기 위한 해석 프로그램이다(광해방지사업단, 2007).

SWEDGE 해석은 인장균열에 의해 발달한 두 개의 교차하는 불연속면을 분석하여 암반사면 내에서 썩기 파괴 발생 가능성에 대한 사면 안전율을 분석한다. 또한, 썩기의 방향성, 불연속면의 방향성, 암석의 단위중량, 점착력, 마찰각 등이 상수를 입력 변수로 사용하여 사면 안정성 해석이 이루어진다. 본 프로그램은 록볼트 등을 이용한 사면 보강 및 쇼크리트 보강으로 증가된 안전율도 표현할 수 있지만, 썩기파괴를 제외한 원호파괴, 평면파괴 및 전도파괴 해석에는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다.

Fig. 8은 Site 7에 대한 SWEDGE 해석 결과를 도시한 것이다. Site 7에 대한 SWEDGE 해석 결과에서 035/55, 015/80 절리에 의해 Fig. 8과 같이 썩기파괴 발생 가능성이 있을 것으로 해석되었으며, 다른 절리와의 연관성으로 인해 또 다른 썩기파괴가 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

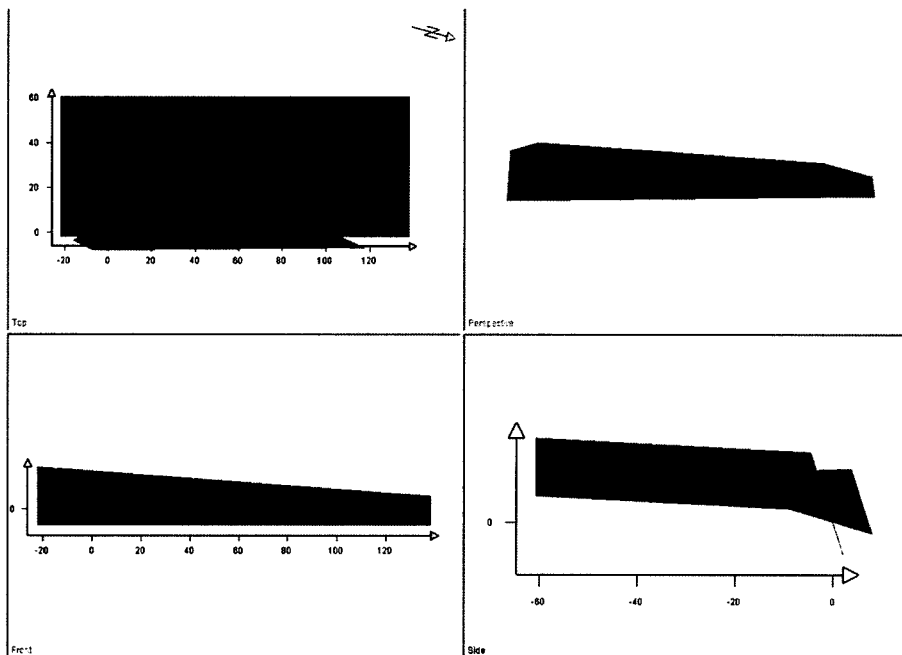


Fig. 8. Result of SWEDGE calculated at the site 7.

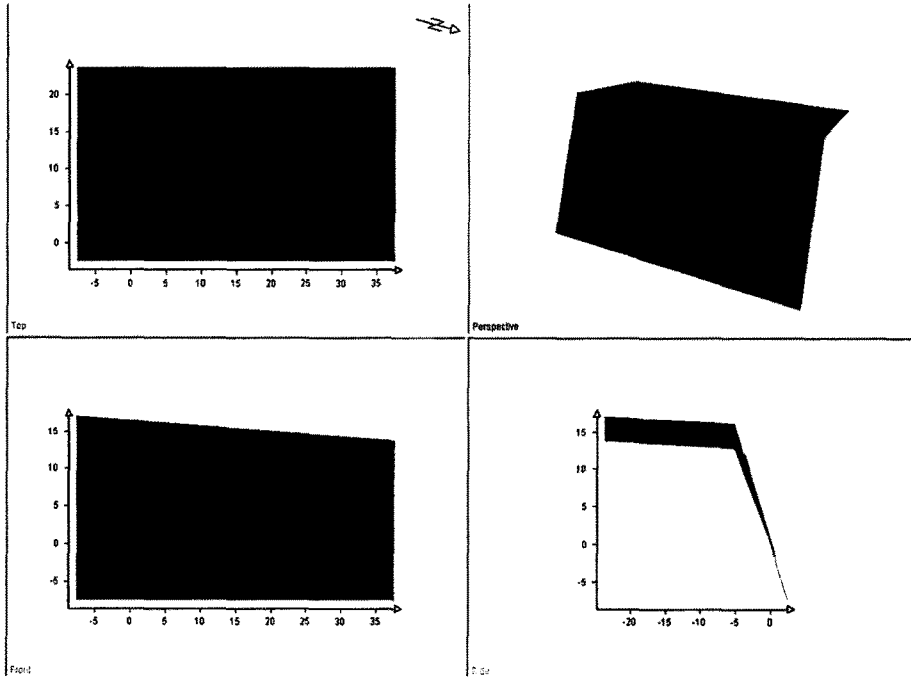


Fig. 9. Result of SWEDGE calculated at the site 13.

Site 13의 경우, 080/80과 185/60 절리에 지배를 받아 썩기파괴가 발생할 가능성이 있으며, 주변의 절리인 090/55와 115/62 절리 패턴의 영향으로 추가적인 썩기파괴 발생 가능성이 현저히 높은 것으로 나타났다 (Fig. 9).

SLIDE

SWEDGE를 이용해 절리방향성에 대한 안정성을 파악한 다음, 동일지역 풍화사면에 대해 사면 안정해석 범용 프로그램인 SLIDE를 이용하여 사면 안정성 해석을 실시하였다(SLIDE 2D). SLIDE 프로그램은 전단강

도( $\tau$ )를 이용하여 사면의 안전율을 구하는 것으로 사면을 구성하는 암석의 단위중량, 사면의 높이와 넓이, 점착력( $c$ ), 응력( $\sigma_n$ ), 사면의 각도( $\phi$ ) 등이 입력변수로 사용된다. 본 프로그램을 이용해 원호파괴에 대한 안정성 검토 결과, 검토 안전율이 기준 안전율보다 낮게 나타났다. 사면의 기준안전율은 한국도로공사 도로설계 실무편람(1996)을 이용하였다.

Site 7의 경우 식생으로 인한 파괴 가능성과 낙석 가능성이 있는 것으로 조사되었다(Fig. 10). 절리수는 적지만 대체로 넓게 분포하고 있었으며, 원호파괴에 대한 안정성 검토 결과에서 우기 시 최소안전율이 기준

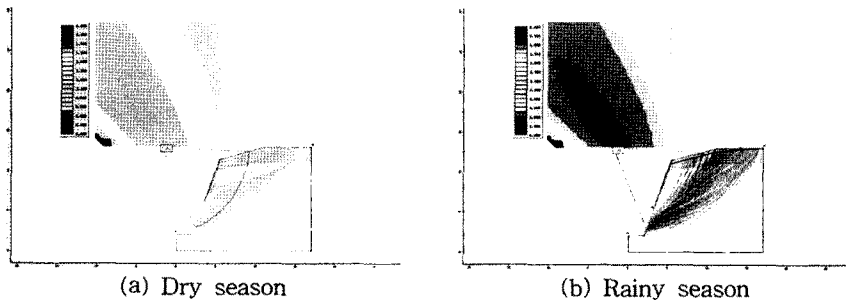


Fig. 10. Analysis result of slope stability using SLIDE at site 7.

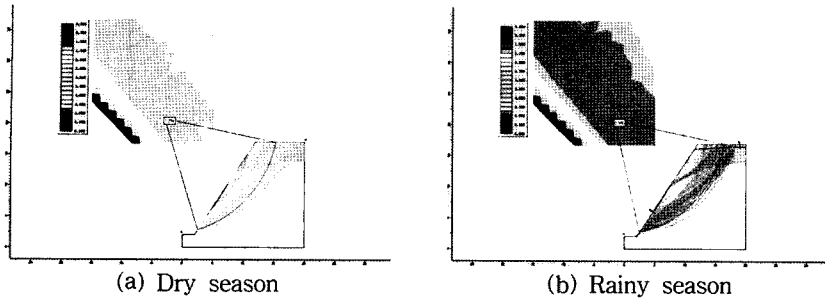


Fig. 11. Analysis result of slope stability using SLIDE at site 13.

Table 3. Result of slope stability analysis for the site 7 and 8.

Location	Calculated Safety factor	Criterion Safety factor	Safety decision	Remark
Site 7	1.252	1.5	N.G	Dry season (bishop)
	0.931	1.2	N.G	Rainy season (bishop)
Site 13	1.294	1.5	N.G	Dry season (bishop)
	0.996	1.2	N.G	Rainy season (bishop)

안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 사면 구배의 기준을 조정하거나 사면 보강 공법이 적용될 필요가 있을 것으로 판단되는 사면이다. Table 3은 SLIDE 분석 결과를 검토안전율과 기준안전율과의 관계를 비교한 것이다.

Site 13 구간은 낙석 방지망으로 보호되어 있는 사면으로 우측사면에 켜기파괴 가능성이 있는 것으로 조사되었다(Fig. 11). SLIDE 프로그램 하에서 원호파괴에 대한 안정성 검토 결과, 우기 시 최소안전율이 기준안전율을 만족하지 못하는 것으로 해석되었다.

### 결론

사면 안정화 시설물의 시공과 굴착공사로 인하여 발생하는 주변지반의 붕괴와 그 밖의 피해를 최소화하고 문제점을 설계 초기단계에서 충분히 고려함으로써 현장의 모든 여건에 부합될 수 있는 사면 안정공법을 채택하여야한다. 본 연구지역 사면의 경우, 지구물리탐사 및 현장조사 결과에서와 같이 암반사면의 풍화와 절리로 인해 낙석이 진행 중에 있으며, 사면붕괴 위험성이 상시 존재하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 사면해석을 실시한 결과에서 켜기파괴 발생 가능성이 현저히 높은 것으로 확인되었다.

1) 사면 안정성 평가에서 SWEDGE 해석 결과, Site 7과 Site 13에서 주절리의 영향으로 켜기파괴 발생 가능성이 매우 높게 나타났다.

2) SLIDE 해석에서는 Site 7과 8의 경우, 풍화사면에서는 원호파괴로 인해 최소 안전율이 기준 안전율에 만족하지 못하였다.

3) 전기비저항 탐사에서는 전 구간에서 파쇄대로 보이는 연약대가 모두 하부에 넓게 나타났으며, 상부에는 핵석에 의한 고비저항대가 국부적으로 존재한 것으로 분석되었다. 또한 연약대, 핵석, 함수대 구간을 명확히 파악할 수 있었다.

이와 같은 연구결과를 토대로 볼 때, 사면 구배의 기준을 조정하거나 장비의 시공성과 급구배 적용 가능성, 경제적인 측면을 고려하여 본 연구지역의 최적의 사면 보강공법을 채택하여 적용해야 할 것이다.

### 참고 문헌

광해방지사업단, 2007, 물금광산 지반안정성 기본조사 보고서, pp. 111-118.  
 대한토목학회, 2004, 암반사면의 조사와 대책, pp. 150-154.  
 엄정기, 2007, 절리암반내 동질구조부 구분을 위한 정량적 기준에 대한 연구, 한국암반공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 1-14.  
 이송, 이규환, 채점식, 2002, 사면의 설계와 시공, 예문사, pp. 3-4.  
 정교철 외, 2001, 사면안정해석, 도서출판 엔지니어즈, pp. 224.  
 한국도로공사, 1996, 도로설계실무편람, 한국도로공사.  
 Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE, 106, pp. 1013-1035.



Slide 2D, Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes: Verification manual, Rocscience INC.

---

2008년 8월 20일 원고접수, 2008년 9월 16일 게재승인

**김만일**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3117  
Fax: 042-868-3415  
E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

**김종태**

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

**김재홍**

한국수자원공사 수자원연구원  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지  
Tel: 042-870-7623  
Fax: 042-870-7619  
E-mail: kjhpmk@kwater.or.kr

**노병돈**

삼성물산 건설부문 TA팀  
137-857 서울시 서초구 서초2동 1321-20 삼성물산  
빌딩 20층  
Tel: 02-2145-6588  
Fax: 02-2145-6581  
E-mail: engeo@naver.com

**정교철**

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